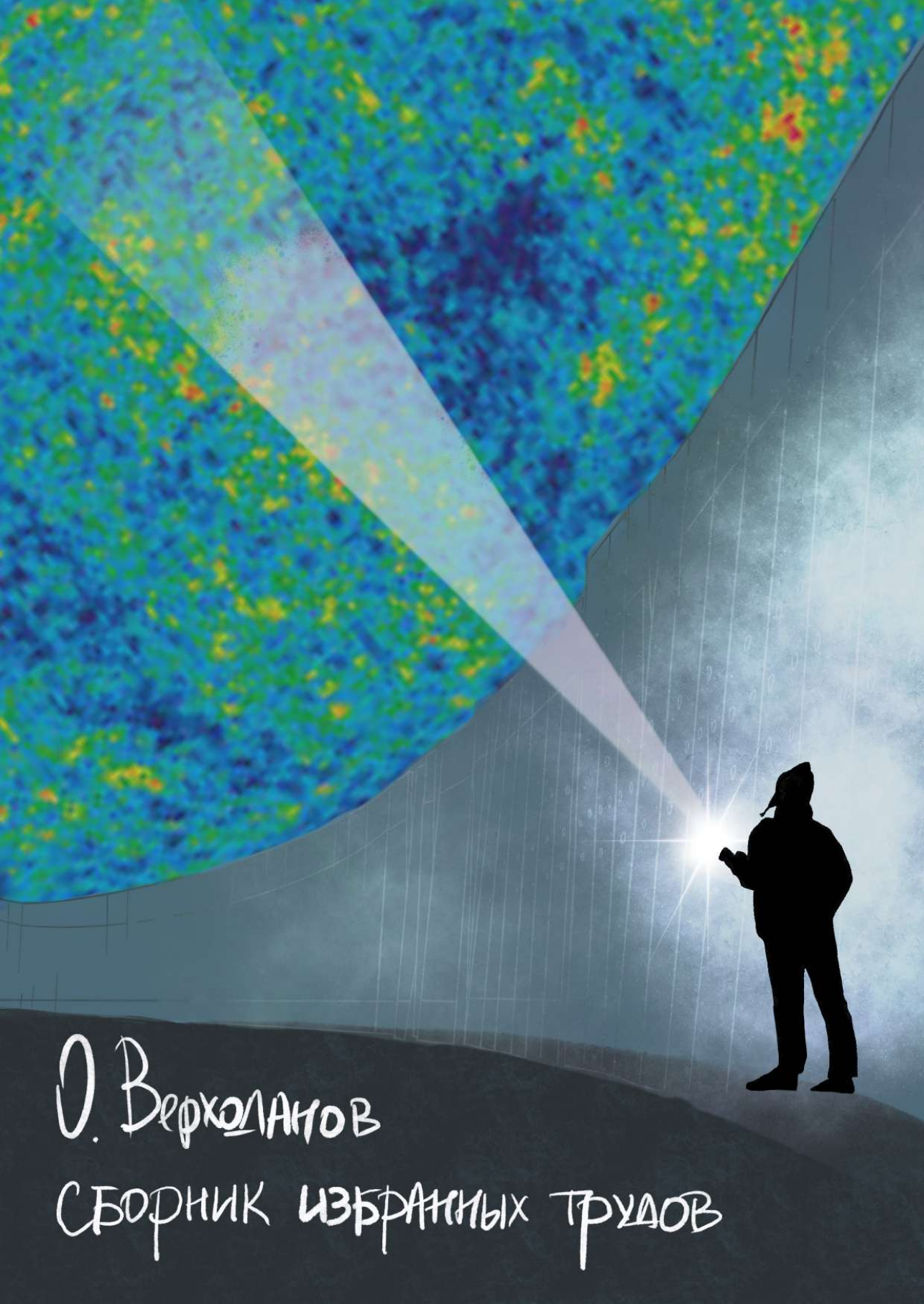


О. Верхоланов

Сборник избранных трудов

О. В. Верходанов —
астрофизик, космолог и
популяризатор науки

О.В. ВЕРХОДАНОВ – АСТРОФИЗИК, КОСМОЛОГ И ПОПУЛЯРИЗАТОР НАУКИ

Нижний Архыз 2025

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российская академия наук

О. Верходанов. Сборник избранных трудов
О. В. Верходанов — астрофизик, космолог и популяризатор науки / Нижний Архыз, 2025.
— 444 с. : ил.

ISBN 978-5-6045062-2-6

В настоящую книгу вошли избранные статьи ведущего научного сотрудника САО РАН Верходанова Олега Васильевича. Несомненно, книга будет интересна астрономам, студентам и аспирантам физических специальностей и многим школьникам, увлеченным разгадкой тайн возникновения Вселенной. Эта книга выходит в год, когда Олегу исполнилось бы 60 лет. В книгу включены воспоминания друзей, коллег, учеников и уникальные фотографии.

Составители сборника выражают благодарность П. Д. Насельскому и издательствам журналов, давшим разрешение на перепечатывание статей: Bulletin of the Special Astrophysical Observatory (САО РАН), Аст-рофизический бюллетень (САО РАН), Земля и Вселенная (ФГБУ «Издательство «Наука»), «Успехи физически наук» (РАН), Astronomy and Astrophysics Transaction (Taylor & Francis Group), Data Science Journal, Physical Review C (AMERICAN PHYSICAL SOCIETY), The Astrophysical Journal (IOP Publishing).

УДК 52(081)+082.2

ISBN 978-5-6045062-2-6
© САО РАН, 2025

Предисловие

Пять лет назад, 5 апреля 2020 года на 56-ом году жизни, ушел от нас Олег Васильевич Верходанов, наш коллега, товарищ, друг...

Накануне его 60-летия мы публикуем сборник его 34 основных научных работ (а всего их более 200), чтобы собрать в одной книге, что ему удалось написать за не очень длинную, но плодотворную жизнь. Мы стремимся ознакомить молодое поколение ученых с уникальными радиоастрономическими и космологическими разработками Олега Васильевича. Заслуги Олега Васильевича перед российской наукой велики: он – лауреат программы 2008-2009 гг. "Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН" Фонда поддержки отечественной науки, лауреат Фонда Дмитрия Зимина "Династия" 2010-2012 гг. по программе поддержки молодых физиков – докторов наук, победитель конкурса "Лучшие обзоры УФН 2016" с обзором "Космологические результаты космической миссии "Планк". Сравнение с данными экспериментов WMAP и BICEP2". Вырастил трех аспирантов, доведя их до защиты кандидатских диссертаций.

С 1987 г. после окончания СПбГУ Олег Васильевич работал в Специальной астрофизической обсерватории АН СССР (с 1991г. – РАН). В 1993 г. под руководством Ю.Н. Парийского защитил кандидатскую диссертацию по теме "Методы исследования радиоисточников в режиме околозенитного синтеза на РАТАН-600". В 2002-2004 годах работал в Центре теоретической астрофизики в г. Копенгагене (Дания) в должности приглашенного профессора. Надо заметить, что в ту пору он тесно сотрудничал с многими специалистами в области космологии и исследований микроволнового фона, что кардинально увеличило его научный потенциал. В 2005 г. в совете АКЦ ФИАН Олег Васильевич защитил докторскую диссертацию "Методы и результаты наблюдательной радиокосмологии". И с тех пор работал в должности ведущим научным сотрудников в лаборатории радиоастрофизики САО РАН.

Олег Васильевич Верходанов в САО РАН проработал более 30 лет и занимал активную жизненную позицию. Это не пустые слова, он болезненно переживал реформы академической науки, и стремился следовать ее высоким критериям, заложенным 300-летней историей. Это был блестящий ученый и популяризатор науки, – систематически читал лекции студентам и школьникам, организовывал школы и конференции, успешно готовил аспирантов и выводил их в самостоятельную научную жизнь. Верходанов Олег Васильевич был одним из основных организаторов астрофизических школ на базе САО РАН и в 2016-2019 гг. – 1-ой астрофизической школы "Траектория", которая теперь носит его имя.

За время работы им было опубликовано более 200 научных работ по актуальным направлениям наблюдательной радиоастрономии и космологии. Автор и научный редактор нескольких книг, научных и научно-популярных статей в области исследования радиогалатик, реликтового излучения и радиоастрономии. В последние годы Олег Васильевич проводил более 50 публичных лекций и выступлений по актуальным темам современной астрономии ежегодно.

В 2009 г. О.В. Верходановым в соавторстве с академиком Ю.Н. Парийским опубликована монография "Радиогалактики и космология", которая посвящена исследованиям мощных радиогалактик в различных диапазонах длин волн. Особое внимание обращено на интерпретацию наблюдательных данных и на результаты многолетних исследований радиогалактик по программе "Большое трио" на радиотелескопе РАТАН-600 и 6-метровом оптическом телескопе БТА САО РАН, и на радиоинтерферометре VLA NRAO (США). Олег Васильевич разработал программное обеспечение для анализа данных наблюдений в континууме на РАТАН-600, исследовал возможности работы телескопа как фазированной антенной решетки, разработал алгоритмы фазового анализа и программный пакет GLESP на основе нового предложенного метода пикселизации неба для высокоточных исследований реликтового излучения на полной сфере. Совместно с коллегами он впервые обнаружил негауссовость карты флуктуаций космического микроволнового фона и показал, что она обусловлена неучтенным вкладом Галактики, оценил возрасты далеких радиогалактик, в рамках стандартной космологической модели ΛCDM. Олег Васильевич исследовал вклад радиогалактик разных популяций в космический микроволновый фон, создал новые каталоги радиоисточ-

ников, предложил метод оценки средних континуальных радиоспектров квазаров в разные космологические эпохи для выявления возможного их искажения, обусловленного числом слияний и “зажиганием” радиоисточников и их собственной эволюцией. О.В. Верходанов в составе коллектива программы “Большое Трио” (БТА-РАТАН-600-VLA). Под руководством академика Ю.Н. Парийского исследовал одну из самых далеких радиогалактик во Вселенной RCJ0311+0507 на красном смещении z=4.514 со сверхмассивной черной дырой в центре родительской галактики.

Вклад Олега Васильевича в радиоастрономические исследования неоценим – наблюдатель, теоретик, математик, программист и педагог. Им было создано несколько уникальных программных пакетов для работы с радиоастрономическими данными, которые используются астрономами-наблюдателями и теоретиками. При его непосредственном участии создана и успешно развивается система поддержки астрофизических каталогов CATS, которая активно используется мировым научным астрономическим сообществом.

Сборник охватывает работы с 1993 г. по 2018 г. Многие из опубликованы в Астрофизическом бюллетене САО, другие работы опубликованы в ведущих научных журналах мира, есть несколько работ, которые не вошли в сборник и из-за проблем с авторскими правами. В любом случае работы не потеряли своей актуальности, а сборник будет ценным помощником для молодых радиоастрономов и космологов.

С.А. Трушкин, д.ф.-м.н.,
заведующий лабораторией радиоастрофизики
САО РАН

Содержание

Англоязычные статьи

BASIC PRINCIPLES OF FLEXIBLE ASTRONOMICAL DATA PROCESSING SYSTEM IN UNIX ENVIRONMENT
O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, V. N. Chernenkov, V. S. Shergin 9

ON THE PROPERTIES OF THE EXTREMAL-MEDIAN DETECTOR OF FAINT RADIO SOURCES OF THE INDEFINITE SHAPE
O. V. Verkhodanov, V. L. Gorokhov 13

ON ONE ALGORITHM OF FITTING OF THE FUNCTION, PREASSIGNED BY TABLE, TO TABULAR DEFINED POINTS
O. V. Verkhodanov 19

RC J1148+0455 IDENTIFICATION: GRAVITATIONAL LENS OR GROUP OF GALAXIES?
O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, O. P. Zhelenkova, A. V. Temirova, J. Winn, A. Fletcher, B. Burke 22

THE SOFTWARE SYSTEM "EVOLUTION OF RADIO GALAXIES"
O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, N. V. Verkhodanova, V. N. Chernenkov, Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, A. V. Temirova 26

STEEP-SPECTRUM UTR SOURCES IN FIRST SURVEY
O. V. Verkhodanov, H. Andernach, N. V. Verkhodanova 29

PROBLEMS OF OBSERVATIONAL RADIO COSMOLOGY. REWVIEW
O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij 31

NON-GAUSSIANITY OF THE DERIVED MAPS FROM THE FIRST-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE DATA
L-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, M. J. Way 54

PHASE CROSS-CORRELATION OF THE WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE INTERNAL LINEAR COMBINATION MAP AND FOREGROUNDS
P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov 59

PRIMORDAL MAGNETIC FIELD AND NON-GAUSSIANITY OF THE 1-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) DATA
P. D. Naselsky, L.-Y. Chiang, P. Olesen, O. V. Verkhodanov 64

THE CATS SERVICE: AN ASTROPHYSICAL RESEARCH TOOL
O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, V. N. Chernenkov 76

MORPHOLOGY OF HIGH-MULTIPLICITY EVENTS IN HEAVY ION COLLISIONS
P. Naselsky, C. H. Christensen, P. R. Christensen, et al. 84

Русскоязычные статьи

ТЕКУЩИЙ СТАТУС БАЗЫ ДАННЫХ CATS
О. В. Верходанов, С. А. Трушкин, Х. Андернах, В. Н. Чрененков 97

ПАКЕТ АНАЛИЗА ДАННЫХ GLESP ДЛЯ КАРТ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛНОЙ СФЕРЕ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В РАМКАХ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ FADPS
О. В. Верходанов, А. Г. Дорошкевич, П. Д. Насельский, Д. И. Новиков, В. И. Турчанинов, И. Д. Новиков, П. Р. Кристенсен, Л.-И. Чианг 111

ОПРЕДЕЛЕНИЕ Ω_Λ И H_0 ПО ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ РАДИОГАЛАКТИК
О. В. Верходанов, Ю. Н. Парийский, А. А. Старобинский 123

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИЗКИХ МУЛЬТИПОЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА
П. Д. Насельский, О. В. Верходанов, М. Т. Б. Нильсен 134

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КАРТ NVSS ОБЗОРА И WMAP ILC
О. В. Верходанов, М. Л. Хабибуллина, Е. К. Майорова, Ю. Н. Парийский 146

МОЗАИЧНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ ФОНОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИСТОЧНИКОВ
О. В. Верходанов, М. Л. Хабибуллина, Е. К. Майорова 155

К ПОНИМАНИЮ ЗАГАДКИ ХОЛОДНОГО ПЯТНА В КАРТАХ WMAP
П. Д. Насельский, П. Р. Кристенсен, П. Коулз, О. В. Верходанов, Д. И. Новиков, Я. Ким 163

ЗАГАДКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ GRB НА СФЕРЕ
О. В. Верходанов, В. В. Соколов, М. Л. Хабибуллина, С. В. Карпов 184

МУЛЬТИПОЛЬНЫЕ ДОМИНАНТЫ В МОЗАИЧНЫХ КАРТАХ КОРЕЛЛЯЦИЙ ДАННЫХ WMAP
О. В. Верходанов, М. Л. Хабибуллина 196

СТАТИСТИКА ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КАРТЫ WMAP ILC В НАПРАВЛЕНИИ НА ДАЛЕКИЕ РАДИОГАЛАКТИКИ
О. В. Верходанов, М. Л. Хабибуллина 207

НЕГАУССОВОСТЬ СТАТИСТИКИ ПИКОВ В КОНТРАСТНЫХ ПЯТНАХ WMAP ILC
О. В. Верходанов, А. А. Басова 214

ПРОЯВЛЯЕТСЯ ЛИ ВКЛАД ИНФРАКРАСНЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ИСТОЧНИКОВ НА НИЗКИХ ГАРМОНИКАХ МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА?
О. В. Верходанов, Я. В. Найден 223

О ДВУХ НИЗКИХ ГАРМОНИКАХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ КАРТ МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА
О. В. Верходанов, Т. В. Кешелава, Я. В. Найден 241

ПОИСК НЕГАУССОВОСТИ В НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО РЕЛИКТОВОМУ МИКРОВОЛНОВОМУ ФОНУ
О. В. Верходанов 250

БАЗА ДАННЫХ КАРТ ПРОТЯЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СИСТЕМА ДОСТУПА К НИМ
О. В. Верходанов, Я. В. Найден, В. Н. Черненков, Н. В. Верходанова 272

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ И КАРТ НИЗКИХ ГАРМОНИК ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ WMAP И PLANCK
О. В. Верходанов 281

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ RCR-КАТАЛОГА В МИЛЛИМЕТРОВОМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ ПО ДАННЫМ МИССИИ PLANCK
О. В. Верходанов, Е. К. Майорова, О. П. Желенкова, М. Л. Хабибуллина, Д. И. Соловьев, Ю. Н. Парийский 291

РАТАН-600 И РАДИОГАЛАКТИКИ
О. В. Верходанов, Ю. Н. Парийский 318

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ РАДИОГАЛАКТИК РАЗНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ПО МИКРОВОЛНОВЫМ ДАННЫМ МИССИИ PLANCK
О. В. Верходанов, Д. И. Соловьев, О. С. Улахович, М. Л. Хабибуллина 335

СРАВНЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВА КАРТ CMB КОСМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ WMAP И PLANCK
О. В. Верходанов, Я. В. Найден 348

ПОИСК КАНДИДАТОВ В ОБЪЕКТЫ С ЭФФЕКТОМ СЮНЯЕВА-ЗЕЛЬДОВИЧА В ОКРЕСТНОСТИ РАДИОИСТОЧНИКОВ
О. В. Верходанов, Н. В. Верходанова, О. С. Улахович, Д. И. Соловьев, М. Л. Хабибуллина 362

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СРЕДНИХ НЕПРЕРЫВНЫХ СПЕКТРОВ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЯХ $Z > 2$
О. В. Верходанов, Д. Д. Козлова, Ю. В. Сотникова 383

Воспоминания и фотографии

ВОСПОМИНАНИЯ
391

ФОТОГРАФИИ
403

Списки работ

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ
421

СПИСОК ВИДЕО-ЛЕКЦИЙ
439

BASIC PRINCIPLES OF FLEXIBLE ASTRONOMICAL DATA PROCESSING SYSTEM IN UNIX ENVIRONMENT*

O. V. Verkhodanov[1], B. L. Erukhimov[1], M. L. Monosov[1], V. N. Chernenkov[1], V. S. Shergin[1]

[1]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia

Methods of construction fo a flexible system for astronomical data processing (FADPS) are described. An exapmle of construction of such a FADPS for continuum radiometer data of the RATAN-600 is presented. A Job Control Language of this system is the Job Control Language of OS UNIX. It is shown that using basic commands of the data processing system (DPS) a user, knowing basic principles of job in OS UNIX, can create his own mini-DPS. Excamples of such mini-DPSs are presented.

1. INTRODUCTION

Each data processing system, whatever friendly it is, requires from the user some computer knowledge or training. And it is very often that the more friendly is the system, the higher knowledge is needed, and such systems are rather bulky, These faults are very frequent in systems considered universal (MIDAS, AIPS, etc). Procedures of start, commands of data editing, and execution of different operations demand knowledge of the basic level of a data processing system (ADPS) is "system in system", it is necessary to note them that knowledge of the commands of the operating system, in which ADPS is installed, is implied. The developed ADPS may also have another fault associated with a situation, when the principles of programming and working with images in this ADPS differ from the principles of the operating system which controls this ADPS.

Here we propose another approach of creation of a data processing system. This approach has been realized in the development of an ADPS for continuum radiometers of the RATAN-600 ([1–4]). We call this approach a module approach, and the system of reduction — a flexible astronomical data processing system (FADPS).

2. REALIZATION OF MODULE APPROACH

The main principles of work with programs of the data processing system and the rules of managing in the UNIX system are the same in this approach. Here the command-languages of the UNIX (**shell** and **cshell**) are the command languages of the ADPS. These languages have cycle, condition, and local transition operators. The process of data reduction is consecutive application of the operators (command) to the user's data recorded equidistant measurements and kept in separate files. Each operator corresponds to the definite command called "brick" or module. Having a set of such "bricks" the ADPS user familiar with the bases of the operating system UNIX can construct his own data processing system, or having typed a sequence of modules, get the necessary result.

Let, for example, some vector $\mathbf{D}$, describing observations of a radio source, correspond to the observational data. We have to obtain the approximation curve as a Gaussian inscribed in a record of transit across the beam pattern of the telescope. The standard procedure of getting the result consists in consecutive application of two operators: background subtraction operator $F_{\rm bgd}$ and Gaussian-approximation operator $F_{\rm gauss}$, i.e. as a result we have to obtain vector $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{R} = F_{\rm gauss}(F_{\rm bgd}(\mathbf{D})).$$

The procedure of application of the two operators will be written in the UNIX system by the following string:

```
bgd -w 10 < D : gauss -n 20 > R,
```

where **bgd** is the program of background subtraction, **gauss** is the program of Gaussian approximation, the key -w shows that the next parameter is the size of the window for smoothing, the key -n shows that the next parameter is a level lower which there are no inscribing of gaussians (see [3,4] for more details about

*Bulletin of the Special Astrophysical Observatory, 1993. 36. P. 132

these and other programs). Symbols '<', '>' and ':' are the symbols of the job control language (JCL) of the shell of the UNIX meaning accordingly redirection of input (input from file **D**), redirection of output (output into file **R**) and a token of pipeline when the standard out put of each command, but the last is connected by a pipe to the standard input of the next command. Naturally, this is valid when the operators serve as filters, i.e. they have only one input and only one output for the vector data. There may be any number of additional inputs for scalar parameters, and they may be set, as shown above, through the key words (e.g. the key -w 10). Besides the filters other program-operators may be used at the input, for example, the program **ravr** for robust summation of a great number of records (see hereafter), and others.

Thus combining sets of different program-operators and using the JCL of the UNIX the user constructs his own command strings to achieve a needed result.

Another example: operation of averaging some vectors of data with preliminary background subtraction:

$$\mathbf{R} = \sum_{i}^{n} F_{\rm bgd}(\mathbf{D}_i),\ i = 1{,}n.$$

The following set of operators in the UNIX **shell** corresponds to this expression.

```
LIST = 'ls D*'
BLIST = ""
for i in $LIST
do bgd -w 10 < $i > $i.B
    BLIST="$BLIST $i.B"
done
ravr $BLIST > R
```

Here **LIST** is the list of the files whose names begin with the letter **D** (hypothetically **D1**, **D2**, ..., **Dn**), **BLIST** is the list of the files with subtracted background data (names are formed by adding expansion **.B**), operators "**for**", "**in**", "**do**" and "**done**" describe the operator of cycle "**for**" of the language shell, i is the variable of the cycle, symbol '**$**' means "take the value of the variable", record **LIST** = 'ls **D***' where '" means assign to variable **LIST** the result of execution of command "ls **D***" which gives the names of all files beginning with the letter **D**, **ravr** is the program of robust averaging ([1]).

This example shows that programming with the JCL shell is simple enough. And if the user has worked in the UNIX system, then application of FADPS commands is not very hard. Programming (communication with FADPS) in this language is possible in both the interactive mode and using command files. It should be noted that the main procedures (e.g. averaging) are formed as command files of "bricks". So, for averaging the user can apply the program **aver**, and then the averaging command will be recorded in one string:

```
aver $LIST -r -o  R,
```

here the key -r is the sign of robust averaging, and the key -o shows that the next parameter is the file name with the result of program execution.

A natural desire of every user is to have a great number of basic modules in the system. Although this question can be argued because the large list of command-operators gives rise to some confusion on the one hand, and on the other hand it makes no sense to create separate modules with similar operations which can be set by the input parameters.

In creation of "bricks" it is necessary to take into account some principles of writing such programs. First, if it is possible, the modules must word as filters, i.e., as it is noted above, to read data from the standard input and to record the result into the standard output. Second, program-operators must work with the data recorded in a certain standard format. We used F-format ([5, 6]) close to the FITS format ([7]). And third, writing dialogue mode programs, it is important to foresee a possibility of parameter input with keys, i.e. the work of the program in the non-dialogue mode. Keeping to these rules the user or programmer can create his modules and include them into the data processing system. These principles were used in the data reduction for the experiment "COLD-90" ([8]) and in simulation of radio images ([9]).

A separate question is visualization of data processing results. The principal convenience of the ADPS is chiefly determined by a possibility of visualization of the data and reduction results, and also to work with the data in the interactive graphic mode. In this case, of course, it is impossible to avoid creation of "system in system". The system UNIX is convenient because creation of such systems is facilitated by the FADPS, in this case there is no sense to make subroutines executing certain operations or corresponding to some operators. It is suffice to call and transfer control to some ADPS program. The result can be displayed graphically, i.e., this will result in saving human and computer resources.

In this way, for example, the program fgr was created. This program is a data processing system to be used with one-dimensional data of the RATAB-600 continuum radiometers in the graphic mode. This program employs different commands of the FADPS, and the ready result alone is shown on the display. A small fragment of the module scheme is shown in fig. 1.

The structure of this small fragment shown in the

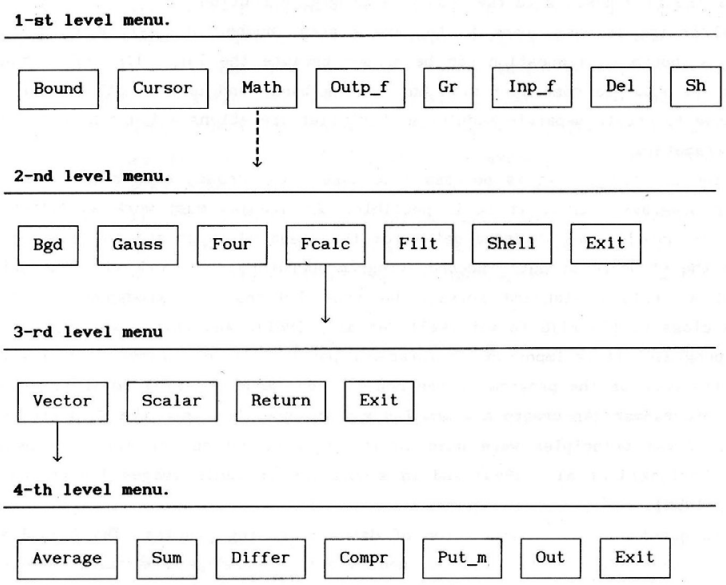


Fig. 1. Fragment of module scheme of the program **fgr**.

picture is associated with the call of the program-calculator **fcalc** for F-files. The constructed system of menu makes easier for the user a search for the operation needed. Here is shown a transition:

Math (mathematics operations) → **Fcalc** (scalar-vector operations) → **Vector** (vector operations) → needed operation.

Besides some operations unified by the item's name there are also operations of control, e.g. operation of recording the result into the operative memory, onto the hard disk, and operations of exit from the current menu.

The construction of the program is oriented exclusively on the described module principle of organization of the data processing system. Besides calling corresponding "bricks" such program is due to serve the user (system of different level menu and corresponding prompts) and to visualize a result. There is also a possibility of executing the program-module which is not described as an item of the menu. It can help to execute additional operations over the data: the program **fgr** makes a request for the program name (keys may be) after entry in the item **Filt** (filter) and transfers control to that program. The obtained result will be displayed.

Another question is work with data of different dimensions. Let us take again as an example the FADPS of continuum radiometers data of the RATAN-600 ([2,3]). Here are realized possibilities of work with one-dimensional records of transits of radio sources through the beam of the RATAN-600 and work with two-dimensional surveys at this telescope. The optimal solution of this problem (i.e., the input data have different dimensions) is, of course, creation of program "bricks" working with different data types and distinguishing dimensions of these data after reading the headers of files. However, there are some procedures strictly oriented on the data of defined dimensions, e.g. data visualization. In this case one has to create programs having similar problems, but different solutions because of different dimensions of input data.

In conclusion note that the flexibility of the FADPS is determined by two factors:

1) sufficient number of elementary program-"bricks" used for building the data processing system;
2) flexibility of the operating system UNIX whose command language is a strong "cement" in construction of this building.

Any user can create his own mini-ADPS out of program-"bricks" and JCL of the operating system.

It is important to note that this data processing system allows for new procedures to appear and is open for users and programmers.

We thank Yu. N. Parijskij, A. G. Gubanov, M. G. Mingaliev, N. S. Soboleva for the useful discussion when developing the FADPS for data of continuum radiometers.

BIBLIOGRAPHY

1. B. L. Erukhimov, V. V. Vitkovskij, and V. S. Shergin, Prepr. of SAO USSR AS **50** (1990).
2. O. V. Verkhodanov, Preprint SAO RAS, **75**, 102 (1992).
3. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Minosov, et al., Preprint SAO RAS **87**, 38 (1992).
4. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Minosov, et al., Report of SAO RAN **205**, 1 (1992).
5. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, O. P. Zhelenkova, et al., Report of SAO USSR AS **200**, 1 (1991).
6. O. V. Verkhodanov, V. V. Vitkovskij, B. L. Erukhimov, et al., Preprint **89SPb**, 13 (1993).
7. D. C. Wells, E. W. Greisen, and R. H. Harten, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **44**, 363 (1981).
8. Yu. N. Parijskij, B. L. Erukhimov, M. G. Mingaliev, et al., in *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop* (Kluwer Academic Publishers, Durham UK, 1991), pp. 437-442.
9. O. V. Verkhodanov and V. B. Khaikin, in *22-nd All Union conference Radio telesxopes and interferometers* (Theses, Erevan, 1990), 169.

ON THE PROPERTIES OF THE EXTREMAL-MEDIAN DETECTOR OF FAINT RADIO SOURCES OF THE INDEFINITE SHAPE*

O. V. Verkhodanov[1], V. L. Gorokhov[1]

[1]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia

A faint signal detector constructed ont the basis of the extremal and non-parametric statistics is described. The procedure of the detector efficiency estimation on the basis of false alarm and true detection probabilities is proposed. Results of the detector performance with the real RATAN-600 observational data are given. Comparison with other signal detectors is given.

Keywords: statistics — data rpcessing — signal detection

1. INTRODUCTION

The detection of extremely faint radio sources of indefinite shape is an important problem to be solved in radio astronomy ([1–3]). Taking into consideration the fact that sources are faint and "sinking" in noises, their a priory shape is very difficult (or impossible) to describe with the beam pattern (or the point spread function). In these circumstances the employment of gaussian inscribing methods and correlation detection methods does not yield positive effect. And the data processing procedures lose their efficiency and even become inapplicable. The situation is complicated still more by a fact of the presence of the pulsed interferences and radio emission of the atmosphere.

The synchronous change in the stochastic properties in "columns" of the resolution intervals being examined is an important informative indication of a useful signal ([4, 5]). The sizes of these intervals are also the useful a priori information which is at user disposal.

The initial premises enumerated above allow formulation of a new statistical model of a radio astronomical signal.

2. ALGORITHM MODEL

Let us have a series of synchronous scans $\{x_{ij}\}$. In the frames of this model these scans are looked through by a column of examined intervals $\{x_{i+t}\}_j$. Meanings of pixels are to be sporadic values with unknown distribution. The presence of a useful signal is interpreted as synchronous stochastic increasing ([6, 7]) of pixels in the intervals in relation to pixels of the parts of the intervals where a useful signal is either lacking or extremely weal. The presence of interference is interpreted here as non-synchronous extreme values in the intervals. Part of interference effects cam be removed here by the appropriate choice of sizes of the interval being examined.

This model allows the modern achievements of non-parametric statistics to be used. In particular, we suggest making use of extremal statisticses in developing the algorithm. These statisticses ensure the stability of the algorithm under the conditions when the type of pixels distributions is unknown and is changed. Extremal statisticses have an important property of immunity to the presence of correlation properties of interfering pixels. Pulsed interferences are removed with including the median statistics in the algorithm. The achieve invariance of thresholds, the relations of statistics are put in the procedure. Generalization of the model and algorithms to the two-dimensional case $\{x_{ij}\}_s$ (image reduction) is possible. Sampling of pixels, which do not contain a useful signal, using the extremal statistic (minimum of value), is an important constructive innovation. Intervals are supposed to be moved with a shift of interval value. This provides independence of samples and speeds up data processing. The effect of signal "splitting" is removed by the reverse motion with a shift of the initial interval by its halflength.

The modern achievements in mathematical statistics (asymptotical optimality of ranging procedures,

*Bulletin of the Special Astrophysical Observatory, 1996. 39. P. 155

methods of acceleration of machine tests) allow us to accompany the developed algorithms by quantitative characteristics of quality. They include the dependence of the probability of false alarms on the detection threshold, the dependence of the probability of true detection on the signal/noise ratio and on the probability of false alarms. These dependencies allow an observer to estimate objectively results of detection of sources and to apply these estimates to forming the concept of survey completeness ([8]).

Hereafter the detection algorithms realized in programs and results of simulated and natural tests of these algorithms are described in details.

3. ALGORITHM REALIZATION AND ITS EFFICIENCY ESTIMATION

As as has been said above, authors propose extremal-median signal detector (EMSD) in a series of synchronous scans.

For this algorithm to operated several statisticses are calculated:

$$z_{ij} = \min_t \{\mathbf{D}_{i,j+t}\}, \tag{1}$$

$$v_{ij} = \max_t \{\mathbf{D}_{i,j+t}\}, i = 1,m; j = 1,n; t = 1,r; \tag{2}$$

where $\mathbf{D}$ is the martix of m vectors, m is the number of scans, n is the number of points in a scan, r is the number of points in a signal search interval. Using these two extremal statisticses the medians and the following statisticses are computed in each interval:

$$\theta_{v_j} = \operatorname*{med}_i v_{ij} - \operatorname*{med}_i z_{ij}, \tag{3}$$

$$\theta_{z_j} = \operatorname*{med}_i z_{ij}, i = 1,m; j = 1,n; \tag{4}$$

then their ratio is used as a test statistics:

$$q_j = \theta_{v_j}/\theta_{z_j}, j = 1,n \tag{5}$$

In this case the hypothesis of object detection is adapted when the quantity q_j exceeds a certain quantity c. The threshold c can be either set by user or computed in the program.

It should be taken into the consideration in operations with the similar algorithms that all synchronous scans should have an equal zero level. Otherwise the low frequency background variations can produce an erroneous result, though the background fluctuations may appear to be interesting in the atmosphere influence estimation.

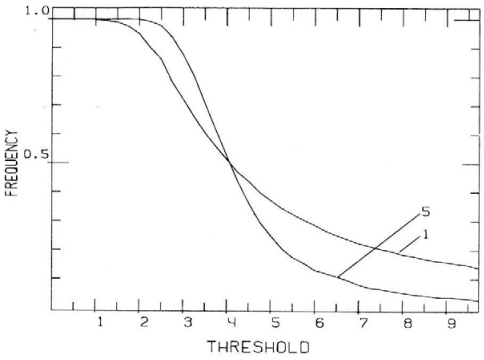


Fig. 1. False alarm probability us detection threshold for 1 and 5 scans in EMSD operation.

The algorithm efficiency was tested with model and also with real observational data.

The simulation was dome using the RATAN-600 flexible astronomical data processing system FADPS ([9]). The recordings are simulated by two types of five scans each: pure noises (with non-correlated gaussian noise) and noise plus signal (a source with intensity gaussian distribution of a certain amplitude and halfwidth is put in each interval).

The detector was passed over the pure noise recordings to compute the probability of false alarm, and the number of events was counted in depending on detection threshold.

The results of computation of the false alarm probability as dependent on the detection threshold for one and five synchronous scans are shown in fig. 1.

To compute the true detection probability depending on the signal/noise ratio, the authors simulated recordings with different signal/noise ratio in five scans for each ratio. The detector with the a specified set detection threshold was passed by these recordings. The family of the curves, computed for five scans and different detection thresholds, is shown in fig. 2.

The optimum choice of the threshold consists in selection a value, which on one hand, yields a low level of false alarms, and on the other hand, yields a sufficiently large probability of true detection for a small signal/noise ratio. As shown in fig. 1 and 2, this value is approximately equal to 3 for extremal median signal detection.

It should be noted that this signal detector can operate for single recordings also. But the main gain still consists in the use of synchronism of several recordings.

One can fast assess quantitively parameters of the

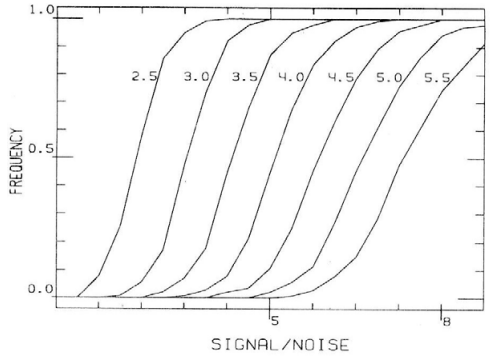


Fig. 2. The true detection probability as a function of the signal/noise ratio for different detection thresholds in EMSD operation.

found source after the signal detection in any interval (when the statistics q_j exceeds the input threshold c using the following formulas ([10])):

$$I = \sum_t I_t$$

$$X = \frac{1}{I}\sum_t X_t I_t \qquad (6)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{I}(X_t - X)^2 I_t}, t = 1,r;$$

where I_t is the intensity value in the t-th point of the interval, X_t is the position of this point in the recording, I is the integral intensity of the possible object, B is the size of the object, r is the size of an interval in pixels.

Parameters of the object can also be estimated with the Causs-analysis procedure ([11]). The time of this procedure execition is sharply decreased with decreasing interval. The new algorithm can help to do it.

As had been said, an essential thing for statistical detectors is the choice of a signal searching interval. This interval is defined, first of all, by the size of a signal to be found. Thus knowledge of the additional a priory information about apparatus function may play a great role.

When one operates with an interval less than the size of the possible desired object, the statistics q_j may sharply increase at the moment of calculations at the object boundary (see fig. 3).

However, the probability of false alarm grows also for due to decreasing amount of the statistical data (see fig. 4).

In this case it is impossible to estimate the characteristics of the object. The best interval from the authors' view point is an interval with the size 1.2–1.5 that the object. Results of EMSD operation on real RATAN-600 observational recordings are shown in fig. 5.

4. COMPARISON WITH OTHER DETECTORS

It is interesting to compare qualitatively the EMSD with detectors of other types, e.g. integral or correlational ones.

The integral detector can be constructed changed by substituting the sum of pixels in am interval fro the right side of formula (3):

$$\theta_{v_j} = \sum_i \sum_t \mathbf{D}_{i,j+t}, \qquad (7)$$

i.e. we have the boxcar average. Formula (4) for the statistics θ_{z_j} can be left unchanged.

for the correlational detector we have

$$\mathbf{C}_{ij} = \frac{1}{A}\sum_s \mathbf{D}_{i,j-s} A_s \qquad (8)$$

Here A is the integral by the beam pattern (apparatus function) A_s, v_{ij} and θ_{v_j} are defined by the following formulas:

$$r_{ij} = \max_t\{C_{i,j+t}\},\ i = 1,m;\ j = 1,n;\ t = 1,r; \qquad (9)$$

$$\theta_{v_j} = \operatorname*{med}_i v_{ij} \quad \text{or}$$

$$\theta_{v_j} = \frac{1}{m}\sum_i v_{ij},\ i = 1,m;\ j = 1,n. \qquad (10)$$

One can apply formula (4) to the statistics θ_{z_j} for a correlational filter or simply calculate dispersion in the current interval. False alarm probabilities versus the detection threshold for extremal-median, integral and correlational detectors are shown in fig. 6.

The relationships between the true detection and the signal/noise ratio for different detection thresholds are shown in fig. 7 for all the three filters.

As it is shown in fig. 7 we have a very low probability of the false alarm even for threshold 1 in the case of an integral filter. And it is necessary to set a threshold practically an order less than for the extremal median filter for obtaining sufficient probability for the object detection. The probability of signal

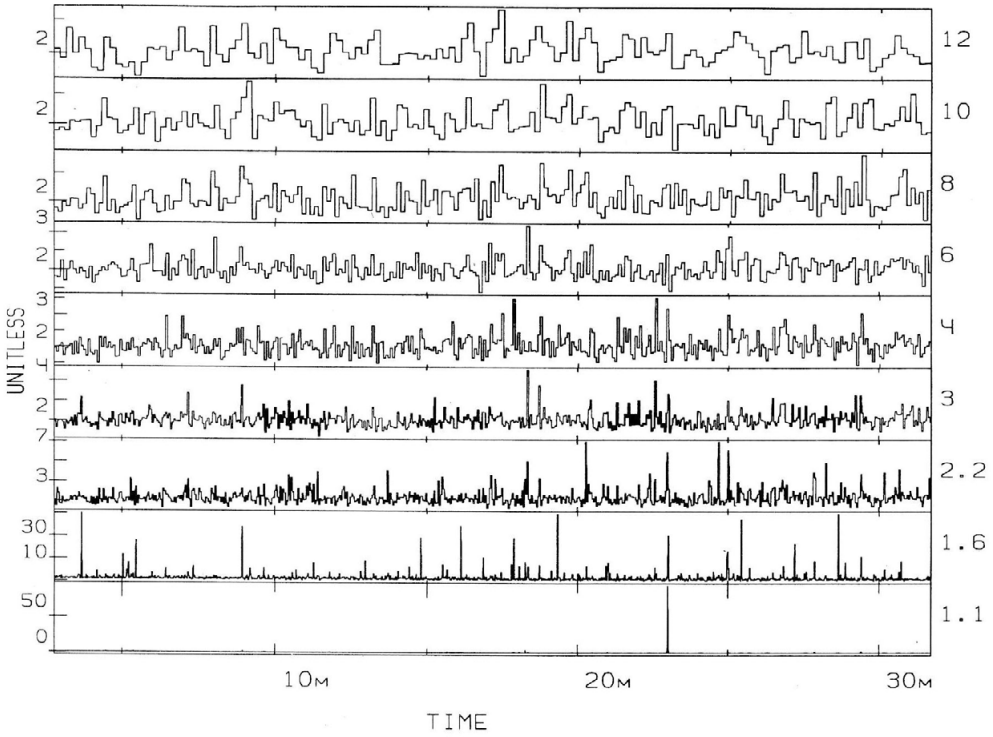


Fig. 3. Results of EMSD operation depending on the interval size for real data recordings. The interval sizes are shown at the right side. A size of beam pattern in 2.2 sec. The ratio (5) is plotted as ordinate. See also fig. 5.

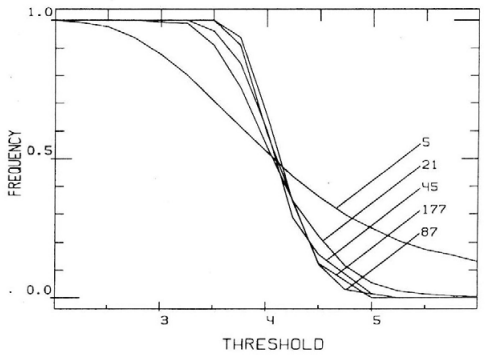


Fig. 4. Increase of the probability of false alarm after decrease of the interval size in the detection thresholds of 2.5 – 5 for EMSD. Numbers show the interval sizes for the pointed curves.

"smearing" is rather high for the integral filter when positive peak is added to the negative nose values and can practically be completely neutralized.

For the correlational signal the probability of true detection is very high for small signal/noise ratios. But the probability of false alarm is also very large for the sufficiently large detection thresholds.

5. OTHER DETECTORS BUILT ON THE EXTREMAL STATISTICS

The procedures described above allow us to build and study other signal detectors operating in a series of synchronous scans. For example. one can construct a detector responding to signal changing (variability) in the series of synchronous scans. The statistics z_{ij} and v_{ij} are defined by formulas (1) and (2). The statistics θ_{v_j} is defined by the following formula:

$$\theta_{v_j} = \max_i v_{ij} - \min_i v_{ij}, \qquad (11)$$

The statistics θ_{z_j} can be defined by formula (4).

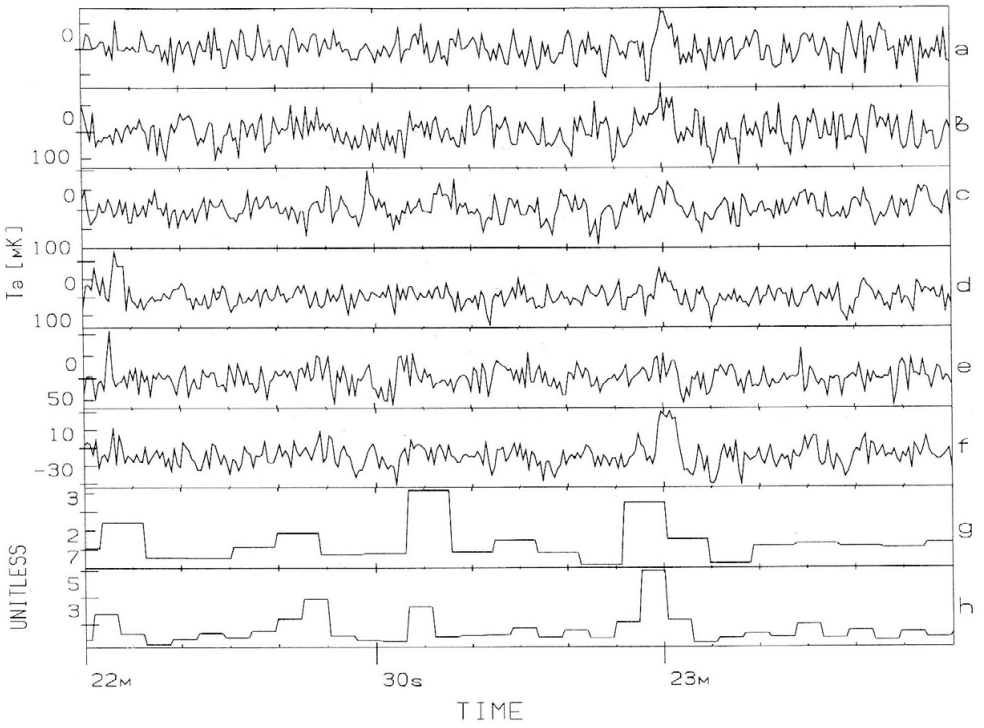


Fig. 5. Results of EMSD operation for the different input intervals: g – interval of two beam patterns, h – one beam pattern, for real data of five synchronous scans (a–e). To compare results the scan with robust average of these data is shown (f). The antenna temperature is for the first six scans, and ratio (5) is for the two last scans platted along the Y-axis.

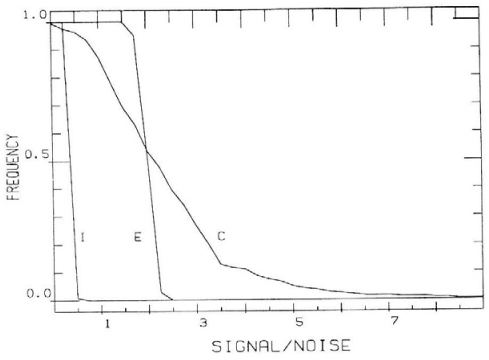


Fig. 6. False alarm probabilities vs the detection threshold for extremal-median (E), integral (I) and correlational (C) detectors.

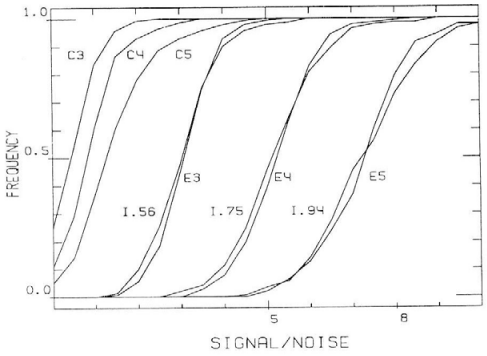


Fig. 7. Relationships between the true detection probabilities and the signal/noise ratios for the different detectors and detection thresholds. Symbols E, C and I show detector types (correspondingly EMSD, correlational and integral), numbers at the right of symbols show the detection thresholds.

Extremal statistics can be also applied to detection of "spotness" or image segmentation ([12]). Here the statistics θ_{v_j} is defined by formula (11), and the statistics θ_{z_j} is computed by the following formula:

$$\theta_{z_j} = \max_i z_{ij} - \min_i z_{ij}. \qquad (12)$$

BIBLIOGRAPHY

1. M. M. Davis, Bull. Astr. Inst. Netherlands **19**, 201 (1967).
2. Yu. N. Parijskij and D. V. Korolkov, in *Experiment Cold: the first deep survey with the RATAN-600 radio telescope*, Ed. by R. A. Syunyaev (Sov. Sci. Rev. E. Astrophys. Scapce Phys., Harwood Academic Publishers GmbH, Switzeland, 1986), 5, 39.
3. M. G. Mingaliev, O. V. Verkhodanov, A. R. Khabrakhmanov, et al., Soobshch. SAO **68**, 47 (1991).
4. V. L. Gorokhov and O. V. Verkhodanov, Prepr. SAO 89SPb (St. Petersburg branch, 1993).
5. V. L. Gorokhov and O. V. Verkhodanov, in *Reports thesis of the 26th radio astronomical Conference* (St. Petersburg, Institute of Applied Astronomy of RAS, 1995), 51.
6. E. Leman, *The Check of Statistical Hypotheses* (Nauka, Moscow, 1964) [in Russian].
7. V. L. Gorokhov and V. N. Prokofiev, Avtometria, Leningrad **6**, 36 (1982).
8. V. L. Gorokhov and O. V. Verkhodanov, Pis'ma Astron. Zh. **20**, 776 (1994).
9. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
10. E. B. Fomalont, in *A Collection of Lectures from the Third NRAO Synthesis Imaging Summer School*, Ed. by R. A. Perly, F. R. Schwab, and A. H. Bridle (Astronomical Society of Pacific, 1989), 213.
11. L. N. Ivanov, Astrofiz. Issled. (Izv. SAO) **11**, 213 (1979).
12. V. L. Gorokhov and A. A. Bursian, Izvestiya of Leningrad Electro-Technical Institute **426**, 36 (1990).

ON ONE ALGORITHM OF FITTING OF THE FUNCTION, PREASSIGNED BY TABLE, TO TABULAR DEFINED POINTS*

O. V. Verkhodanov[1]

[1]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia

An algorithm for selection of parameters on the basis of the sum of squares of discrepancies (squariance) minimization is described for tabular defined functions. Possibilities of application of the algorithm for some astrophysical problems are presented.

Keywords: data reduction: algorithms

1. INTRODUCTION

In applied astrophysics one often faces a problem of estimating shift, rotation, and scale parameters for a number measured quantities using a known tabular preassigned function. The problem can be formulated as one of selecting optimum configurations or considered to be a particular case of the transport problem. However, taking into account the very large number of elements (e.g. pixels in observational records) in the applied tasks a more simple and speedy approach in the selection of parameters would be favored. The most complicative aspect of the problem is the presence of noises making difficult the convergence of the method, for both the tabular preassigned function and the measured values.

To determine the parameters a variation of the least square method suggested to be used for the parameters determination, namely minimizing the sum of squares of discrepancies (squariance) between the measured values and values of the tabular preassigned function.

2. ALGORITHM DESCRIPTION

With no allowance for rotation (see below) the minimization will take the simplest form:

$$R = \min_{i,j,p} \sum_k \sum_l (f_{i+\Delta_k,\ j+\Delta_l} - c_p a_{k,l})^2, \qquad (1)$$

where f is the tabular preassigned function; a is the sample of measured values; c is the scaling factor; i,j ($i = i_{\min}$,$i_{\max}$; $j = j_{\min}$,$j_{\max}$) are the indices of the arguments of the function f; k,l ($k = k_{\min}$,$k_{\max}$; $k = k_{\min}$,$k_{\max}$) are the indices of the arguments of the measured values a; p ($p = p_{\min}$,$p_{\max}$) are the indices of the table of the values of the scaling factor c; Δ_k,Δ_l are the differences of indices of the function f arguments, corresponding to relative positions of arguments of the measured function a on the axes of the function f.

The limits of measurement of the parameters are chosen so as to reduce the number of operations being performed. It can be increased with the use of the iteration method. First the calculation steps are chosen sufficiently large: 5–10 % of difference of the limits of the function arguments and values. Then the steps are decreased 3–5 times untill the variation of R (formula (1)) is within a given ϵ.

2.1. Estimation of errors of parameter determinations

As was noted by Fomalont in [1], "error estimates which are obtained directly from most fits should be viewed with skepticism". Using σ as the post-fit r.m.s. error, we, however, can estimate parameters for most models approximately ([1]),
$\Delta C = \sigma$, scaling factor,
$\Delta l = \sigma\theta/2C$, position,
where
$\theta = \frac{1}{F}\sum(l_i - l)^2 a(l_i)$ is the width,
$l = \frac{1}{F}\sum l_i a(l_i)$ is the mean position,
$F = \sum a(l_i)$, and l_i is the argument of a.

*Bulletin of the Special Astrophysical Observatory, 1996. 41. P. 140

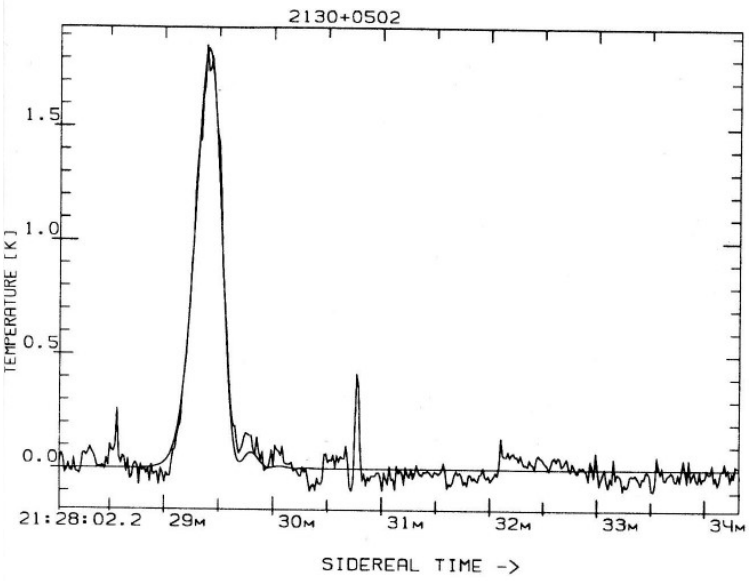


Fig. 1. Result of inscribing of the tabular preassigned function in the real record of the source passage through the RATAN-600 beam pattern. A wave length is 31 cm. There is a sidelobe on the right of the source.

Fig. 2. Result of points position definition for magnitudes, measured photometrically in four filters BVRI, at the spectral energy distribution (model of [5]).

3. EXAMPLES

Below examples of use of this algorithm are given for two completely different astrophysical problems.

In fig.1 an example is shown of inscribing the tabular preassigned radio telescope spread function, computed by Korzhavin in [2] method, in a real record of the source passage through the beam of RATAN-600. This function is operated in the flexible astronomical data processing system FADPS ([3,4]) at RATAN–600 (the procedure *beamap* – approximation with the antenna beam pattern). Using the method, described by formula (1), we can measure the position, amplitude and halfwidth with iterations. Taking into account that while fitting the calculated beam pattern to select the position, a step equal to the pixel size was used, to detect the position near the minimum R, the step was decreased by a factor of 3, the real records were interpolated. To estimate the most probable values of all parameters we made a parabolic approximation using 7 points near the minimum of R at each iteration step. An extremum of this parabola was used as a start point of the next iteration. The distinction of the algorithm in this case consists in that the beam pattern halfwidth, and hence its shape, changes as a parameter. That is done by the interpolation and reappropriation of pixel values. The desired accuracy of approximation (about 1–2%) is achieved after the second iteration.

The second example (fig. 2) demonstrates the determination of redshifts from the measured photometrical magnitudes by the selection of the position of these magnitudes on the curve of the spectral energy distribution for different models of ages of radio galaxies. This task is solved in estimation of photometric redshifts ([6, 7]).

In this example we defined the shift in the tabular preassigned curve. This task is one of the simplest for the proposed method because only one parameter is changed.

4. ADDITIONAL POSSIBILITIES

Another possible application of this method consists in algorithmization of the procedure of configuration selection of astrometric calibration using standard stars in the CCD frame. This can be done in the following manner. Consider, for example, 180 possible positions (via 1 degree depending on rotation angle) of a group of standard stars and project their corresponding vectors on the X axis. The predetermined positions of the frame objects are projected on the same axis. After that we pick up the projections with a minimum squariance using shift and scale variations for all the 180 projections. Near the minima that have been found the smaller steps are specified and the process is repeated untill a stable result is achieved.

BIBLIOGRAPHY

1. E. B. Fomalont, in *A Collection of Lectures from the Third NRAO Synthesis Imaging Summer School*, Ed. by R. A. Perly, F. R. Schwab, and A. H. Bridle (Astronomical Society of Pacific, 1989), 213.
2. A. N. Korzhavin, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **9**, 71 (1977).
3. O. V. Verkhodanov, Thesis (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 1993).
4. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
5. K. C. Chambers and S. Charlott, Astrophys. J. Lett. **348**, L1 (1990).
6. Y. N. Parijskij, N. S. Soboleva, W. M. Goss, et al., in *"The RATAN–600 – VLA – 6m Russian telescope EARLY UNIVERSE PROJECT", Proceed. of 175th IAU Symposium* (Italy, 1995).
7. Y. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).

RC J1148+0455 IDENTIFICATION: GRAVITATIONAL LENS OR GROUP OF GALAXIES?*

Oleg V. Verkhodanov[1], Alexander I. Kopylov[1], Yurij N. Parijskij[1], Natalia S. Soboleva[1], Olga P. Zhelenkova[1], Adelina V. Temirova[1], Joshua Winn[2], Andre Fletcher[2], Bernard Burke[2]

[1]Special Astrophysical Observatory, Nizhnij Arkhyz, Karachaj-Cherkesia, 369167, Russia
[2]Massachusetts Institute of Technology, USA

The structure of the radio source RC B1146+052 of the "Cold" catalogue is investigated by data of the MIT–GB–VLA survey at 4850 MHz. This source belongs to the steep spectrum radio sources subsample of the RC catalogue. Its spectral index is α = -1.04. The optical image of this source obtained with 6m telescope is analysed. The possible explanations of the complex structure of radio components are considered.

1. INTRODUCTION

Using RATAN–600 "Cold" catalog ([1]), we have selected steep spectrum sources having two-component structure of the FRII type ([2]). Among the "Cold" catalog we have mapped with VLA about 100 such objects. The majority of these objects is identified with elliptical galaxies up to 24–25^m R ([3,4]), which were observed with the 6m telescope of the Special astrophysical observatory by the program "Big Trio".

To understand a structure of the object we have used VLA observations from the MIT–GB survey ([5]), which crosses the "Cold" survey region. The detailed maps have been obtained for 69 objects of RC catalog using MIT–GB–VLA data ([6]).

In this paper we study a nature of the radio source RC B1146+052 (RC J1148+0455) of the "Cold" catalog using radio maps obtained in the MIT–GB–VLA survey showing a complex structure of components and 6m telescope data.

There were several explanations of the complex structure of radio components. One of them describes the Eastern components as a possible candidate to the gravitational lens ([7]). We have studied this problems in details.

*Oleg V. Verkhodanov, Alexander I. Kopylov, Yurij N. Parijskij, Natalia S. Soboleva, Olga P. Zhelenkova, Adelina V. Temirova, Joshua Winn, Andre Fletcher, Bernard Burke, RC J1148+0455 identification: gravitational lens or group of galaxies?, Astronomical and Astrophysical Transactions (`https://www.tandfonline.com/`), Volume 19, Issue 3-4, p.537-542, 2000.
DOI: `https://doi.org/10.1080/10556790008238599`.

2. RADIO DATA

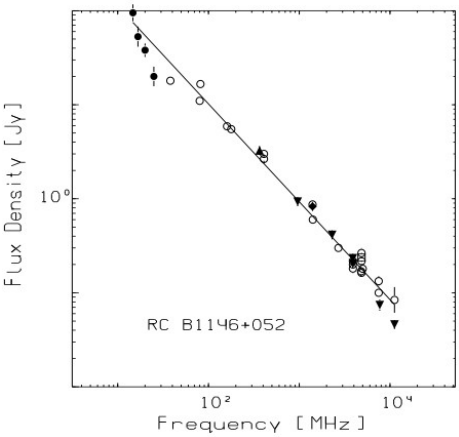


Fig. 1. Spectrum of radio source RC B1146+052 including UTR data ([8]), 4C data ([9]: object 4C+05.53) and Parks data ([10]). Spectrum has been prepared using data of the CATS database.

Using the CATS database ([11]) we have prepared a radio spectrum of the source. The spectral index α obtained with linear fitting by the least square method equals to –1.04 ($S \sim \nu^{\alpha}$). This allows us to classify this object as the ultra steep spectrum source.

To study a radio structure of RC B1146+052 we have used the VLA survey data archived in the Massachusetts Institute of Technology. A resolution of the image is $0''.5$ at 4850 MHz in A-configuration.

The component A (fig. 3 and 4) has a curved struc-

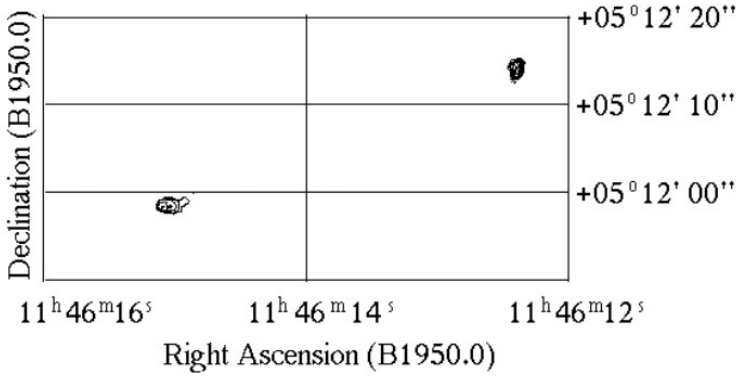


Fig. 2. Two component structure of the object RC B1146+052. A component (Western) is on the right, a component B (Eastern) is on the left.

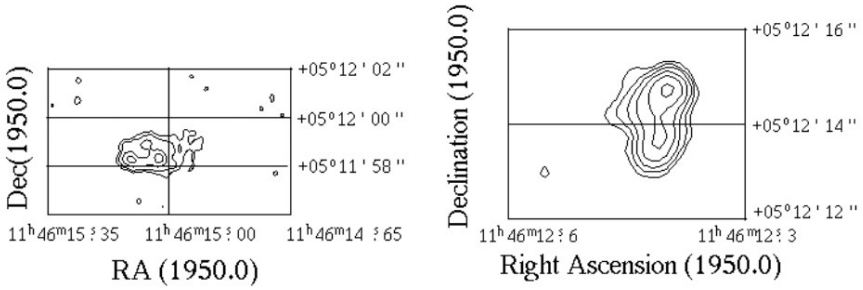


Fig. 3. A components structure (from right to left: A and B) of RC B1146+052.

ture and been classified earlier ([1, 12]) as a double independent radio source. The component B has a complex structure with 3 maxima. If this component is a separate source and taking into account its complex structure it is possible to consider it a candidate to the gravitational lensed source ([7]). The coordinates of the both component maxima at 4850 MHz are given in table 1. The distance between components is 43″.

3. OPTICAL IDENTIFICATION

In fig. 4 are plotted contours of the radio source RC B1146+052 by the MIT–GB–VLA survey and NVSS survey overlaid on the 6m telescope image in R–filter.

A group of 8 galaxies lies near the center of the NVSS source. The brightness one of them lies on an axis connecting both components. It has a magnitude of $23^{m}.2 \pm 0^{m}.2$ in the R–filter within an aperture of 3". Some characteristics of this group galaxies are given in table 2.

4. DISCUSSION

Using all the data discussed above we conclude that the radio source RC B1146+052 can not be a result of two blending objects, but it has a type of FRII. In this case, the parent galaxy, apparently, belongs to the group of galaxies. The curved form of the A component can be explained as a result of interaction with the gaseous environment, and a form of the B component can be explained in the frames of the jet rotation hypothesis or also as a result of interaction with the gaseous environment as in Cygnus A.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported in part by Russian Foundation of Basic Research (grants NN 99-07-90334 and 99-02-17114), and by the Federal Programs "Astronomy" (grants 1.2.1.2 and 1.2.2.4), and "Integration" (grant No 578).

Table 1. Positions and flux densities at 4850 MHz of components of RC B1146+052, by the MIT-GB-VLA survey data.

radio component	$\alpha + \delta(B1950.0)$	$\alpha + \delta(J2000.0)$	S_{peak} mJy/beam	S_{int} mJy
A	114612.38+051214.8	114846.48+045534.2	28.4	166
B	114615.07+051158.6	114849.16+045517.9		96
B2	114615.03+051158.4	114849.12+045517.8	5.7	
B1	114615.06+051158.9	114849.16+045518.3	4.3	
B3	114615.10+051158.3	114849.19+045517.7	6.2	
A+B data	114613.37+051207.6	114847.46+045527.0		263

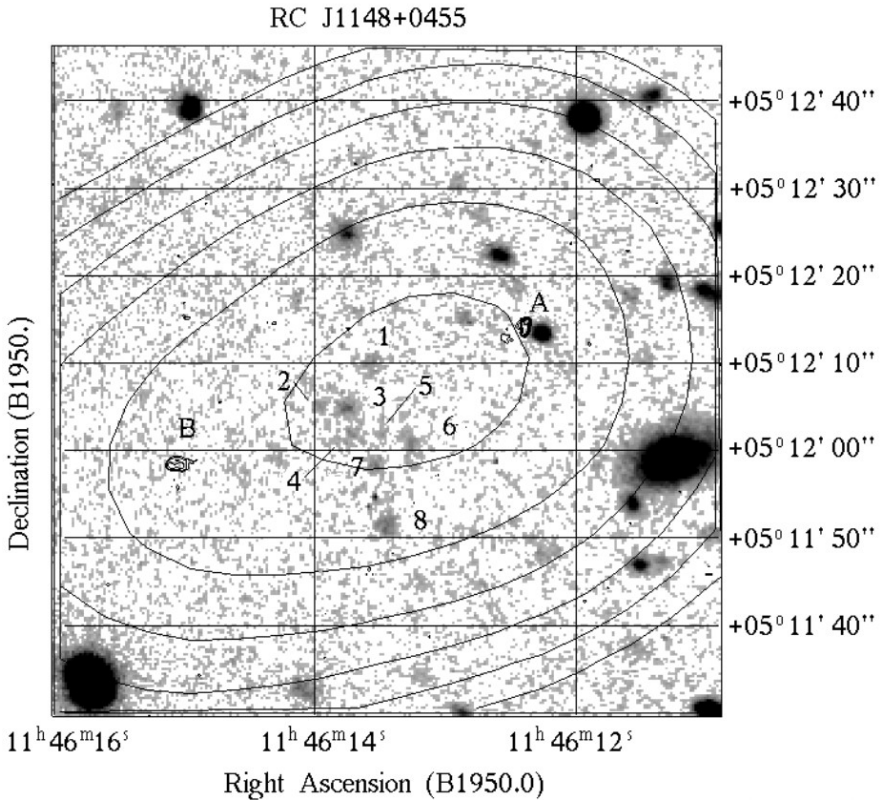


Fig. 4. MIT–GB–VLA survey contours (A and B) of RC B1146+052 at 4885 MHz (from the level of 1 mJy with factor 2) and NVSS contours at 1400 MHz (from the level of 80 mJy with factor 2) overlaid on the 6m telescope R–image.

Table 2. Coordinates and magnitude of galaxies in the group

Number	$\alpha(B1950.0)$	$\delta(B1950.0)$	R-mag
1	11 46 13.58	+5 12 10.2	23.8
2	11 46 13.96	+5 12 05.3	24.3
3	11 46 13.77	+5 12 04.9	23.2
4	11 46 13.73	+5 12 01.9	23.7
5	11 46 13.48	+5 12 01.9	24.4
6	11 46 13.27	+5 12 00.1	23.7
7	11 46 13.55	+5 11 58.3	23.6
8	11 46 13.45	+5 11 51.7	23.1

BIBLIOGRAPHY

1. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).
2. B. L. Fanaroff and J. M. Riley, Mon. Not. R. Astron. Soc. **167**, 31 (1974).
3. A. I. Kopylov, V. M. Goss, Yu. N. Parijskij, et al., Astron. Zh. **72**, 613 (1995).
4. Yu. N. Pariskij, V. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Astron. Zh. **75**, 483 (1998).
5. C. Bennett, B. Burke, J. Hewitt, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **61**, 1 (1986).
6. A. Fletcher, S. Conner, F. Crawford, et al., Astron. Zh. **73**, 835 (1996).
7. A. Fletcher, Ph.D. thesis (Massachusetts Inst. of Tech, Boston, USA, 1998).
8. S. Ia. Braude, A. V. Megn, K. P. Sokolov, and N. K. Sharykin, Astrophys. J., Suppl. Ser. **64**, 127 (1979).
9. J. D. H. Pilkington and P. F. Scott, Mem. Roy. Astron. Soc. **69**, 183 (1965).
10. R. E. Otrupcek and A. E. Wright, Proc. Astron. Soc. of Australia **9:1**, 170 (PKSCAT90) (1991).
11. O. Verkhodanov, H. Andernach, N. V. Verkhodanova, and N. Loiseau, in *Proc. "Observational Cosmology with the New Radio Survey"*, Ed. by M. Bremer, N. Jackson, and I. P'erez-Fournon (Kluwer Acad. Publ, 1998), 226, p.255.
12. C. W. Lawrence, C. L. Bennett, J. N. Hewitt, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **61**, 105 (1986).

THE SOFTWARE SYSTEM "EVOLUTION OF RADIO GALAXIES"*

Oleg V. Verkhodanov[1], Alexander I. Kopylov[1], Olga P. Zhelenkova[1], Natalia V. Verkhodanova[1], Vladimir. N. Chernenkov[1], Yurij N. Parijskij[1], Natalia S. Soboleva[2], Adelina V. Temirova[2]

[1]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia
[2]St. Petersburg Branch of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

The project of the informational system creation on the problem of evolution of radio galaxies is described. This system, being developed at present, will allow a user to operate with simulated curves of spectral energy distributions (SED) and to estimate ages and redshifts by photometrical data. Authors use SEDs of several models (GISSEL96 ([1]), PEGASE ([2]) and [3]) for different types of galaxies. Planned modes of access, formats of output result and additional functions are described.

1. INTRODUCTION

The last few years have changed our view on the evolution of galaxies: the most distant galaxies (i.e. systems having stellar population) have been found at z=6.68 ([4]) and radio galaxies at z=5.2 ([5]). Some of models suggests that galaxies can start their formation at z=17 ([6]). To understand deeper a situation with a stellar population of galaxies and to check various modern models it is very important to have a capability to detect correctly an age of galaxies.

The labour intensity of obtaining statistically significant high-quality data on distant and faint galaxies and radio galaxies forces one to look for simple indirect procedures in the determination of redshifts and other characteristics of these objects. With regard to radio galaxies, even photometric estimates turned out to be helpful and have so far been used ([7, 8]).

In the late 1980s and early 1990s it was shown that the color characteristics of galaxies can yield also the estimates of redshifts and ages for the stellar systems of the host galaxies. Numerous evolutionary models appeared with which observational data were compared to yield results strongly differed from one another ([9–12]).

Over the last few years the three models: PEGASE (Project de'Etude des Galaxies par Synthese Evolutive ([2])), [3], and GISSEL96 ([1]), have been extensively used, in which an attempt has been made to eliminate the shortcomings of the previous versions.

In the "Big Trio" experiment ([13]) we also attempted to apply these techniques to distant objects of the RC catalogue with ultra steep spectra (USS). Color data for nearly the whole basic sample of USS FR II ([14]) RC objects have been obtained with the 6 m telescope of SAO RAS.

To accelerate a procedure of age (and photometric redshift) estimation we have begun a project "Evolution of radio galaxies", supported by the Russian Foundation of Basic Research (grant No. 99-07-90334), which has to allow a user to obtain age and photometric redshift estimations.

2. DESCRIPTION OF A SYSTEM

This system, being developed at present, will allow a user to operate with simulated curves of spectral energy distributions (SED) to estimate ages and redshifts by photometral data. Authors use SEDs of three models:

- PEGASE ([2]),
- Poggianti ([3]),
- GISSEL96 ([1]),

*Oleg V. Verkhodanov, Alexander I. Kopylov, Olga P. Zhelenkova, Natalia V. Verkhodanova, Vladimir. N. Chernenkov, Yurij N. Parijskij, Natalia S. Soboleva,, Adelina V. Temirova, The software system "Evolution of radio calazies", Astronomical and Astrophysical Transactions (https://www.tandfonline.com/), Volume 19, Issue 3-4, p.663-667, 2000.
DOI: https://doi.org/10.1080/10556790008238611.

for different types of galaxies.

The system will be situated on the special Web-server unifying various type resources, including specialized Internet protocol daemons (for the FTP, HTTP, e-mail support) and the designed software permitting a user to operate with the SED curves.

Requesting and filling in the standard HTML-forms a user will be able to select different types of curves or trust to do this to a computer by the χ^2 method. The input forms contain information about input filters or wavelengths and corresponding magnitudes.

There will be a possibility to detect the age of galaxies in two ways:

1) fixed (known) redshift;
2) variable (unknown) redshift. In this case the redshift will be estimated too.

The estimation of ages and redshifts iss performed by way of selection of the optimum location on the SED curves of the measured photometric points obtained when observing radio galaxies in different filters. We use the already computed table SED curves for different ages. The algorithm of selection of the optimum location of points on the curve consists briefly (for details see [15]) in the following: by shifting the points lengthwise and transverse the SED curve such a location was to be found at which the sum of the squares of the discrepancies was a minimum. Through moving over wavelengths and flux density along the SED curve we estimate the displacements of the points from the location of the given filter and then the best fitted positions were used to compute the redshift. From the whole collection of curves, we select the ones on which the sum of the squares of the discrepancies turned out to be minimal for the given observations of radio galaxies.

There will be a chance to use infrared maps for absorption estimates in a case when magnitudes are not corrected for absorption.

In order to take account of the absorption, we apply the maps (as FITS-files) from the paper "Maps of Dust IR Emission for Use in Estimation of Reddening and CMBR Foregrounds" ([16]). The conversion of stellar magnitudes to flux densities are performed by the formula (e.g. [17]):

$$S(Jy) = 10^{C-0.4m}.$$

Another possibilities are supposed to be supported in our system:

- sorted bibliographical collection of papers for different stages of radio galaxy evolution,
- archive of radio galaxies data in various wavelength ranges (both observed in Special astrophysical observatory and taken from Internet) and
- search for information about radio galaxies using the largest data bases NED, CATS, LEDA et al. Very close interaction with the CATS database ([15]), designed and situated in the SAO, is supposed in the radio sources identification.

The HTTP and e-mail access to the basic procedures is organized in this system. Special e-mail forms are prepared to reflect input flags of low level procedures.

FTP access is organized to give a user a possibility to obtain SEDs models recorded in separate files.

A result is supposed to be written in ASCII tables and PS-figures and can be sent to users.

An example of request execution, recorded in PS-files, is shown in fig.1 (see detailed description and application of this system in [18]).

BIBLIOGRAPHY

1. G. Bruzual and S. Charlot, Astrophys. J. **405**, 538 (1993).
2. M. Fioc and B. Rocca-Volmerange, Astron. Astrophys. **326**, 950 (1997).
3. B. M. Poggianti, Astron. Astrophys. **122**, 399 (1997).
4. H.-W. Chen, K. M. Lanzetta, S. Pascarelle, Nature **398**, 586 (1999).
5. W. van Breugel, C. De Breuck, S. A. Stanford, et al., (1999), astro-ph/990427.
6. H.-W. Chen, K. M. Lanzetta, S. Pascarelle, (1999), astro-ph/9907002.
7. P. J. McCarthy, Astron. Astrophys. **31**, 639 (1993).
8. C. R. Benn, J. Wall, M. Vigotti, and G. Grueff, Mon. Not. R. Astron. Soc. **235**, 46 (1989).
9. N. Arimoto and Y. Yoshii, Astron. Astrophys. **179**, 23 (1987).
10. K. Chambers and S. Charlot, Astrophys. J., Lett. **348**, L1 (1990).
11. S. Lilly, Mon. Not. R. Astron. Soc. **229**, 573 (1987).
12. S. Lilly, in *Evolution of the Universe*, Ed. by R. G. Kron (Astron. Soc. Pacific, 1990), pp.344.
13. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).
14. B. L. Fanaroff and J. M. Riley, Mon. Not. R. Astron. Soc. **167**, 31 (1974).
15. O. V. Verkhodanov O.V., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **41**, 149 (1996).

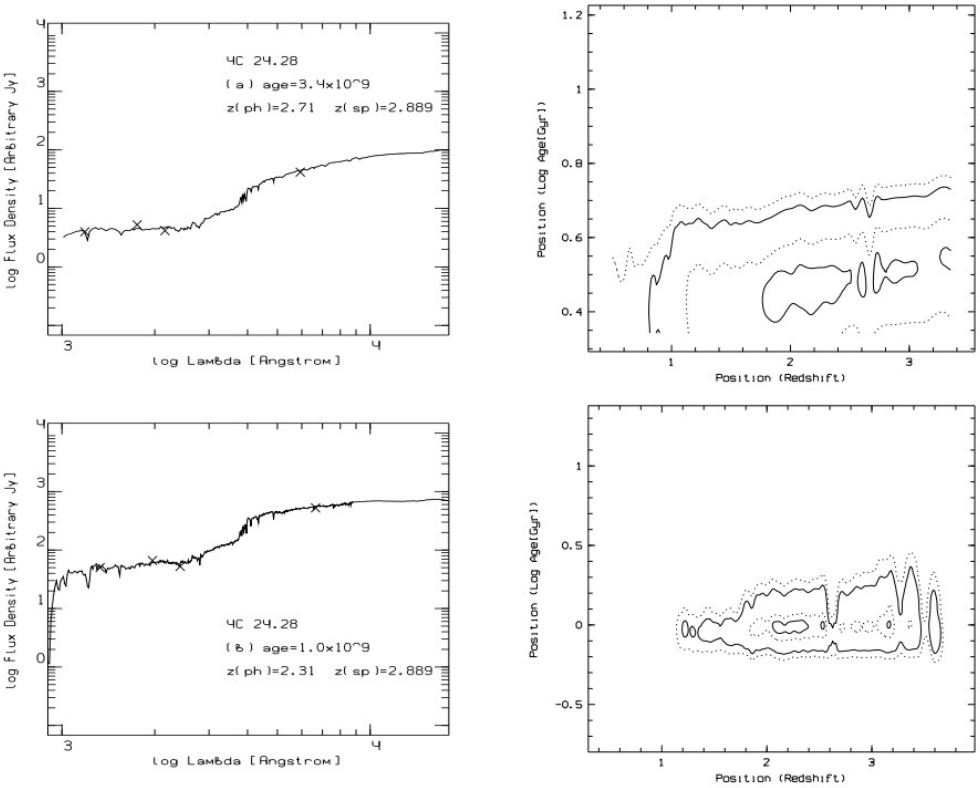


Fig. 1. Estimation of age and redshift for the 4C 24.28 radio galaxy in the models of Poggianti (a) and PEGASE (b). SED curves with photometric data marked with crosses are shwon on the left panels. Contours of likelihood functions vs redshift and log age are plotted at levels 0.6, 0.7, 0.9. 0.97 on the right panels.

16. D. Schlegel, D. Finkbeiner, and M. Davis, Astrophys. J. **500**, 525 (1998).
17. S. von Hoerner, in *Galactic and extragalctic radio astronomy* Ed. by G. L.Verschuur and K. I. Kellermann (Springer-Verlag, 1974).
18. O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **48**, 41 (1999), astro-ph/9910559.

STEEP-SPECTRUM UTR SOURCES IN FIRST SURVEY*

O. V. Verkhodanov[1], H. Andernach[2], N. V. Verkhodanova[1]

[1]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia
[2]Depto.de Astronomia, Apdo. Postal 144, Univ. Guanajuato, Guanajuato, Mexico

In an attempt to find further candidates for high-redshift radio galaxies, we searched the UTR-2 catalogue of decametric radio sources for steep-spectrum (SS) objects ($\alpha \leq -1.1, S \sim v^{\alpha}$). Radio counterparts and radio continuum spectra were prepared using the CATS database of radio source catalogues. High-resolution images of SS sources were extracted from the FIRST 1.4 GHa survey, yielding accurate positions and sizes for 43 SS sources. The search for optical counterparts from the APM (object) and DSS (image) databases, as well aa infrared and X-ray identifications of these UTR ourcesa re in progress. Two examples are shown.

Keywords: radio sources: continuum spectra — optical identification

The UTR catalogue of 1822 decametric radio sources ([1], `www.ira.kharkov.ua/UTR2`) covers about 30% of the sky north of -13°declination. It is presently the lowest-frequency source catalogue of its size, and provides an ideal basis to improve the poor optical identification content of sources selected at decametric frequencies. Verkhodanov in [2] described our goal to find radio-optical counterparts for all UTR sources, using the CATS database (`http://cats.sao.ru`, [3]).

We were able to fit spectra for all but 7 of the 2314 radio counterparts to the 1822 UTR sources. For 39% of these counterparts the best fit was a straight (S) spectrum, for 8% it was a convex (C^-) curve, and for 53% it was a concave (C^+) curve in the lg (frequency)-lg (flux) plot. In the hope of finding more examples of very distant radio galaxies, we concentrated on a subsample of 225 steep-spectrum (SS) sources with a straight spectrum of slope $\alpha \leq -1.1, S \sim v^{\alpha}$). To further increase the radio-positional accuracy for subsequent optical identification, we searched for radio counterparts of these 225 sources in the 1999 version of the FIRST catalogue (`http://sundog.stsci.edu/fir8t/cataZogs`) which yielded 43 FIRST counterparts.

The radio morphology for the 43 SS sources is as follows: 4 have jetted or complex structure, 22 are of FR-II type, 8 are compact, 7 slightly extended, and 2 are 'clumpy' sources. For some of the sources an optical identification is already known (see [4] for a few examples). In fig. 1 we present FIRST images of two previously unidentified UTR radio sources, both with a spectral index of $\alpha = -1.1$, overlaid on the second-epoch Digitized Sky Survey (DSS-2, `http://archive.stsci.ean/ass/dss-form.html`). In the low-resolution surveys 87GB, 6C and WENSS, the radio centroid of GR1256+56 is in between the two FIRST components shown in fig. 1. The optical object of the southernmost component appears to be located in a group of galaxies, and could be the parent galaxy (or QSO) of a source with a long radio tail extending towards the north. Alternatively, it could be a classical double of FRII type with outer hot spots and a steep-spectrum bridge. In this case, the optical identification requires the detection of a radio core. With its largest angular size of 2 arcmin, it would then be a giant radio galaxy. GR1713+54 (fig. 1, 4C+54.36) is centered on an uncatalogued galaxy, which shows diffuse optical emission along the radio axis, and appears to be a member of a group of galaxies. No redshift is known for either of the two sources.

For the optical identification of the other sources we are employing available resources like object catalogues from APM (`http://wwur.ast.cam.ac.nk/~apmcat`) and COSMOS ([5]) as well as the image archive of DSS-2.

BIBLIOGRAPHY

1. S. Ya. Braude, K. P. Sokolov, and S. M. Zakcharenko, Astrophys. J., Suppl. Ser. **213**, 1 (1994).

*O. V. Verkhodanov, H. Andernach, N. V. Verkhodanova, Steep-spectrum UTR sources in first survey, Astronomical and Astrophysical Transactions (`https://www.tandfonline.com/`), Volume 20, Issue 2, p.321-322, 2001. DOI:`https://doi.org/10.1080/10556790108229719`.

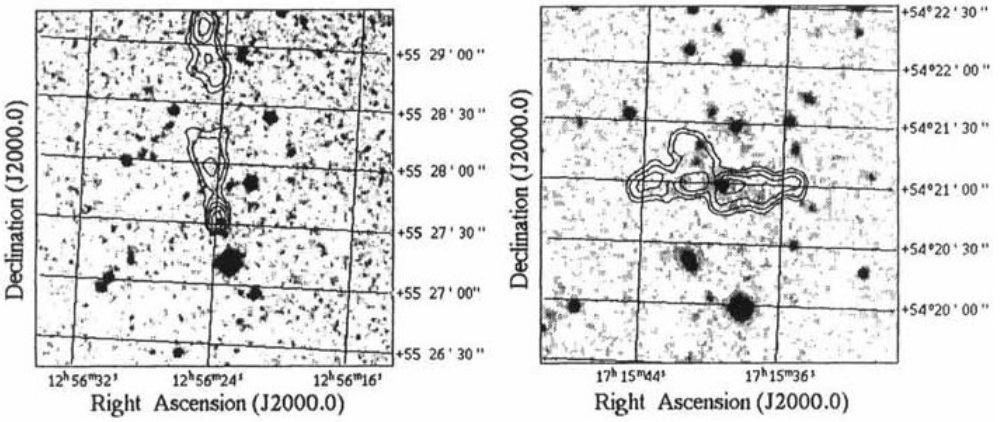


Fig. 1. Examples of FIRST maps of the multicomponent objects GR1256+56 (left) and GR1713+54 (right) overlaid on DSS-2 images. See the text for comments on these sources.

2. O. V. Verkhodanov, H. Andernach, and N. V. Verkhodanova, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **49**, 53 (2000).
3. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne. (ASP Conference Series, 1997), Vol. 125, p.322.
4. H. Andernach, O. V. Verkhodanov, and N. V. Verkhodanova, in *The Universe at Low Radio Frequencies, IAU Symp.*, Ed. by Pramesh Rao, et al. (ASP, San Francisco, 2001), p. 199, astro-ph/0001473.
5. M. J. Drinkwater, D. G. Barnes, and S. L. Ellison, Publ. Astron. Soc. Aust. **12**, 248 (1995).

PROBLEMS OF OBSERVATIONAL RADIO COSMOLOGY. REWVIEW*

O. V. Verkhodanov[1], Yu. N. Parijskij[1]

[1]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia

This review considers the problems of observational radio cosmology which can be solved by radio astronomy techniques. Main historical facts of development of radio cosmology all over the world associated with the discovery and investigation of the relic radiation and radio galaxies are presented. Examples of estimates of cosmological parameters from the data of radio-astronomical observations are given. The role of RATAN-600 in these fields is outlined.

Keywords: cosmology: observations, osmological parameters, cosmic microwave background, radio galaxies, quasars

1. INTRODUCTION

The term "radio cosmology" was introduced in the early 90s of the previous century (for instance, the name of the project in the Federal Program "Astronomy"), which characterized a set of means and methods of investigation of the Universe. Observational radio cosmology as a field of astrophysics comprises the problems of measuring cosmological parameters by radio-astronomical methods. As a rule, these parameters are not measured directly, as, for instance, the Hubble constant, from observations of galaxies, they are derived by means of relationships obtained from observational data. These are characteristics of the relic radiation, counts of radio sources or the relation between the ages of formation of galaxies and the redshift.

Improvement of the quality of the observational experiment being made and numerical simulation of theoretical parameters make it possible to speak at present about precision cosmology ("precision cosmology" is the expression of M. Longair, Manchester, 1999). Both approaches demand high quality reduction of observational data, including cleaning from noises, estimation of parameters of the signal and its modeling. The data reduction has been upgraded together with the experiment quality improvement and with new understanding of what should be observed. This is an important part of development of observational radio cosmology.

Modern observational cosmology ([1]) is based on the radio astronomical methods and constrains cosmological parameters in the most important approach which is realized in the cosmic microwave background (CMB) physics. The term "radio cosmology" can be criticized. However, radio astronomy determines a set of methods to investigate the Universe in this wavelength range, which are not necessarily connected with the CMB. In the 70s of the previous century Longair ([2]) underlined three separate ways in which radio observations contributed to cosmology. These constituted the background radiation at meter and microwave ranges, radio evidence on the properties of intergalactic gas, and the space distribution and cosmological evolution of extragalactic radio sources and quasars.

Details of these ways were based on the study of the microwave background radiation, intergalactic gas, the radio source population, types of radio sources, models for extragalactic radio sources, radio-source counts, the $V/V_{\max}$ or "luminosity—volume" test, "redshift—magnitude" relation for quasars and radio sources, "the angular diameter—redshift" and "angular diameter—flux density" relations, the cosmological evolution of radio galaxies and quasars, and the relation between the cosmological evolution of quasars at optical and radio wavelengths.

A method for estimating the value of the Hubble constant and deriving the density parameter from observations of superluminous radio sources is described.

We shall consider below the cosmological tests allowing us to determine cosmological parameters by the radio astronomical methods mostly with CMB and radio galaxies and start from the history.

*Bulletin of the Special Astrophysical Observatory, 2003. 55. P. 67

Let us note that some hypotheses and test results were not confirmed later, however, they called for a new study of problems and directions of cosmology and we review them here too.

2. HISTORICAL INFORMATION

The given short review does not aspire to being a complete one, but still we will try to present the main stages of the development of investigations in the field of radio cosmology and modern cosmological tests in the problems connected with the nature of active galactic nuclei (AGN). AGN unification schemes and radio galaxy type dichotomy, jets, accretion disks and origin of black holes are not described here because they need a special review and are presented in details in [3,4]. A detailed description of physics of the magnetic fields, mechanisms of the synchrotron emission and hydrodynamics processes in radio galaxies is also given in the two books [5, 6].

2.1. Radio galaxies

The beginning of observational radio cosmology can be dated back to the moment of investigations of the first radio sources carried out by the groups headed by Bolton and Pawsey in Australia and Martin Ryle in England at the end of the 40s and the early 50s of the XX century [7]. At that time, after the introduction of a two-element interferometer ([8]) it was managed to make comparatively accurate measurements of coordinates of radio sources and identify the powerful radio source Cygnus A ([9]) with a peculiar galaxy (fig. 1).

The measurement of its redshift showed that the source is at a cosmological distance from us. This discovery was a distinguishing one not only for young radio astronomy, but for astrophysics as a whole, because, on the one hand, activity of extragalactic objects was found, and, on the other hand, it was shown that objects observed in the radio range may be much farther away than the visible ones. Apart from the radio galaxy Cygnus A, the coordinates were measured for the radio sources Virgo A and Centaurus A and they were identified with galaxies ([11]).

2.2. Interferometers

On the whole, the advance in radio astronomy is associated, first of all, with placing in service interferometers, when it became possible with the aid of several antennae to determine exact coordinates of a radio source, and with upgrading radio interferometric synthesis to define the structure of a radio source [12]. When the optical identification and the measured redshifts were available, this provided the key to the understanding of the problems of evolution of radio objects. Radio galaxies were found to have an extended structure and refer to the hugest structures in the Universe. At the same time the group of Ryle ([13, 14]) carried out the first radio surveys, which, along with the astrophysical problems of understanding the energy release inside objects, raised purely methodological problems associated with the procedures of object selection and confusion ([15]), which were also discussed by Soviet radio astronomers ([16]).

In the last 20 years, several radio interferometers started to operate and made it possible to solve many astrophysical problems, including detailed study of radio structure of extragalactic objects, their physical properties, radio source statistics and evolution. Among these radio telescopes is the Very Large Array (VLA, USA), one of the world's premier astronomical radio instruments, consisted of 27 radio antennae in a Y–shaped configuration and situated on the Plains of San Augustin 80 km west of Socorro, New Mexico. Each antenna is 25 meters in diameter. The data from the antennae are combined electronically to give the resulting resolution of an antenna 36 km across, and the sensitivity of a dish 130 meters in diameter.

The two largest radio surveys, most important for cosmology, were carried out at VLA. These are NVSS ([17]) with a resolution of $45''$ and sensitivity up to 2.5 mJy and FIRST ([18]) with a resolution of $5''$ and sensitivity up to 1 mJy.

A very long baseline interferometer (VLBI) operates using antennae all over the world and having a baseline equal to the Earth diameter. Two most famous VLBI interferometers but of smaller size study the milliarcsecond structure of radio galaxies in US and UK. A Very Long Baseline Array (VLBA, US) is a system of 10 radio telescopes controlled remotely from the Array Operations Center in Socorro, New Mexico. The antennae are spread across the United States from St. Croix in the Virgin Islands to Mauna Kea on the island of Hawaii, making it the world's largest dedicated, full-time astronomical instrument.

MERLIN (UK), operated by Jodrell Bank Observatory, is a Multi-Element Radio Linked Interferometer Network, an array of radio telescopes distributed around Great Britain with separations of up to 217 km. It operates at frequencies ranging from 151 MHz to 24 GHz. At 5 GHz, the resolution of MERLIN is better than 50 milliarcseconds, somewhat greater than that of the Hubble Space Telescope.

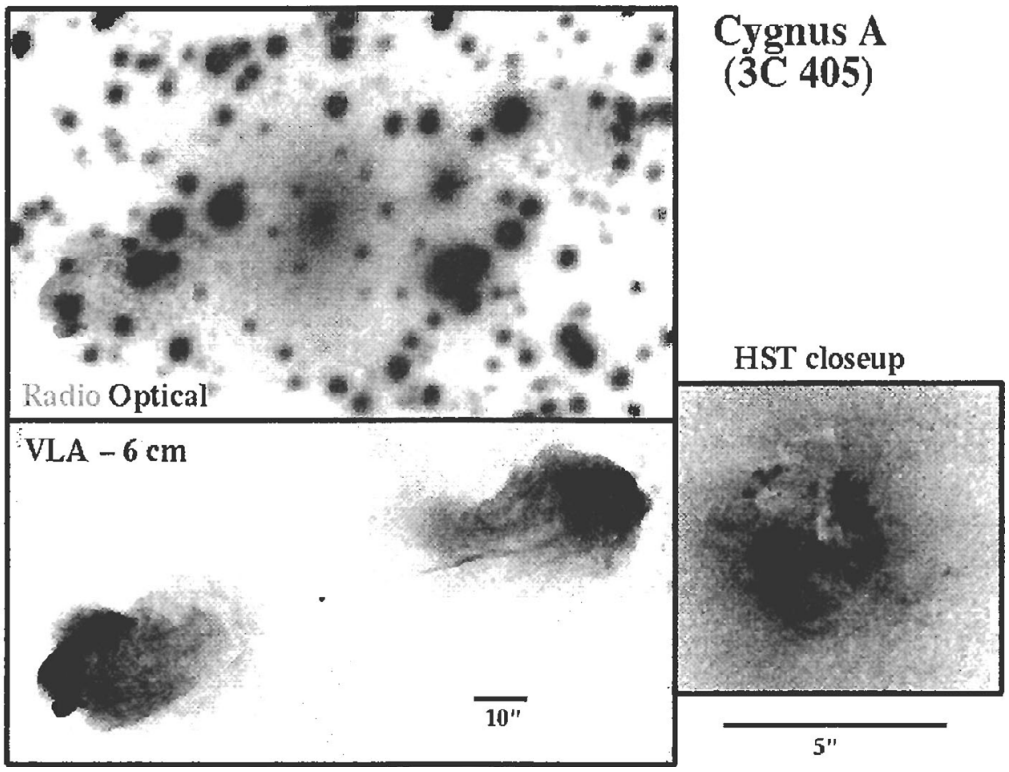


Fig. 1. Classical double radio galaxy Cygnus A. In the radio+optic image (top, left), radio emission is shown by the gray background. The figure is reproduced from [10].

2.3. Surveys

The first Cambridge surveys: 3C (3CRR) that contains a little fewer than 500 sources [14], and 4C comprising the number of objects 10 times as large ([19–21]) came to be examples of classical radio astronomical sky surveys. To be historically correct, the first surveys had been made a few years earlier. So, after the publication of the first Cambridge Catalog ([22]), which contained only 50 radio sources, the English radio astronomers made an attempt to compile a new more extensive catalog. New observations were performed at a frequency of 81.5 MHz with the aid of the radio telescope designed for this purpose, which consisted of four antennae shaped as a parabolic cylinder. Based on these observations, the Second Cambridge Catalog of radio sources (2C) was compiled ([23,24]), in which about 2000 northern sky radio sources were registered. However, it was found afterwards that many of the radio sources of this Catalog were false. This was due to the confusion effect mentioned above, when the radio telescope angular resolution was not sufficient for isolation of individual faint radio sources recorded at high sensitivity of the radio telescope (see the monograph [25] for a more detailed description of the surveys).

The surveys 3C and 4C made it possible to apply a powerful statistical tool when studying the evolution of extragalactic sources of radio emission ([26]). On the one hand, the study of 3C survey radio sources enabled the quasars, the most distant objects for that time, 3C273 ([27]) and 3C48 ([28]) to be discovered, and the first physical hypotheses of origin of their activity to be formed ([29,30]). On the other hand, the completeness of the surveys permitted the luminosity function of radio sources to be derived ([31,32]) and some cosmological parameters of the Universe to be determined ([33,34]).

Another important survey resulted in the Parkes radio source catalog ([35]) consisting of radio and optical data for 8263 radio sources. It covered almost all the sky south of declination +27 but excluded the Galactic Plane and the Magellanic Cloud regions. The latter zones are the subject of special surveys. The original Parkes radio catalog was compiled from major radio surveys with the Parkes radio telescope at frequencies of 408 MHz and 2700 MHz. The detailed

study of PKS radio source significantly increased the number of optically identified radio objects and allowed one to improve the luminosity function of radio AGNs.

Among other later surveys, one can mention GB6 (Green Bank 6: [36]) at 4.85 GHz up to 20 mJy, used for spectral analysis, statistics and study of radio source clustering ([37]), selection of objects being candidates to gravitationally lensed ones ([38]), PMN (Parkes–MIT–NRAO: [39–41]) at 4.85 GHz up to 20 mJy, which was the only one in the southern hemisphere for a long time used for spectral analysis and widely for the gravitational lens (GL) search ([42]), NVSS (VLA: [17]) covered the northern sky at 1.4 GHz and used in radio astronomy as a Palomar Sky Survey in optics, and FIRST (VLA: [18]) at 1.4 GHz. These two surveys, being the most sensitive and complete on the large sky areas, are the most important in all the modern researches connected with the radio source identification, preparation of continuous radio spectra, analysis of structure, source statistics and clustering. Another important radio survey is WENSS (Westerbork Northern Sky Survey: [43]) at 325 MHz up to 18 mJy carried out in the Netherlands and actively used in search for distant radio galaxies and galaxy clusters ([44]). All these surveys are very important in radio spectrum preparation because they have high sensitivity and cover wide bands of radio spectrum. This permits one to analyze the statistics of radio spectra and prepare samples by various spectral index criteria.

2.4. Quasars

Besides the finished optical identification and classification of radio sources in the 3-rd Cambridge Catalog, one of the most important points of the 3C catalog is the discovery of the first quasars 3C 273 and 3C 48, the most powerful sources in the Universe known at that time.

The identification of the 3C 273 and 3C 48 radio sources and the measurement of their redshift ([27, 28]) showed that these are the most visible objects in the Universe. The idea that the quasi-stellar objects emit energy up to 10^{47} ergs/s turned out to be true, despite the discrepancy of the cosmological interpretation of the quasars for the moment of their discovery.

The activity of a quasar is connected with the supermassive black hole and accretion disk (see reviews by [3, 4]). Collimated particles form a jet visible at radio and sometimes at optical wavelengths as for 3C 273 (fig. 2)[1].

[1] Herman-Josef Roeser provided copies of his HST images of the jet and the ground-based image from the ESO New Technology Telescope (NTT) at La Silla, Chile. The jet image used WFPC2 and a near-IR I band filter, while the NTT image is a red-light exposure. See also [46].

Such a hyperactivity of quasars and radio galaxies allowed one to use them for study of young galaxies and their evolution and intergalactic medium (IGM). The IGM and objects looking like young galaxies or their ancestors were already in place at expansion factor $z + 1 \sim 6$ ([1]). This tells us that the structure formation processes in operation at smaller expansion factors had to have worked with material that already was strongly distributed by what happened earlier. Studying such a phenomena observed as narrow absorption lines, [47] and [48] suggested that most are caused by Lα scattering in low density clouds along the line of sight between us and quasar. Observations showed ([1]) that the structure formation was well advanced when the Universe was just one–sixth of its present size, at the highest presently observed quasar redshifts.

Another possibility for using quasars for cosmological tests is a search for instability or cosmological variation of the basic physical constants, e.g. fine–structure constant α. Comparison of absorption lines of both the atomic hydrogen and molecular gas carried out by [49,50] showed that $|\dot{\alpha}/\alpha| < 5 \cdot 10^{-16}\mathrm{yr}^{-1}$.

The number of quasars increased significantly (tens of thousands of such type objects are known now) after identification and investigation of PKS, GB6, PMN, NVSS and FIRST sources, especially in connection with the new data of Sloan Digital Sky Survey ([51]).

2.5. Counts of sources

The results of the first radio surveys and counts of sources (plotting of the curve $\log N - \log S$ — the relationship between the number of sources and the flux density) caused a great deal of discussion concerning the interpretation of the obtained data, namely, whether the Universe is time-evolving or not ([52–55]). The properties of the curve and the presence of the cutoff in the distribution of the identified radio sources even at $z = 4$ allowed estimates to be made of the moment of formation of the first galaxies and radio sources in an expanding evolving Universe ([31]). Using the source counts demonstrated conclusively ([31,34]) the dependence of the radio–AGN evolution on radio luminosity: at redshifts > 1 the most powerful radio sources showed space–density enhancements by factors of $> 10^3$ over present–day densities, whereas the less powerful sources showed little or no enhancement.

Study of density distribution of quasars even suggested an idea on possible existence of a non-zero Λ-

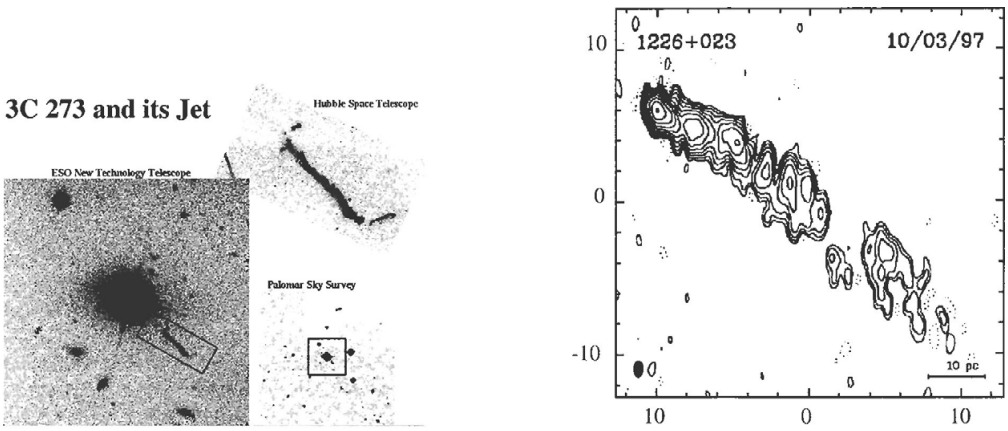


Fig. 2. Optical (left) and VLBA milliarcsec radio (right) images ([10] and [45], repectively) of the 3C 273 object, being the first quasar identified.

term ([56]). Despite the fact that this work did not take into account selection effects it aroused new interest in the Λ–term ideology (see e.g. [57]) which became later standard and confirmed by different type observations (Type–Ia Supernovae: [58], CMB: [59]).

2.6. Cosmic Microwave Background radiation

However, it is very likely that the most impressive discovery in the history of radio astronomy was the detection by Penzias and Wilson [60] of the cosmic microwave background (CMB) radiation with a temperature of 2.7 K which had been predicted by Gamov [61] in the 40s. The term "relic emission" (RE) widely used in Russian was suggested by I.S. Shklovskij. The history of studying the CMB has already become a classical example of formation of the present-day observational cosmology as a whole ([62]). Despite Gamov's prediction, the possibility of observing the CMB radiation was almost not discussed since its separation from the general set of emissions was thought to be impossible at that time. The reality of observing this emission in the short-wave region of the radio spectrum, where the contribution of radio sources is less, was reported by Doroshkevich and Novikov ([63]) who had made a prediction on a blackbody spectrum of the CMB radiation a year before it was detected, preceding from the assumption of a "hot" early Universe. The detection of this emission was one of the most significant events of the XX century not only in astrophysics but also in natural sciences on the whole. It became clear that the theory of the hot Universe was corroborated, and this opened up a new way in modern cosmology. It is interesting to emphasize that the actual advance of cosmology at the early stage of its development took place when experimental radio astronomy was consistent to advantage with theoretical astrophysics as it happened with the CMB radiation, when B. Berk recommended Penzias and Wilson (see [7]), after they reported on the uniform unremovable high-frequency radio emission, to address theorists Dicke and Peebles who were preparing an experiment on observation of this emission ([64]). In the former Soviet Union this emission was observed by Shmaonov from the group of S.Eh. Khaikin in Pulkovo as early as the 1950s, but his discovery was not attached great importance to at that time ([65]).

At the present time, the data on the CMB radiation is likely to be the most important in the procedure of obtaining cosmological parameters.

3. DETERMINATION OF COSMOLOGICAL PARAMETERS

Which cosmological parameters can possibly be determined by radio astronomical techniques?

Beginning this section with the relic emission, it will be recalled that the Universe became transparent for radiation after the hydrogen recombination, about 380000 years after the beginning of expansion. It is exactly that time that angular temperature variations of the CMB radiation described in the literature by the power spectrum refer to. Several processes could make a contribution to formation of these fluctuations. So, Sachs and Wolfe in [66] predicted that the fluctuations of primeval curvature must exist on the scales of the horizon (of order 1000 Mpc) giving rise to fluctuations on larger angular scales with an amplitude of about one per cent.

The development of cosmological notions, in particular the inflation theory, predicted the presence of adiabatic, Gaussian fluctuations which changed from quantum fluctuations to macroscopic scales at the early de Setter phase ([67,68]). A simple supposition based on adiabatic fluctuations provided the possibility for galaxies and clusters to form at the current epoch at $\delta T/T$ of a few ten-thousandth on scales of a few angular minutes ([69]). If the recombination occurred instantaneously, then the value of fluctuations ought to be $\delta T/T \sim \frac{1}{3}\delta\rho/\rho$. The modern predictions yield the level of fluctuations an order of magnitude lower, in particular, because they provide for the non-instantaneous character of the recombination and the presence of "cold" dark matter. The present-day theories predict also the existence of coherent peaks of emission caused by compression and rarefaction of sound waves in the primeval plasma and manifesting themselves in the power spectrum of the RE ([70]) and also by recombination of the primeval photon-barion plasma ([71]). The idea of acoustic peak generation belonged to A.D. Sakharov ([72]) and the process of formation of density peaks is called sometimes in the current literature "Sakharov oscillations". Thus, the conditions of formation of the CMB and therefore the cosmological parameters defining them were "inprinted" in the power spectrum of this emission (see figs. 3 and 4), and actually defined the current state of the Universe, which made it possible to compare them with the genetic code ([73]).

A great number of experiments were carried out for CMB measurements. The latest ones CBI ([74]), ACBAR ([75]) and WMAP ([59]) allowed estimation of the power spectrum up to $l = 2500$.

The power spectrum of the CMB radiation variations $C(\ell)$ (fig. 4), where l, multipole, is the value inversely proportional to the angular scale, can be described as a functional depending on cosmological parameters ([62]),

$$C_\ell \equiv C_\ell(h,\Omega_b h^2,\Omega_{\rm CDM} h^2,\Omega_\Lambda,\Omega_\nu,n,...),$$

where

$$C_\ell = \frac{1}{2\ell+1}\left[|a_0|^2 + 2\sum_{m=1}^{\ell}|a_{\ell,m}|^2\right]$$

and the complex $a_{\ell,m}$-s are defined as coefficients in expansion of sky temperature fluctuations $\Delta T(\theta,\phi)$ on spherical functions $Y_{\ell,m}$:

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

Among the parameters of the functional are shown the Hubble constant, $h = H_0/100\,{\rm km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}}$, the barion matter density Ω_b, the hidden mass density $\Omega_{\rm CDM}$, the "dark energy" density Ω_Λ, the density of massive neutrino Ω_ν, the index of the power spectrum of adiabatic perturbations n and other parameters. The up-to-date derived values of the main parameters (the data of the WMAP experiment ([59]) in conjunction with the CBI ([74]), ACBAR ([75]) and 2dF ([76])) are as follows: the Hubble constant $h = 0.71^{-0.03}_{+0.04}$, the matter density $\Omega_m = 0.27 \pm 0.04$, the barion density $\Omega_b = 0.044 \pm 0.004$, the total energy density $\Omega_0 = 1.02 \pm 0.02$, equation of state of the dark matter $w < -0.78$ (95% confidence level), age of the Universe $t_0 = 13.7 \pm 0.2$ Gyr, the spectral index at $k = 0.05\,{\rm Mpc^{-1}}$ $n_s = 0.93 \pm 0.03$ $\Omega_\nu h^2 < 0.0076$ (95% confidence level), which yields a neutrino mass limit of 0.23 eV. The minimization of this functional is practically automated now and can be realized by the software program *CMBFast* ([77]), calculating smoothed power spectrum of CMB radiation by the given cosmological parameters.

Speaking about the fluctuations of the relic emission, one cannot but mention the Syunyaev–Zeldovich effect (SZ) ([78], [79]) caused by the inverse Compton scattering of the RE photons on the hot gas electrons inside galaxy clusters. The effect manifests itself in lowering of the temperature of the RE ($\sim 0.5\mu$ K) in the Rayleigh–Jeans spectrum region towards the cluster. The SZ effect can be used (see review of [80]) to determine the Hubble constant ($H_0 = 60 \pm 10\,{\rm km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$, [81]) and the barion matter density Ω_m ($\Omega_m \sim 0.23^{+0.06}_{-0.04}$, [82]).

Another set of cosmological tests can be based on investigations of **radio galaxies**. The first identifications of radio galaxies showed that they are identified with giant elliptical galaxies which are the brightest ones in the clusters of galaxies (see, for instance, [83] or the review on elliptical galaxies of Rogstad and Ekers ([84]). The so-called diagram "K-value—redshift" (see fig. 5) is also evidence in support of this. The infrared data (in the K-band) show that up to the redshifts $z \sim 1$, when changing to the system of counts of galaxies and using the comparison with stellar photometry, there exists an approximately constant fraction of red giants in the stellar population. This gives occasion to state that these galaxies, being already rather old at $z \sim 1$, formed more or less at one epoch and evolved in a passive manner. The data of identifications and statistics are consistent with the evolution of standard elliptical galaxies formed at the early epoch, with which radio sources are identified.

This fact and also the presence of the steep spectrum and the morphological class FR II permit selection of such radio sources as objects for cosmological studies and widely used in such investigations ([86,87]). Selection of the distant objects by the steep spectrum is one of the simplest but strongest factors in the search for candidates for distant radio sources.

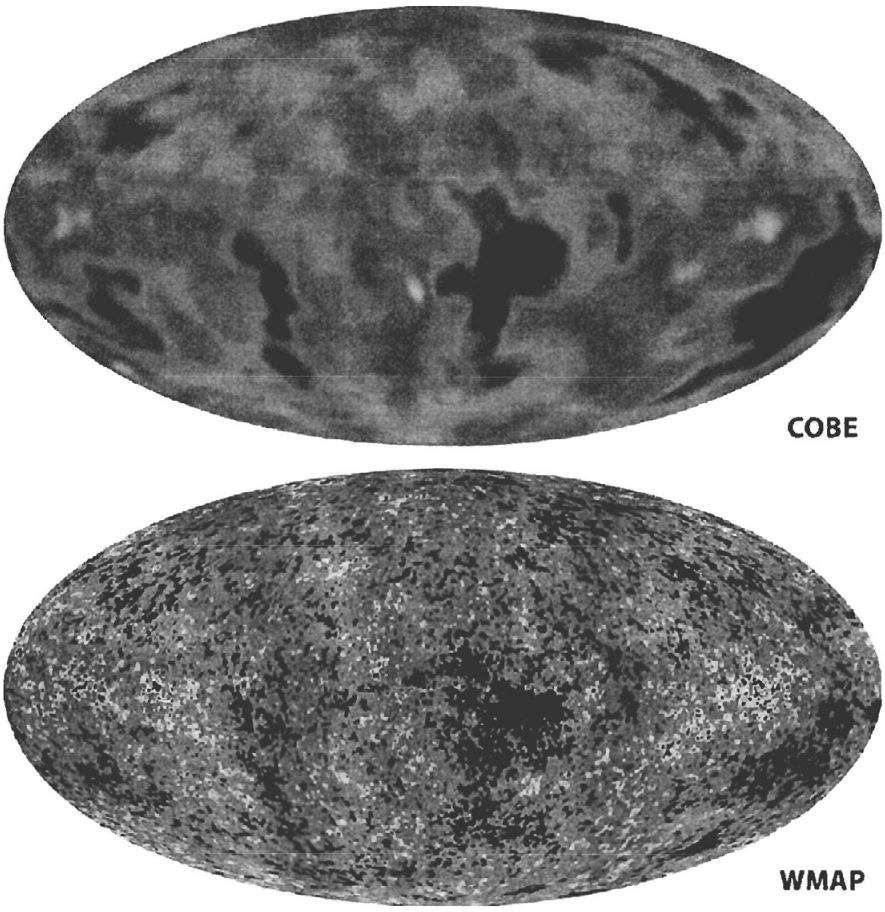


Fig. 3. A map of fluctuations (fair and dark spots) of the microwave emission from the data of COBE (top) and WMAP (bottom) satellites. Scale (angular size) of fluctuations determines corresponding spherical harmonics (multipoles), intensity corresponds to amplitude. The figure is reproduced from the paper by Spergel et al. ([59]), `http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/map_bibliography.html`.

This factor was detected independently in several papers devoted to radio source identification and radio spectra statistics. Tielens et al. ([88]) detected that the fraction of sources with a very steep (spectral index $\alpha_{178}^{5000} < -1$) spectrum, which could be identified optically, decreased with decreasing α. Blumenthal and Miley ([89]), following this work of Tielens et al. ([88]) showed that the spectral index has a dependence of the properties of steep spectrum 3C and 4C radio sources on the apparent magnitude, redshifts, radio luminosity, and angular size for specified object samples. The detected correlation suggested that the steep spectrum sources were on average farther away and more luminous, and the origins of the redshifts of radiogalaxies and quasars were the same. Laing and Peacock ([90]) investigated the relation between radio spectrum and radio luminosity for samples of extragalactic radio sources selected at 178 and 2700 MHz. Spectra were derived for the extended regions of emission in these sources which were classified by morphological types. At low frequencies the degree of spectral curvature was found to be correlated with luminosity for sources with hot-spots. At high frequencies, the correlation between spectral index and luminosity was confirmed. They also confirmed existence of "the spectral index — redshift" relation which was constructed at 178 and 2700 MHz for FR II radio sources. The FR II radio sources, according to the classification of Fanaroff & Riley ([91]), have the separation between the points of peak intensity in the two lobes greater than half the largest size of the source (see classical FR II radio galaxy in fig. 1), and the FR I

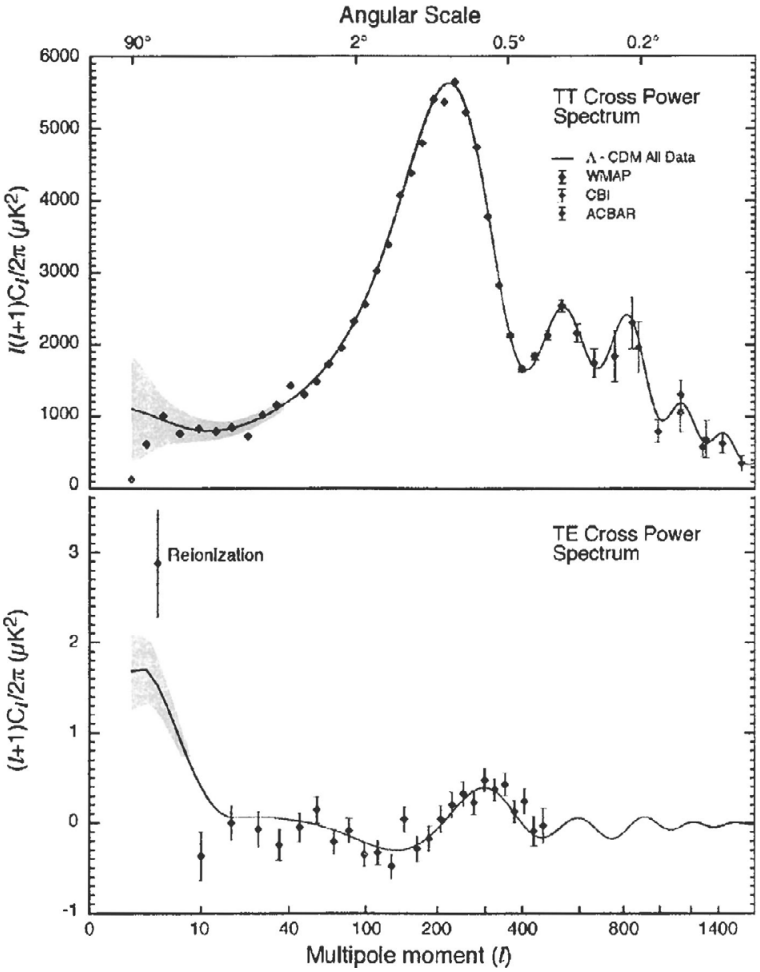


Fig. 4. The power spectrum of the CMB radiation produced from the data of the surveys WMAP, ACBAR, CBI, 2dF (top), and of the polarization emission from the data of WMAP (bottom). The figure is reproduced from [59]. Peaks corresponds to maxima in the spectrum variations and formed by acoustic generation ([72]). Positions, sizes and amplitudes of peaks are produced by the physical conditions of the Universe at the moment they were formed and can give the values of cosmological parameters. `http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/map_bibliography.html`.

sources (fig. 6) have this separation smaller than half the largest size of the source. Slee ([94]) studied spectra of approximately 2000 sources in the Culgoora–3 list of radio sources also independently detected a "radio power—spectral index relationship", and a linear dimension/spectral index correlation.

In connection with this problem, a study of steep spectrum sources at the near–infrared wavelengths was carried out by Lebofsky et al. ([95]) and Walsh et al. ([96]). Using infrared measurements of 18 empty–field radio sources, they had shown that the steep spectrum empty–field sample includes a large fraction of high redshift galaxies judging by their near–infrared colours.

The selection by the spectral index $\alpha < -1.0$ ($S \sim \alpha^{\nu}$), namely, the selection of radio galaxies as the most distant by the spectrum steepness (the farther the object the more likely it has a steep spectrum) is one of the first found and the strongest factors of search. In spite of the fact that this criterion works very successfully, the explanation of it is not conclusively clear even at the present time ([97]). One can isolate 3 main extensively used ideas of explaining this relationship ([97]): (1) a shift takes place in "cut-off" spectrum frequency towards low observed values with a factor $(1 + z)$, so the steep spectra are prefer-

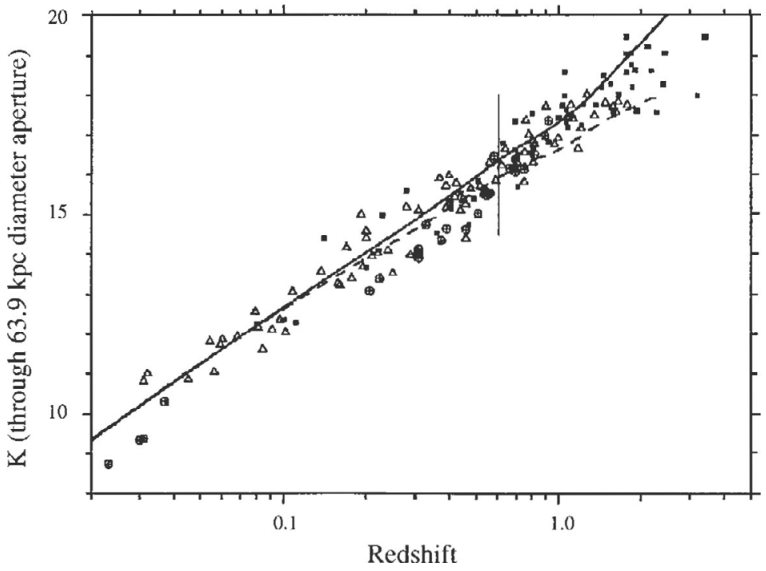


Fig. 5. Hubble diagram for the K-band for the radio sources from the 3CR catalog. The solid and dashed lines show evolution tracks for the non-evolved and passive evolved stellar population, respectively. Here are shown the 3CR radio galaxies by open triangles, 6C radio galaxies by filled squares and brightest cluster galaxies by crossed circles. The figure is taken from [85].

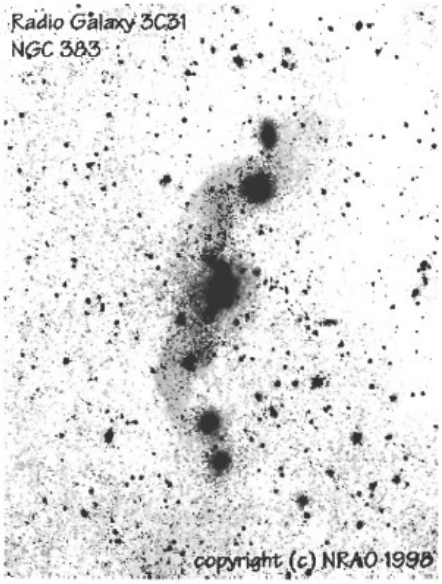


Fig. 6. FR I–type radio galaxy 3C 31. In the radio+optic image, radio emission is shown by the gray background. Two radio emitting jets are visible in the center of the figure near the optical counterpart. figure is reproduced from Bridle ([92]) (see also [93]).

ably observed at large redshifts; (2) a rise of losses is due to the Compton scattering of photons of the microwave background by relativistic electrons, since the radiation density grows as $(1+z)^4$; these rising losses lead to the aging of the population of electrons, which causes cutting or increasing the steepness of the high-energy part of the spectrum, where the losses are the greatest; (3) merely the selection effect: only bright sources are visible at large redshifts, and then one can suggest that it is exactly these sources that show the highest "exhaustion" in the high-energy part of the spectrum.

An example of a thus selected radio galaxy is a redshift record-holder radio galaxy having $z = 5.19$ and a spectral index $\alpha = -1.63$ ([98]).

An additional factor of selection of distant radio galaxies is their membership in a population of sources with moderate fluxes (from 5 to 100 mJy on the curve $\log N - \log S$) in the cm–dm wavelength range ([99]).

The selection of a radio source by the morphological type uses the observational fact that at large redshifts $z > 0.5$, it is most likely that galaxies of the type FR II ([91]) are detected, that is, with extended components whose brightness increases towards the edges with the appearance of "hot spots", than those of FR I type (the brightness increases towards the object centre) ([100]). This suggests that the FR I-type objects are older and, therefore, closer. There is, how-

ever, a great percentage of FR II-type galaxies which are comparatively close to us.

The remarkable thing about this simple criterion is that it correlates very closely with radio power: there is a break power of about 1025 $\mathrm{W\,Hz^{-1}sr^{-1}}$ below which nearly all double radio AGNs are FR Is, and above which nearly all are FR IIs. Owen and White ([101]) found that the break power actually increases with the optical luminosity of the host galaxy; taking this into account, the FR transition is extremely sharp.

In the study of radio galaxies it is significant that parent galaxies for them are giant elliptical galaxies which could be used ([94]) at the initial stage of selection as standard candles/rulers in cosmological investigations. Identification with elliptical galaxies is also important in tracing the evolution of stellar systems at large redshifts and in searching for distant groups of galaxies or protoclusters in the centre of which they are located, and in studying the processes of merging and interaction which may be indicated by the activity of their nuclei.

Another possibility of studying cosmological properties is construction of relations connected with the observable **size of radio galaxies**. For instance, by using the standard ratio for the relation "angular size θ — redshift z of a radio source" with the cosmological constant $\Lambda = 0$, Gurvits et al. ([102]) estimated the deceleration parameter $q_0 = -R\ddot{R}/\dot{R}$ (the scale factor $R(t)$ is determined as $r(t) = R(t)r(t_0)$, t_0 is the present moment of time and $R(t_0) = 1$) from the data of a sample of 330 objects with a redshift $0.011 \leq z \leq 4.72$:

$$D(z) = \frac{q_0 z + (q_0 - 1)(\mathrm{sqrt}(1 + 2q_0 z) - 1}{q_2^2(1_z)^2},$$

given

$$\theta \equiv l_m D^{-1}(z) \propto lhL^{\beta}(1+z)^n D^{-1}(z),$$

with four free parameters: the linear scale factor lh, deceleration parameter q_0 and two parameters bearing a relation to physics of compact regions radiating in the radio range β and n (n, in its turn, unites the dependences in the linear size on the cosmological evolution and on the radiating frequency, and also the expansion of the size due to the factors of propagation in the medium). Here are also introduced the metric size l_m, the angular size D, the source luminosity L. q_0, estimated in this cycle of the work, is equal to 0.21 ± 0.30. With allowance made for the Λ-term ([103]) for the same points, a limitation on the scalar field of dark energy $V(\phi) \propto \phi^{\alpha}, \alpha > 0$ is obtained, and (in the same paper) "these data are consistent (but not limited) with the data "redshift of supernovae of type Ia — stellar magnitude" ([104])".

Another more refined method of estimating cosmological parameters from the **dimensions of radio galaxies** uses the jet propagation velocity and, correspondingly, the velocity of growth of the radio source dimensions ([105]) for 70 objects. The main idea is that the size may be estimated as the medium size $\langle D \rangle$ of the full population of powerful extended radio galaxies at a given redshift or as the medium size D_* of a given source at a given redshift. If the total time during which the source ejects jets with a power L_j is t_*, the medium size of this source will be $D_* = v_L t_*$ under the assumption that the velocity of growth of the source v_L is approximately constant during its whole lifetime. The velocity v_L is estimated from the synchronous and inverse Compton mechanism of aging increasing with redshift. It is supposed that t_* decreases with increasing redshift, while the ratio $\langle D \rangle / D_*$ depends on the cosmologic parameters Ω_m and Ω_Λ (see for details therein and in [106]). With a 90% authenticity they show that $\Omega_m < 0.5$ and quintessence $-2.6 < w < -0.25$.

One of the most wonderful discoveries associated with the investigation of radio galaxies was the detection of gravitation lenses. Perhaps the most remarkable was the discovery of the first Einstein ring (fig. 7) when studying the radio galaxies of the MIT survey ([107]) at the radio telescope VLA.

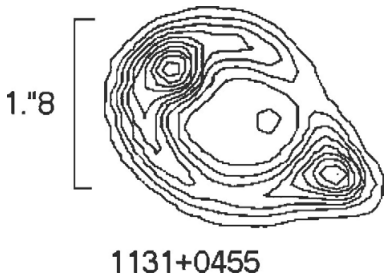


Fig. 7. The radio source MG 1131+0456 — gravitation lense of "Einstein ring" type. The figure is plotted from the data of the MIT–VLA survey ([107]) given kindly at our disposal by A. Fletcher and B. Berk. The figure is taken from [108].

The radio morphology of such a source shows a symmetric case of gravitation lensing in which the lensed source is extended into the ring. Obvious easiness in performing morphological selection is a comparatively high statistical probability of detection (if one considers, for instance, radio galaxies as the centres of clusters), which made it possible to work out the procedure of searching for these objects (the MIT survey ([107, 109]) or the completed survey CLASS — "Cosmic Lens All Sky Survey" ([110])). Search surveys of gravitation lenses are interesting, first of all, by cosmological application (for instance, [111]). In this

case, where a great array of statistical data is available, the estimation of cosmological parameters can be performed ([112]) by calculation of the probability $p(z,\Omega_m,\Omega_\Lambda)$ that a source of a redshift z is strongly lensed, and one can compute the number of lensed objects

$$N=\sum_i p(z_i,\Omega_m,\Omega_\Lambda)B(L_i,z_i)g(\Delta\theta,\Delta f)\equiv\sum_i \tau(z_i),$$

where $B(L_i,z_i)$ is the so called "magnification bias" ([111]) for a radio source at a redshift z with a luminosity L, $g(\Delta\theta,\Delta f)$ is a function of selection connected with a possibility of division of images $\Delta\theta$ and the flux ratio Δf of the components of strongly lensed sources, i is the index of the source in the sample. Plotting and minimizing the function of plausibility on the basis of the statistics of lensed radio sources, one can manage to estimate the difference of the parameters $\Omega_m-\Omega_\Lambda$, or, under the assumption of the scalar field, to estimate Ω_x-w, where in the equation of state $w=P_x/\rho_x$, P_x and ρ_x are the pressure and the density of the scalar field, repectively. The estimates made in the CLASS survey showed ([110]) that for a flat Universe with a classical cosmological constant the proportion of matter in relations to the critical density $\Omega_m=0.31^{+0.27}_{-0.14}$ ($68\%^{+0.12}_{-0.10}$), while for a flat Universe with the equation of state for dark matter $w<-0.55^{+0.18}_{-0.11}$ (68%).

One more important parameter that can be determined in observations is the galaxy age which, in turn, is associated with the age of the Universe t_0, simply it cannot be greater than the latter. Defining the age of the Universe as $t_0=\int dt/H(t)$ and $H(z)=H(z)/H_0$ and bearing in mind that

$$H_0\int\limits_0^{t_0}dt=\int\limits_0^{\infty}\frac{dz}{(1+z)h(z)}$$

obtain ([97]) that the age of the Universe is determined as

$$t_0=H_0^{-1}\int\limits_0^{\infty}\frac{dz}{(1+z)h(z)},$$

where (therein)

$$h(z)=[\Omega_R(1+z)^4+\Omega_m(1+z)^3-(\Omega_0-1)(1+z)^2+\Omega_\Lambda]^{1/2}$$

and Ω_R is the emission density, Ω_m is the energy density of "dark" and barion matter, Ω_Λ is the dark energy density, Ω_0 is the total energy density. The quantity τ can be found as a function of redshift, which is the difference between the age of the Universe t_0 and its age t_e for the moment of emission of the light that we see now:

$$\tau=t_0-t_e=H_0^{-1}\int\limits_0^{\infty}\frac{dz}{(1+z)h(z)}-H_0^{-1}\int\limits_z^{\infty}\frac{dz'}{(1+z')h(z')}.$$

The galaxy age permits the age of the Universe to be derived, since some time is needed for the formation of the galaxy itself after the Universe came into existence:

$$\mathrm{age}_{\mathrm{gal}}=t(z_{\mathrm{obs}})-t(z_c)+\alpha t(z_c),$$

where the parameter α characterizes the typical age of stars in fractions of the age of the Universe, i.e. the so-called epoch of collapse ([113, 114]). For elliptical galaxies at the present epoch, even only the relationship "color–magnitude" permits the mass to be approximately doubled through the merging of galaxies since the moment of star formation termination, which the coefficient $\alpha\simeq 0.3$ corresponds to.

The age of galaxies also characterizes the evolution of matter in the Universe as a whole, activity of galaxy nuclei, and supermassive black holes associated with them. So, the detection of the radio galaxy TN J0924-2201 with the redshift $z=5.19$ ([98]) showed that the presence of a massive black hole, that ensures the activity of the galaxy, at an age of the Universe of about 1 billion years can be explained only by the presence of a primeval black hole. Another interesting problem is the existence of a very old stellar population at high redshifts ([115]) which can be solved in cosmology with the Λ–term.

4. COUNTS OF RADIO SOURCES

The counts of sources described by the so-called curve "$\log N-\log S$", "logarithm of the number of sources — logarithm of the flux density", in the sky radio surveys became another method of evaluating parameters and evolution of matter in the Universe, which has come to be classical. Longair ([31]) detected a cutoff in the distribution of the identified radio sources at $z=4$, which provided a foundation for the development of evolution models of the Universe. In the same paper, the isotropic distribution of the radio sources of the catalog 4C up to the same redshift was noted.

To describe the counts of sources nowadays, a differential curve $\log N-\log S$ in the form $n(S)dS$ is used, where $n(S)dS$ is the number of the radio sources within the flux densities from S to $S+dS$ at a given wavelength. It is usually normalized by the factor $S^{5/2}$ associated with the number of sources in the Euclidean model ([116]):

$$S^{5/2}n(S)=\frac{1}{4\pi}\int\limits_0^{\infty}S^{5/2}\eta(S,z)dz,$$

where (therein) $\eta(S,z)dSdz$ is the total number of the sources with flux densities from S to $S+dS$ within

the redshifts from z to $z + dz$:

$$\eta(S,z) = \frac{cA^2(1+z)^\alpha \rho(L,z)}{H_0(1+\Omega z)^1/2},$$

where $\rho(L,z)$ is the luminosity function of the radio sources, $A = 4\pi D^2$ is the area of the sphere with a source in the centre, and the observer being inside this sphere, $\Omega = 2q_0$ is the density parameter. An example of the normalized differential curve of the counts of sources with flux densities S within $30\mu\text{Jy} \le S < 56\,\text{Jy}$ at a frequency of 1.4 GHz is displayed in fig. 8.

The curve $\log N - \log S$ demonstrates the evolution features of radio sources (e.g. dual-population unification scheme [117]) and also allows making use of the additional selection factor associated with the choice of a population of radio sources for cosmological studies ([99,118]). It can be seen from fig. 8 that the optimum regions of search for distant radio galaxies lie in the zone of moderate flux densities, from 5 to 100 mJy, which elliptical galaxies correspond to. Fainter radio galaxies are related to nearby spiral galaxies. It should also be noted that the source size, as an additional selection factor, can also be used in selecting elliptical galaxies. As it was shown in the paper by Fielden et al. ([119]), the median angular dimension of the sources identified with elliptical galaxies approaches asymptotically to $5'' - 10''$ at flux densities of about 10 mJy, while all known radio sources in spiral galaxies are limited by the size of their disks. The median redshift of the radio sources of this cosmological part of the curve $\log N - \log S$, which contains the greatest number of detected radio sources in the modern sky radio surveys is approximately equal to 1 ([120]). Using the galaxy luminosity functions determined, in particular, by counts of radio sources, it is also possible to construct the mass density function of black holes related to radio sources ([121]).

The cosmological applications of statistical studies of radio sources find reflections in searching for angular clustering of sources in sensitive radio surveys and studying of the Hubble diagram in the K range. In the first case, in the distribution of radio galaxies situated at cosmological distances, it is possible to detect the dipole of anisotropy caused by increasing surface density of distant objects in the direction of movement of our system ([122, 123]) correlated with the dipole in the distribution of the relic emission. It is also possible to construct ([122,123]) the angular correlation function from the data of the most sensitive sky surveys at 21 cm, NVSS ([17]) and FIRST ([18]) which has the shape $w(\theta) \propto \theta^{-0.8}$. The amplitude of clustering corresponds to the spatial clustering length $l_0 \sim 6h^{-1}$ Mpc.

Another method of statistical investigations is related to the analysis of the relation $K - z$. Willot in [124] approximated the data of magnitude measurements of galaxies from the catalog 7C in the K filter by a second order polynomial and derived the relationship

$$K = 17.37 + 4.53\log_{10} z - 0.31(\log_{10} z)^2,$$

which supports the model of a passively evolving galaxy with instantaneous star formation at $z_f \approx 10$ and having a luminosity of about $3L_*$ at the present epoch.

5. SOVIET/RUSSIAN OBSERVATIONAL RADIO COSMOLOGY

As has already been mentioned, the Soviet investigations in the field of observational radio cosmology, besides observations, were associated with theoretical calculations, on the one hand, and with development of engineering facilities ensuring the observations, on the other hand.

I.S. Shklovskij and V.L. Ginzburg showed independently the possibility of existence of high-relativistic electrons in the powerful non-thermal radio sources and generation of the synchrotron radiation. In spite of the fact that this was obtained for solar physics, Shklovskij proposed to apply this mechanism for the Crab nebula. In fact, this was the first mention that generation of the synchrotron radiation is possible at great distances (several or even several thousand light years) from us ([125]), which was subsequently employed in extragalactic radio astronomy.

After identification of the first radio galaxies in the early 1950s, V.A. Ambartsumian made an assumption of galactic nuclei activity and ejection from their centers of massive objects. This was announced at the physical conference in Brussel in 1958 (see also [126, 127]). At the same time there appeared the first models of extragalactic radio sources ([128–133]) with the help of which mechanisms of generation of radio emission were studied, and in the paper by Kardashev et al. ([132]) the first evaluation of the age of a radio source (of order 0.5 mln years) was performed on the basis of explanation of a high-frequency cutoff of the spectrum by synchrotron energy losses of relativistic electrons. In the same period, a study of radio emission from clusters of galaxies was started ([134, 135]). It was established that most of the high-latitude radio sources were identified with galaxies being members of clusters. Attention was also paid to the fact that galaxies associated with radio sources turned out to be peculiar in both their morphology and optical emission spectrum. At the same time, it was a failure to establish correlation between the parameters of radio emission of clusters and richness or morphological class of clusters.

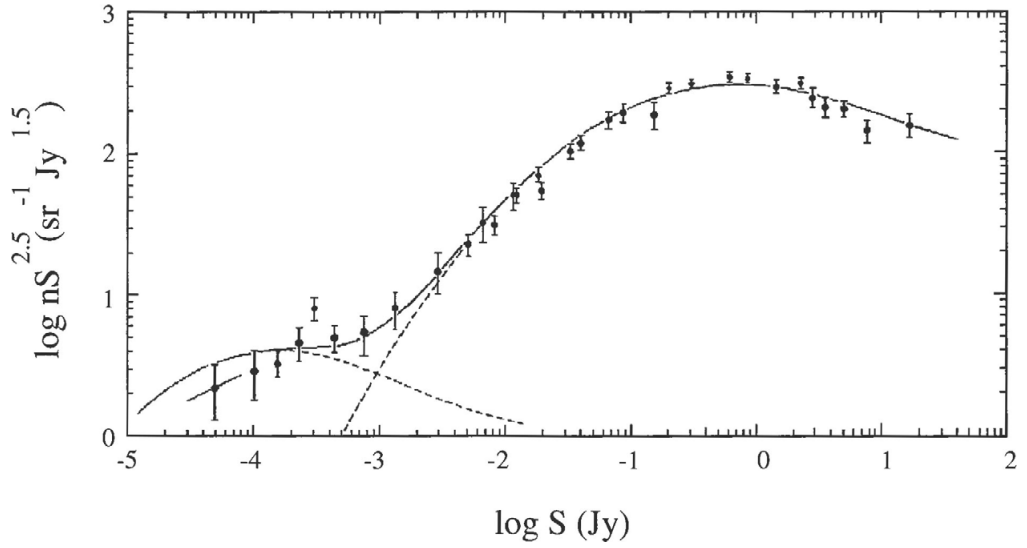


Fig. 8. The normalized curve of counts of radio sources at a frequency of 1.4 GHz. The solid curve shows the best model dependence on the four parameters with $\Omega = 1$ from [116]. The dashed curve shows the contribution of the radio sources evolved in the components of the luminosity function of the spiral and elliptical galaxies. The abscissa gives the flux density in Jy, the ordinate shows the logarithm of the differential counts of sources multiplied by $S^{2.5}$, (sr^{-1}Jy$^{1.5}$). The figure is taken from [116].

The first papers on interpretation of observational data in 1955 on the basis of investigations of Ryle ([136]) showed the presence of cosmological evolution of radio sources. These conclusions were at variance with the stationary model of the World and demanded more accurate and deeper counts of radio sources, which became the main argument in the proposals put forward by V.V. Vitkevich and B.M. Chikhachev to build a big cross-like radio telescope in Pushchino, which were formulated in 1956 ([137]; see also [138]). This group also dealt with studying of radio sources, plotting of their continuous radio spectra and estimations of distances (see [139–142]). So, a relationship between the spectral index α and the flux density S was detected for extragalactic radio sources ([142, 143]) and a conclusion was drawn that distant quasars ($z > 1.0$) of the 3C catalog have deeper spectra, while among less distant ones one can also find objects with a less steep spectrum. Later the relationship dependence was obtained for other samples in radio wavelength range for median values of α and S ([144, 145]).

In the field of radio source physics it was shown that one could estimate the limiting angular sizes θ_a for synchrotron radio emission sources from the synchrotron reabsorption ([146]):

$$\theta_a = \text{const} \cdot \nu_m^{-5/4} F(\nu_m)^{1/2} H^{1/4},$$

where ν_m is the frequency of maximum flux denisty $F(\nu_m)$ in the spectrum, H is the magnetic field.

The radio emission from normal galaxies and quasars ivestigated at the cm–dm wavelength and thier radio spectra were classified and interpreted by Kurilchik in [147–150].

Under the leadership of S.Eh. Khaikin the **Big Pulkovo Radiotelescope** (BPR) was put into operation in 1956 with a variable profile antenna designed in cooperation with N.L. Kaidanovskij. The telescope insured high angular resolution in the cm wavelength range.

Owing to the high resolution and cm wavelength range, BPR made it possible to solve many problems of extragalactic radioastronomy, that is to study the structure of radio sources from direct observations ([151–154]). Using the obtained accurate coordinates, optical identification of radio sources was started ([155]). From the observational data of double radio sources and continuous spectra, upper limits of velocities of separation of components were evaluated ([156, 157]). One of the main directions of cosmological investigations in radio astronomy was the exploration of the relic emission ([158]), the discovery of which by Penzias and Willson in 1965 caused a squall of papers both abroad and in the Soviet Union. It should be noted that actually immediately after the creation of BPR, T. Shmaonov, a member of Khaikin's group, discovered (though with a horn an-

tenna) homogeneous background emission, measured its temperature, but did not pay much attention to it because of some contingency.

Note that the radio astronomers from Gorkij (now Nizhnij Novgorod) also began to study the microwave background. They carried out measurements of temperature of relic emission from millimeter to decimeter wavelength range ([159–161]).

Returning to the theoretical papers, note that the manifestation of the CMB radiation was discovered as early as the 1940s from observations of rotational levels of cyanogen molecules ([162]), but a correct interpretation was given in the paper by I.S. Shklovskij in 1966 (see [163]) (as well as by [164], and [165]) in which he explained the anomalous population of energy levels of cyanogen molecule in the interstellar medium by the action of the CMB radiation in the millimeter range and proposed a method for temperature determination of the relic radiation from the intensity of optical molecular lines of the interstellar gas.

The techniques of focusing, observations, data reduction have been tested and developed on the telescope BPR and the experience acquired was used in designing and mounting of the world's biggest reflector radio telescope RATAN-600. From the observational data obtained with BPR at the 4 cm wavelength in 1968 ([158]) with a sensitivity of a few mK, it was proved that 3 K background could not be explained by the unresolved GHz–peaked radio sources (this study was initiated by the detection of the first GPS objects in Australia). Using BPR with new generation radiometers, it was managed ([166–169]) to set a new limit on isotropy of the relic radiation at a level of 0.8×10^{-4} on scales of $3' - 1$ at a wavelength of 2.8 cm, to plot the relationship $\log N - \log S$ in the centimeter wavelength range, to detect hot gas in the cluster of galaxies. After the paper by Rees ([170]) had appeared, an attempt was made in the same year to detect the predicted effect of polarization of the relic radiation with repeated scattering both in the period of recombination and in the zone of "secondary heating" ([171, 172]).

The first flux density measurements of many famous radio sources were made also in the centimeter wavelength range ([154]), their continuous spectra were constructed, and steepening of their spectra with frequency growth was found, which is one of the explanations of the selection effectiveness of distant radio sources from the spectral indices. In identification of radio galaxies a non-linear relationship between radio luminosity and optical luminosity of radio galaxies $L_{\rm rad} = k * L_{\rm opt}^{2.5}$ was detected ([155]), where k is a certain coefficient. This relationship was rediscovered 30 years later ([173]). It is the non-linearity that enables photometric redshifts to be estimated simply from the flux density ratio in the radio and optical range. This effect was subsequently employed for evaluation of limiting stellar magnitudes $m - m_{\rm lim}$ in the optical range in the program "Big Trio" ([174, 175]).

With the placing in service of RATAN-600 ([176]) in 1977 (the first observations had been conducted as early as 1974), a new epoch of extensive observational radio cosmology actually began in the Soviet Union. To realize the capabilities of the telescope RATAN-600, the experiment "Cold" was suggested ([177], hereafter PK86). In fact, the inspection of the data of this survey led to the formation of radio cosmology in Russia as a separate direction of radio astronomy.

By that time a lot of theoretical problems of cosmology and evolution of the Universe at large redshifts, associated with the manifestation in the radio range had been solved, fluctuations of the CMB radiation and their spectrum had been predicted ([70,178–181]), and a model of rapidly expanding Universe at the initial stage (known now as inflation theory) had also been suggested and upgraded ([68, 182–187]).

6. EXPERIMENT "COLD"

Let us return to the survey "Cold". The principal goal of this survey (PK86) was a considerable advance in the search for protogalaxies predicted in the theory of formation of galaxies from primeval inhomogeneities ([69]). The limit of the inhomogeneity of the relic radiation was at a level of 3.6 mK ([188]). Before the experiment "Cold" was started, in 1980, the level had been lowered to 1 mK from the BPR and RATAN-600 data, when the new generation of radiometers ([166, 171, 189–194]).

With the development of the theory it became clear that the nature of small-scale anisotropy of the three-degree background is associated not only with the structure of the Universe at $z = 1000$, but also with the fundamental problems on singularity, the theory of Great Unification of interactions, the theory of formation of radiation and matter, the processes that took place after hydrogen recombination, gravitation waves, neutrino mass etc. (PK86, see also the first section). Thus, the search for anisotropy on small scales would help throw light on many questions of astrophysics, cosmology and physics of elementary particles.

Within the available facilities (antenna shape, radiometer sensitivity, noises, geographical location of the radio telescope) an optimum strategy of carrying out the survey was selected. From the preliminary estimates it was expected that the search for the low-

scale anisotropy (comparable with the beam pattern of the telescope) could be limited only by thermal variations in individual scans and that the sensitivity, resulting from the averaging of 10-30 scans, will be limited only by the level of "confusion" (PK86). The search for extended structures was limited by the level of the atmospheric noise. A new low-noise cooled radiometer (cryoradiometer) ([195]) was employed in the survey at the wavelength 7.6 cm. Special screening was used on the antenna for limiting the temperature noise. As a result of updating and upgrading performed, the noise temperature of the system was reduced to a level of $T_{\rm sys} = 37.3$ K, and the laboratory measured radiometer sensitivity at an integration time of $\tau = 1$ s was $dT = 2.5$ mK. The North sector of RATAN-600 was used for the observations. The computed shape of the beam pattern of the telescope in this configuration was taken from the paper [196]. The North sector was set in the stationary mode for the constant elevation corresponding to the passage of the source SS 433 — the most interesting object of this epoch. The Earth rotation ensured formation of a 24 hour scan with a resolution of $1'$ at the central wavelength 7.6 cm. Besides, the radiometers at 1.35, 2.08, 3.9, 8.2 and 31 cm were employed, but they were less sensitive. They helped perform the tasks of cleaning (PK86) of noises at the central frequency (with the aid of a duplicating radiometer at 8.2 cm), atmospheric noises (2.08 and 3.9 cm), low-frequency local noises (for instance, caused by cars) and galactic radiation (31 cm). The total accumulation time was 4 months.

In the field of extragalactic and cosmological investigations the survey data were supposed (PK86) to be used for

- plotting the curve $\log N - \log S$ in the region of 1–14 mJy;
- study of the detected sources, including optical identification;
- definition of spectra, structure and search for variability;
- check of isotropy of the distribution of sources over the sky;
- search for fluctuations of the relic emission;
- search for the Sunyaev–Zeldovich effect;
- search for peculiar galaxies (using the Byurakan Observatory lists).

The preliminary data reduction included (PK86) re-pixelization with a decrease in the resolution to $30''$, removal of low-frequency and pulse interference, smoothing by the function $\sin(x)/x$ to suppress frequencies higher than the limiting, averaging signal records over several days. After the averaging of records, for searching out systematic and random radiation, the sums and differences of the same groups of averaged records were used, and for separation of spatial frequencies the Fourier analysis was applied.

Among the first basic results of the survey "Cold" were, in particular, the data presented in (PK86):

- a new upper limit of anisotropy of CMB radiation $dT_b/T = 10^{-5}$ on scales of searching for protoclusters $5' - 10'$;
- a catalog of sources (about 1.5 thousand up to 5 mJy) at several wavelengths of the centimeter–decimeter range, and also detection of new bright radio sources with a flux density $S > 0.2$ Jy;
- plot of a curve "number of sources – flux density" ($\log N - \log S$) to a level of 0.86–10 mJy in the centimeter wavelength range.

Even the first anisotropy measurements on scales of $1'$ at the mK level set a new upper level on the CMB anisotropy and required the theory of formation of fluctuations on scales of protoclusters predicted in [69] to be corrected.

The accuracy 0.3 mK reached in the experiment "Cold" at the 3.9 cm wavelength on a scale of about $22'$ (PK86) placed rigorous constraints on the Hubble expansion variations both for the moment of recombination and in the period of the secondary heating. The small-scale polarization was shown to be absent, which limited the energy density of low frequency gravitation waves ([197,198]) and showed a minor role of the secondary scatter (i.e. the period of the secondary ionization in the Universe). From the observations of the Syunyaev–Zeldovich effect, the variant of formation of the background near our Galaxy by decaying particles has been checked. The background is shown ([166]) to originate behind the clusters of galaxies in Coma.

The experiment rejected a number of models of the World (scalar, vector, tensor) predicting a high noise level on scales of protoclusters. Among the rejected hypotheses was also the hypothesis of "neutrino proto-pancakes". Later on, the data of the experiment re-processed by a different procedure (by the use of three-point dispersion) showed ([199]) that after the removal of the non-thermal radiation of the Galaxy (with the spectral index 2.55) and of the noise associated with the atmospheric water vapor, a correlated signal remains. This gives an agreement with the inflation model on scales above 0.5° (therein). Besides, the RE fluctuations on the sub-degree scales were shown to be black-body by means of comparison of the 7.6 cm data of the 80s with the new data of the millimeter range. Using the integrated data and the results of the latest RATAN-600 observations, a transparency window of the Galaxy and Metagalaxy is shown ([200]) to exist on the "scale–frequency" plane, where the depth of investigations depends only

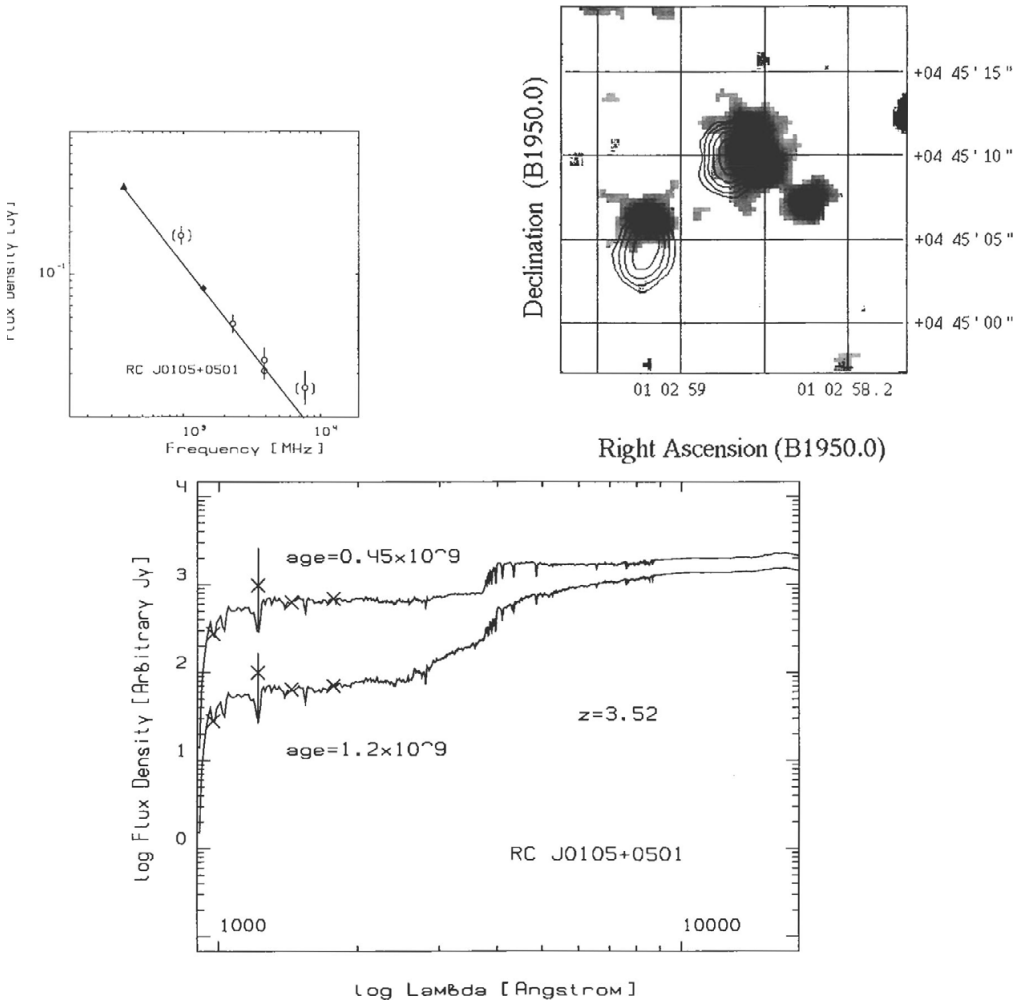


Fig. 9. Example of investigation of the radio galaxy RC J0105+0501 according to the "Big Trio" program. The upper left panel shows the continuous radio spectrum of the object. The spectral index $\alpha = -1.22$ ($S \sim \nu^{\alpha}$) from the data of RATAN-600 and other radio telescopes. The upper right panel displays optical identification of the radio galaxy RC J0105+0501. Isophotes of the image taken with VLA at a frequency of 1.4 GHz are superposed on the R-band image obtained at the 6 m telescope of SAO. The bottom panel: the estimate of the photometric redshift and age of the stellar system from photometry data of the 6 m telescope and data of synthetic evolution spectra of elliptical galaxies.

on the sensitivity of the detectors, and measurements are possible with a submicrodegree precision of the processes at the "dark age" epoch.

The examination of the objects from the subsample of steep spectrum radio sources identified with elliptical galaxies opened a new project, "Big Trio", which includes several stages ([87, 99, 108, 174, 175, 201]), namely,

- selection of radio sources by the spectral index (i.e. selection of objects with the spectral index $\alpha < -0.9$, $S \propto \nu^{\alpha}$) using the data of the catalog "Cold", additional RATAN-600 observations and the Texas survey data ([202, 203]);
- revealing the structure of radio sources from the results of VLA observations and selection of FR II type sources;
- optical identification by the Palomar Atlas and selection of objects for BTA investigations;
- optical identification and multicolor (BVRI) photometry at BTA;
- spectroscopy of identified sources;
- study of the stellar population age.

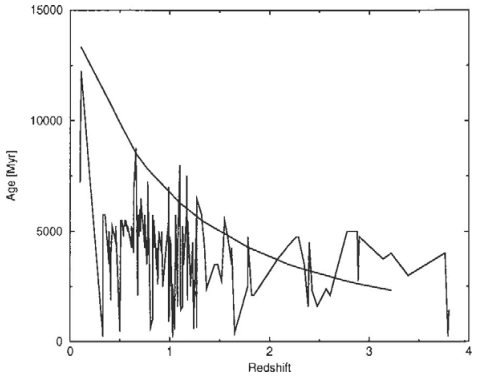


Fig. 10. Elliptical galaxy age versus redshift z and function $t(z)$ (smoothed curve) constructed by the maximum values of age in $\Delta z = 0.3$ discrete intervals in the GISSEL model.

Fig. 9 demonstrates investigation of one of the objects of the project — the radio galaxy RC J0105+0501 with a photometric redshift of $z \approx 3.5$ ([204]).

Using the "Big Trio" project data, an independent confirmation was derived of the existence of the border in redshifts for the population of powerful radio galaxies. The first independent estimate of the Λ–term was made from the evaluation of the age of host galaxies ([205]), and the first attempts were undertaken to reconstruct the equation of state of the Universe by a model-independent procedure from the distribution "age–redshift".

Recent results of cosmological parameters estimated with the integral function fitting ([206, 207]) are demonstrated in fig. 10. The smoothed curve is the function of age $t(z)$ calculated as

$$t(z) = \int_z^\infty \frac{d\tilde{z}}{(1+\tilde{z})H(\tilde{z})}$$

using the data of radio galaxy ages vs redshift z. The function $H(z)$ is expressed as a 4–parameter function

$$H^2 = H_0^2[\Omega_m(1+z)^3 + A + B(1+z) + C(1+z)^2],$$

where $A + B + C = 1 - \Omega_m$. The function $t(z)$ is fitted by varying of 4 parameters (H_0, Ω_m, A, B). Separating data in discrete intervals of $\Delta z = 0.3$ and considering the maximum values of age in each interval, one could find a stable solution of the $t(z)$–function minimum deviation with $H_0 = 71.5 \pm 10$ and $\Omega_\Lambda = 0.8 \pm 0.1$ (where $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$, $A = B = 0$) ([206, 207]) using the GISSEL'98 model ([208]) of the stellar population evolution.

The "Big Trio" project is also in progress at the present time ([73, 204, 206, 209–218]).

7. SOME OTHER WORK

Note that other experiments were carried out at RATAN-600, for instance, the Zelenchuk survey by Sternberg Astronomical Institute of Moscow University ([219,220]) in a wider declination band than it was in "Cold", but with a lower sensitivity. The results of the survey were used to search for inhomogeneities in the distribution of sources in the sky ([221]), counts of sources ([222]), to construct distributions of spectral indices. Later on, Gorshkov ([223]) derived an analytical relation between the distribution of counts and spectral indices and the frequency, allowing reproduction of $\log N - \log S$ at different wavelengths.

The cycle of surveys carried out at the Ukrainian telescope UTR ([224–229]) made it possible to obtain for the first time complete catalogs of radio sources in the decameter wavelength range. From these data Sokolov ([230]) plotted a differential curve of counts of sources at a frequency of 25 MHz and indicated the existence in this range of classes of objects "responsible" for the strong cosmological evolution of extended extragalactic sources.

In 1989 Dagkesamanskij and Zheleznykh ([231]) suggested a method of detection of neutrino and other superhigh energy elementary particles by radio astronomical techniques from results of their interaction with the surface of the Moon and other celestial bodies. Though this method is indirectly related to radio cosmology, it shows a possibility of measuring a density of super-high energy particles in the surrounding space, therefore, we mention it here.

Komissarov (PRAO) and Gubanov (AI SPbU) ([232]) used radio sources with ultra-steep spectra ($\alpha \leq -2.0$) to measure magnetic fields of relic radio galaxies in which the activity of the nuclei had already stopped. Explaining the steepness of the spectrum by synchrotron losses of relativistic electrons after the process of injections of new particles into extended radio components had terminated, they employed the models of spectrum aging and, in particular, showed that the location of the high-frequency cut-off of the spectrum caused by the losses depends on the time passed since the moment of attenuation of activity and the redshift and permits the magnetic field intensity to be estimated. The typical magnetic field intensity is assessed at 10^{-5} G and the typical attenuation time at $\tau \approx 100$ Myrs.

It cannot but be mentioned also the domestic satellite studies of the relic emission with the aid of the radiometric system at the wavelength of 8 mm — the experiment "Relikt" ([233]). The satellite "Prognoz-9" was launched in 1983 June for making a map of large-scale anisotropy of the CMB radiation. The first data showed that at the 0.2 mK level the quadrupolar

component was not detected. The data re-processing ([234]) showed that the new results following from the "Relikt" satellite data are in good agreement with the data of the satellite COBE in measuring the dipole. New upper limits on the quadrupole have been set. The synchrotron thermal radiation and dust make a contribution to the Galaxy radiation, and this contribution can be taken into account when seaking for the RE fluctuations. The search for relic recombination lines in the microwave background radiation at RATAN-600 by spectroscopic methods ([235]) can also be referred to the additional work in the field of radio cosmology. From the results of this work, upper limits were established on the possibility of observing spatially-spectral details in the 3K background which were predicted at SAO ([236]) and associated with the scatter by primary molecules such as LiH. In particular, it is shown ([235]) that in the frequency band $\approx$1 MHz at the wavelength of 6.2 cm in the range of spatial periods from $0\farcm1$ to $16'$, the spectrum of spatial fluctuations is flat and has no features exceeding $\delta T/T = 10^{-3}$. If this estimate is assumed to be an upper limit of the first rotational transition of LiH molecules at $z = 90.7$, then at a mass of protoclusters at the stage of beginning of their gravitation compression of about $10^{13} M_\odot$, this restrict the relative abundance of LiH molecules by a value of about 3×10^{-14}.

8. CONCLUSIONS

When examining the above examples of the procedures employed and estimates of parameters, a question may arise of "whether cosmology is solved", as Peebles expressed himself ([237]), since nearly all cosmological parameters are known, the Universe is shown to be expanding, the Hubble constant and the contribution of different components to the total energy density are measured confidently. Indeed, the class of admissible models of the Universe is narrowed, but ample opportunities of choosing inside acceptable boundaries still remain. The estimates of parameters made by different techniques must not be conflicting, and their difference should be explained within the frames of physical models.

The measurement of parameters with smaller errors, on the one hand, and new test applied to manifestation of parameters in the evolution of objects, on the other hand, are important points here.

Refinement of cosmological parameters from the power spectrum of the relic radiation and, as a consequence, constraints on evolution models of the Universe, as well as elucidation of the nature of the main energy component of the Universe associated with the Λ-term, in particular, from results of investigation of radio galaxies, remain important matters among the problems of observational radio cosmology. Many problems related to measuring fluctuations of the relic radiation at 10 wavelengths of the millimeter and submillimeter range by the analysis of CMB charts and evaluation of cosmological parameters will be solved by the project "Planck" of the European Space Agency in the realization of which a community of about 300 astronomers is engaged. It is contemplated to launch into orbit the satellite "Planck" in 2007 and in the period of 2 years to obtain the most sensitive chart of the RE from observations from point L2. The radio telescope RATAN-600 (see the description of the project "Cosmological gene of the Universe", [238]) has been called upon to play an important part in this direction connected with the accompanying ground-based observations.

The authors express their gratitude to their colleagues, co-authors in joint publications, OVV thanks the RFBR for partial support of the work through grant No.02–07–90038. Aurhors are very thankful for useful remarks and corrections to S.A. Trushkin and N.F. Vojkhanskaya.

BIBLIOGRAPHY

1. P. J. E. Peebles, *Principles of physical cosmology, Princeton Series in Physics* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993)
2. M. S. Longair, Radio astronomy and cosmology, in *Observational cosmology; Advanced Course, 8th, Saas-Fee, Switzerland, April 10-15, Lectures, 127* (1978)
3. I. Robson, in *Active galactic nuclei, Wiley-Praxis Series in Astronomy and Astrophysics, New York, NY: Wiley* (Chichester: Praxis Publishing, 1996).
4. A. K. Kembhavi and J. V. Narlikar, *Quasars and active galactic nuclei: an introduction* (Cambridge University Press, 1999).
5. A. G. Pacholczyk, *Radio astrophysics, Series of Books in Astron. Astrophys.* (San Francisco: Freeman, 1970).
6. A. G. Pacholczyk, *Radio galaxies* (Oxford, Pergamon Press, Ltd., International Series in Natural Philosophy. V. **89**, 1977).
7. F. H. Shu, *The physical Universe. An Introduction to Astronomy* (University Science Books and Oxford University Press, 1982).
8. F. G. Smith, Mon. Not. R. Astron. Soc. **112**, 497 (1952).
9. W. Baade and R. Minkowski, Astrophys. J. **119**, 206 (1954).
10. B. U. Keel, Quasars and Active Galactic Nuclei (2002), `http://www.astr.ua.edu/keel/agn/`

11. G. Stanley and O. B. Slee, Aust. J. Sci. Res. **3**, 234 (1950).
12. M. Ryle and A. Hewish, Mon. Not. R. Astron. Soc. **120**, 220 (1960).
13. B. Elsmore, M. Ryle, and P. R. R. Leslie, Mon. Not. R. Astron. Soc. **68**, 61 (1959)
14. D. O. Edge, J. R. Shakeshaft, W. B. McAdam, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **68**, 37 (1959).
15. M. Ryle, in *Proceed. IAU Symp. No. 9 and URSI Symposium No. 1, 30 July - 6 August, 1958*, Ed. by N. Ronald (Bracewell. Stanford University Press, Stanford, CA, 1959), 475.
16. S. E. Khaikin and Yu. N. Parijskij, Izv. GAO **23**, 87 (1964).
17. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
18. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg, Astrophys. J. **475**, 479 (1997).
19. P. F. Scott and M. Ryle, Mon. Not. R. Astron. Soc. **122**, 389 (1961).
20. J. D. H. Pilkington and P. F. Scott, Mon. Not. R. Astron. Soc. **69**, 183 (1965).
21. J. F. R. Gower, P. F. Scott, and D. Wills, Mem. R. Astron. Soc. **71**, 49 (1967).
22. B. Y. Mills, Aust. J. Sci. Res. **5**, 266 (1952).
23. J. R. Shakeshaft, M. Ryle, J. E. Baldwin, et al., Mem. R. Astron. Soc. **67**, 106 (1955).
24. J. R. Shakeshaft, in *Proceed. of the 4th IAU Symposium*, Ed. by Hendrik Christoffel Van de Hulst (Cambridge University Press, 1957), 218.
25. G. M. Tovmassian, *Extragalactic emission sources* (Nauka, Moscow, 1986) [in Russian].
26. M. S. Longair and G. H. MacDonald, Mon. Not. R. Astron. Soc. **145**, 309 (1969).
27. M. Schmidt, Nature **197**, 1040 (1963).
28. J. L. Greenstein and T. A. Matthews, Astron. J. **68S**, 279 (1963).
29. I. S. Shklovskij, Astron. Zh. **41**, 801 (1964).
30. I. S. Shklovskij, Astron. Zh. **42**, 893 (1965).
31. M. S. Longair, Mon. Not. R. Astron. Soc. **133**, 421 (1966).
32. M. Ryle, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **6**, 249 (1968).
33. I. D. Novikov and Ya. B. Zeldovich, Cosmology. Annu. Rev. Astron. Astrophys. **5**, 627 (1967).
34. A. G. Doroshkevich, M. S. Longair, and Ya. B. Zeldovich, Mon. Not. R. Astron. Soc. **147**, 139 (1970).
35. R. E. Otrupcek and A. E. Wright, Proc. Astron. Soc. of Australia **9**, 170, Bull. Inform. CDS **41**, 47 (1990).
36. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, Astrophys. J., Suppl. Ser. **103**, 427 (1996).
37. R. Rengelink, in *The Most Distant Radio Galaxies, Proc. Colloq., Amsterdam, 15-17 October 1997*, Ed. by H. J. A. Rottgering, P. N. Best, and M. D. Lehnert (Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 1999), 399.
38. S. T. Myers, N. J. Jackson, I. W. A. Browne, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **341**, 1 (2003).
39. M. R. Griffith and A. E. Wright, Astron. J. **105**, 1666 (1993).
40. A. E. Wright, M. R. Griffith, B. F. Burke, and R. D. Ekers, Astrophys. J., Suppl. Ser. **91**, 111 (1994).
41. M. R. Griffith, A. E. Wright, B. F. Burke, and R. D. Ekers, Astrophys. J., Suppl. Ser. **90**, 179 (1994).
42. J. N. Winn, J. N. Hewitt, A. R. Patnaik, et al., Astron. J. **121**, 1223 (2001).
43. R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **124**, 259 (1997).
44. C. De Breuck, W. van Breugel, H. Roettgering, et al., in *The Most Distant Radio Galaxies, Proc. Colloq., Amsterdam, 15-17 October 1997*, Ed. by H. J. A. Roettgering, P. N. Best, and M. D. Lehnert (Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 1999), 477.
45. K. I. Kellermann, R. C. Vermeulen, J. A. Zensus, and M. H. Cohen, Astron. J. **115**, 1295 (1998).
46. H.-J. Roeser, K. Meisenheimer, M. Neumann, et al., Rev. Mod. Astron. **10**, 253 (1997).
47. R. Lynds, Astrophys. J. **164**, L73 (1971).
48. J. Arons, Astrophys. J. **172**, 553 (1972).
49. D. A. Varshalovich, V. E. Panchuk, and A. V. Ivanchik, Pis'ma Astron. Zh. **22**, 8 (1996).
50. M. J. Drinkwater, J. K. Webb, J. D. Barrow, and V. V. Flambaum, Mon. Not. R. Astron. Soc. **295**, 457 (1998).
51. C. Stoughton, H. Lin, B. Yanny, et al., in *American Astron. Soc. Meeting 201* (2002), No.114.12.
52. F. Hoyle and J. V. Narlikar, Mon. Not. R. Astron. Soc. **123**, 133 (1961).
53. W. Davidson, Mon. Not. R. Astron. Soc. **123**, 425 (1962).
54. W. Davidson, Mon. Not. R. Astron. Soc. **124**, 79 (1962).
55. D. W. Sciama, Mon. Not. R. Astron. Soc. **126**, 195 (1963).
56. N. Kardashev, Astrophys. J. **150**, 135 (1967).
57. H. H. Fliche, and J. M. Souriau, Astron. Astrophys. **78**, 87 (1979).
58. P. M. Garnavich, S. T. Holland, B. P. Schmidt, et al. (High–Z Supernova Search Team), in *American Astron. Soc. Meeting 201* (2002), No.78.09.

59. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., (submitted to Astrophys. J., 2003), astro-ph/0302209.
60. A. Penzias and R. W. Wilson, Astrophys. J. **142**, 491 (1965).
61. G. Gamov, Phys. Rev. **, 70**, 527 (1946).
62. P. D. Naselskij, D. I. Novikov, and I. D. Novikov, *Relic emission* (Nauka, Moscow, 2003) [in Russian].
63. A. G. Doroshkevich and I. D. Novikov, Reports of USSR AS **154**, 809 (1964).
64. R. Dicke, P. J. E. Peebles, P. Roll, and D. Wilkinson, Astrophys. J. **142**, 414 (1965).
65. T. Shmaonov, Pribory i tekhnika experimenta **1**, 83 (1957).
66. R. K. Sachs and A. M. Wolf, Astrophys. J. **147**, 73 (1967).
67. A. H. Guth, Phys. Rev. D. **23**, 347 (1981).
68. A. A. Starobinsky, Phys. Lett. **117B**, 175 (1982).
69. J. Silk, Nature **215**, 1155 (1967).
70. A. G. Doroshkevich, Ya. B. Zeldovich, and R. A. Syunyaev, Astron. Zh. **55**, 913 (1978).
71. P. J. E. Peebles and J. T. Yu, Astrophys. J. **162**, 815 (1970).
72. A. D. Sakharov, ZhETF **49**, 345 (1965).
73. Yu. N. Parijskij, A. I. Kopylov, O. V. Verkhodanov, et al., in *Proceed. IAU Symp. No 201.* (Manchester, England, 2000), **201**, 88.
74. S. Padin, M. C. Shepherd, J. K. Cartwright, et al., Publ. Astron. Soc. Pac. **114**, 83 (2002).
75. C.-L. Kuo, P. Ade, J. J. Bock, et al., in *American Astron. Soc. Meeting 201* (2002), No.140.04.
76. W. J. Percival, W. Sutherland, J. A. Peacock, et al., (2dF team), Mon. Not. R. Astron. Soc. **337**, 1068 (2002).
77. U. Seljak and M. Zaldarriaga, Astrophys. J. **469**, 437 (1996), astro-ph/9603033.
78. R. A. Syunyaev and Ya. B. Zeldovich, Comments Astrophys. Space Phys. **4**, 173 (1972).
79. R. A. Syunyaev and Ya. B. Zeldovich, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **18**, 537 (1980).
80. A. Lasenby, in *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Ed. by Paul Murdin (IOP Publishing Ltd and Nature Publishing Group, 2001), 4 (Sol–Z Index), 3215.
81. M. Birkinshaw, Phys. Rev. **310**, 97 (1999).
82. L. Grego, J. E. Carlstrom, M. K. Joy, et al., Astrophys. J. **539**, 39 (2000).
83. R. Minkowski, in *Quasi-Stellar Sources and Gravitatiobnal Collapse*, Ed. by I. Robinson, A. Schild, and E.I. Schucking (Chicago: Univeristy of Chicago Press, 1965) 433.
84. D. H. Rogstad, and R. D. Ekers, Astrophys. J. **157**, 481 (1969).
85. P. Best, M. Longair, and H. J. A. Roettgering, in *Proceed. of the Colloq., Amsterdam, 15-17 October 1997*, Ed. by H. J. A. Roettgering, P. N. Best, and M. D. Lehnert (Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences 1999), 59.
86. G. Miley, H. Rottgering, K. Chambers, et al., The Messenger **68**, 12 (1992).
87. Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, A. B. Temirova, and A. I. Kopylov, Astron. Zh. **71**, 821 (1994).
88. A. G. G. M. Tielens, G. K. Miley, and A. G. Willis, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **35**, 153 (1979).
89. G. Blumenthal and G. Miley, Astron. Astrophys. **80**, 13 (1979).
90. R. A. Laing and J. A. Peacock, Mon. Not. R. Astron. Soc. **190**, 903 (1980).
91. B. L. Fanaroff, and J. M. Riley, Mon. Not. R. Astron. Soc. **167P**, 31 (1974).
92. A. Bridle, Images of Radio Galaxies and Quasars (2000), `http://www.cv.nrao.edu/~abridle/images.htm`
93. J. P. Leahy, An Atlas of DRAGNs (2000), `http://www.jb.man.ac.uk/atlas/types.html`
94. O. B. Slee, Proc. Astron. Society of Australia **4**, No 2, 184 (1981).
95. M. J. Lebofsky, G. H. Rieke., and D. Walsh, Mon. Not. R. Astron. Soc. **203**, 727 (1983).
96. D. Walsh, D. Shone, M. J. Lebofsky, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **212**, 631 (1985).
97. D. S. De Young, *The Physics of Extragalactic Radio Sources* (The University of Chicago Press, 2002).
98. W. J. M. van Breugel, C. De Breuck, S. A. Stanford, et al., Astrophys. J. **518**, 61 (1999).
99. N. S. Soboleva, Thesis for a Doctor of Sciences degree (Special Astrophysical observatory, S.Petersburg branch, 1992).
100. M. Lacy, S. Rawlings, and P. J. Warner, Mon. Not. R. Astron. Soc. **256**, 404 (1992).
101. F. N. Owen and R. A. White, Mon. Not. R. Astron. Soc. **249**, 164 (1991).
102. L. I. Gurvits, K. I. Kellermann, and S. Frey, Astron. Astrophys. **342**, 378 (1999).
103. H. Chen and B. Ratra, Astrophys. J. **582**, 586 (2003).
104. S. Podariu and B. Ratra, Astrophys. J. **532**, 109 (2000).
105. E. J. Guerra, R. A. Daly, and L. Wan, Astrophys. J. **544**, 659 (2000).
106. R. A. Daly and E. J. Guerra, Astron. J. **124** , 1831 (2002).
107. J. N. Hewitt, E. L. Turner, D. P. Schneider, et al., Nature **333**, 537 (1988).

108. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).
109. J. N. Hewitt, E. L. Turner, B. F. Burke, et al., in *Observational Cosmology. Beijing, Proc. IAU Symp.* (1987), 124, 747.
110. K.-H. Chae, A. D. Biggs, R. D. Blandford, et al., Phys. Rev. Lett. **89o**, 1301 (2002).
111. C. S. Kochanek, Astrophys. J. **466**, 638 (1996).
112. A. R. Cooray, Astron. Astrophys. **342**, 353 (1999).
113. J. A. Peacock, 1999, in *Proceed. of the KNAW colloquium — The most distant radio galaxies, Amsterdam, October 1997* (1999), (ADS: 1999mdrg.conf..377).
114. J. A. Peacock, R. Jimenez, J. S. Dunlop, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **296**, 1089 (1998).
115. J. Dunlop, J. Peacock, H. Spinrad, et al., Nature **381**, 581 (1996).
116. J. J. Condon, Astrophys. J. **284**, 44 (1984).
117. C. A. Jackson and J. V. Wall, Mon. Not. R. Astron. Soc. **304**, 160 (1999).
118. V. K. Kapahi and V. K. Kulkarni, Astron. J. **99**, 1397 (1990).
119. J. Fielden, A. J. B. Downes, J. R. Allington-Smith, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **204**, 289 (1983).
120. J. J. Condon, Astrophys. J. **338**, 13 (1989).
121. E. M. Sadler, C. A. Jackson, R. D. Cannon, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **329**, 227 (2002).
122. C. Blake and J. Wall, Mon. Not. R. Astron. Soc. **329**, 37 (2002).
123. C. Blake and J. Wall, Mon. Not. R. Astron. Soc. **337**, 993 (2002).
124. C. J. Willot, S. Rawlings, M. J. Jarvis, K. M. Blundell, Mon. Not. R. Astron. Soc. **339**, 173 (2003).
125. I. Robinson, A. Schild, and E. L. Schucking, *Introduction to the book "Quasistellar Sources and Gravitational Collapse", Proc. of the First Texas Symp. on Relativistic Astrophysics*, Ed. by I. Robinson, A. Schild, and E. L. Schucking (The University of Chicago Press (Chicago and London), 1965).
126. V. A. Ambartsumian, Astron. J. **66**, 536 (1961).
127. V. A. Ambartsumian, in *Proceed. of IAU Symposium No. 29, Byurakan, May 4–12, 1966* (The Pubblishing House of the Academy of Sciences of Armenian SSR Yerevan, 1968), 11.
128. I.,S. Shklovskij, Astron. Zh. **37**, 945 (1960).
129. I. S. Shklovskij, Astron. Zh. **39**, 591 (1962).
130. I. S. Shklovskij, Astron. Zh. **40**, 972 (1963).
131. V. L. Ginzburg, Astron. Zh. **38**, 380 (1961).
132. N. S. Kardashev, A. D. Kuzmin, and S. I. Syrovatskij, Astron. Zh. **39**, 216 (1962).
133. N. S. Kardashev, Astron. Zh. **40**, 965 (1963).
134. G. M. Tovmasian and R. K. Shakhbazian, Izv. Armenian AS **14**, No. 5, 121 (1961).
135. H. M. Tovmassian and I. G. Moiseev, Aust. J. Phys. **20**, 715 (1967).
136. V. V. Vitkevich, in *Proceed. of the 6th Conference in Cosmology, June 5-7, 1957, Moscow, 94* (1959).
137. R. D. Dagkesamanskij (1996), `http://www.prao.psn.ru/russian/history/hist_7.html`
138. L. M. Gindilis, R. D. Dagkesamanskij, and A. D. Kuzmin, *Radioastronomy in the USSR* (Nauka, Moscow, 1988) [in Russian].
139. R. D. Dagkesamanskij and A. A. Korchak, Astron. Zh. **40**, 582 (1963).
140. V. S. Artyukh, V. V. Vitkevich, and R. D. Dagkesamanskij, Astron. Zh. **44**, 984 (1967).
141. V. S. Artyukh, R. D. Dagkesamanskij, V. V. Vitkevich, and V. N. Kozhukhov, Astron. Zh. **45**, 712 (1968).
142. R. D. Dagkesamanskij, Astrofisika **5**, 297 (1969).
143. R. D. Dagkesamanskij, Thesis for a Doctor of Sciences degree (1998).
144. H. Steppe and Gopal–Krishna, Astron. Astrophys. **135**, 39 (1984).
145. V. K. Kapahi and V. K. Kulkarni, Astron. Astrophys. **165**, 39 (1986).
146. V. I. Slysh, Nature **199**, 682 (1963).
147. V. N. Kurilchik, Astron. Zh. **42**, 1138 (1965).
148. V. N. Kurilchik, Astron. Zh. **43**, 3 (1966).
149. V. N. Kurilchik, Astron. Zh. **47**, 787 (1970).
150. V. N. Kurilchik, Astron. Zh. **47**, 1157 (1970).
151. V. F. Zakharenkov, N. L. Kaidanovskij, Yu. N. Parijskij, and V. A. Prozorov, Astron. Zh. **40**, 216 (1963).
152. Yu. N. Parijskij and G. M. Timofeeva, Astron. Zh. **41**, 3 (1964).
153. Iu. N. Parijskij and V. A. Prozorov, Izv. GAO **23**, 9 (1964).
154. V. Ya. Golnev and Yu. N. Parijskij, Astron. Zh. **42**, 305 (1965).
155. S. Iskudarian and Yu. N. Parijskij, Izv. GAO **24**, 175 (1967).
156. Yu. N. Parijskij and N. S. Soboleva, Pis'ma Astron. Zh. **6**, 67 (1980).
157. N. Soboleva and Yu. Parijskij, in *Proceed. of IAU Symp. No. 97*, Ed. by D. S. Heeschen and C. M. Wade (Reidel Publ.Comp., 1982), 33.
158. Yu. N. Parijskij, Astron. Zh. **45**, 279 (1968).
159. V. I. Puzanov, A. E. Salomonovich, and K. S. Stankevich, Astron. Zh. **44**, 1129 (1967).
160. S. A. Pelyushenko and K. S. Stankevich, Astron. Zh. **46**, 283 (1969).
161. K. S. Stankevich, Astron. Zh. **51**, 216 (1974).
162. A. McKellar, Publ. Astron. Soc. Pac. **53**, 233 (1941).

163. I. D. Novikov, *Evolution of the Universe* (Nauka, Moscow, 1990) [in Russian].
164. G. B. Field, and J. L. Hitchcock, Astrophys. J. **146**, 1 (1966).
165. P.Thaddeus and J. F. Clauser, Phys. Rev. Lett. **16**, 819 (1966).
166. Yu. N. Parijskij, Astron. Zh. **47**, 1322 (1972).
167. Yu. N. Parijskij, Astron. Zh. **50**, 673 (1973).
168. Yu. N. Parijskij, Astron. Zh. **50**, 453 (1973).
169. Yu. N. Parijskij, Astrophys. J. **180L**, 47 (1973).
170. M. J. Rees, Astrophys. J. **153**, L1 (1968).
171. Yu. N. Parijskij and T. B. Pyatunina, in *Proceed. of the All-Union Conference in radioastronomy* (Riga, 1968).
172. T. B. Pyatunina, Astrofiz. Issled. (Izv. SAO) **3**, 128 (1971).
173. A. Franceschini, S. Vercellone, and A. Fabian, Mon. Not. R. Astron. Soc. **297**, 817 (1998).
174. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Yu. N. Parijskij, et al., Astron. Zh. **72**, 437 (1995).
175. A. I. Kopylov, V. M. Goss, Yu. N. Parijskij, et al., Astron. Zh. **72**, 613 (1995).
176. D. V. Korolkov and Yu. N. Parijskij, Sky and Telescope **57**, 324 (1979).
177. Yu. N. Parijskij and D. V. Korolkov, in *Itogi nauki i tekhniki, Astronomy* (Moscow, VINITI, 1986), **31** 73.
178. Ya. B. Zeldovich and I. D. Novikov, Astron. Zh. **44**, 663 (1967).
179. Ya. B. Zeldovich and I. D. Novikov, *Structure and evolution of the Universe*, (Nauka, Moscow, 1975) [in Russian].
180. N. A. Zabotin and P. D. Naselskij, Astron. Zh. **59**, 447 (1982).
181. Naselskij P.D., Astrofizika **18**, 216 (1983).
182. A. A. Starobinsky, Pis'ma Astron. Zh. **4**, 155 (1978).
183. A. A. Starobinsky, Phys. Lett. B **91**, 99 (1980).
184. A. A. Starobinsky, ZhETF, Pisma v Redaktsiyu **37**, 55 (1983).
185. A. A. Starobinsky, Sov. Astron. Let. **9**, No.5, 302 (1983).
186. A. D. Linde, in *The very early Universe (A85-11126 01-90)* (Cambridge University Press, 1983), 205.
187. A. D. Linde, Nuovo Cimento, Lettere, Serie 2 **39**, 401 (1984).
188. E. K. Conklin and R. N. Bracewell, Nature **216**, 777 (1967).
189. Yu. N. Parijskij and T. B. Pyatunina, Astron. Zh. **47**, 1337 (1970).
190. Yu. N. Parijskij, *Large-scale structure of the Universe*, Ed. by M. Longair and Ya. Einasto (Mir, 1981), 348 [in Russian].
191. Yu. N. Parijskij, Z. E. Petrov, and L. N. Cherkov, Pis'ma Astron. Zh. **3**, 483 (1977).
192. Yu. N. Parijskij and R. A. Syunyaev, *Cosmology: theory and observations*, Ed. by Ya. B. Zeldovich and I. D. Novikov (Mir, 1978), 222 [in Russian].
193. A. B. Berlin, E. V. Bulaenko, V. Y. Golnev, et al., Pis'ma Astron. Zh. **7**, 290 (1982), Soviet Astronomy Letters **7**, 161 (1982).
194. A. B. Berlin, E. V. Bulaenko, V. V. Vitkovsky, et al., in *Proceed. of the Symposium, Kolymbari, Greece, August 30-September 2, 1982 (A84-13653 03-90)* (Dordrecht and Boston, D. Reidel Publishing Co., 1983), 121, Discussion, 123, 124.
195. A. B. Berlin, L. G. Gassanov, V. Ya. Golnev, et al., Radioelektronika **7**, 1268 (1982).
196. A. N. Korzhavin, Astrofiz. Issled. (Izv. SAO) **9**, 71 (1977).
197. G. Dautcourt, Astrophys. J., Lett. **3**, L15 (1969).
198. A. G. Doroshkevich, Ya. B. Zeldovich, and I. D. Novikov, Astron. Zh. **44**, 295 (1967).
199. Yu. N. Parijskij, A. A. Starobinsky, and A. V. Chepurnov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **56**, 561 (1992).
200. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, A. B. Berlin, et al., Astron. Zh. **79**, 583 (2002).
201. W. M. Goss, Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, et al., Astron. Zh. **69**, 673 (1992).
202. J. N. Douglas, F. N. Bash, G. W. Torrence, and C. Wolf, Publications in Astronomy, The University of Texas, **17** (1980).
203. J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozyan, et al., Astron. J. **111**, 1945 (1996).
204. N. S. Soboleva, V. M. Goss, O. V. Verkhodanov, et al., Pis'ma Astron. Zh. **26**, No. 10, 723 (2000).
205. Yu. N. Parijskij, in *Proceed. of the NATO Advanced Study Institute, December 5-16, 1999, in Erice, Etta Majorana Centre, Italy*, Ed. by Norma G. Snchez (Kluwer Academic Publishers, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, 2001), ISBN 0-7923-6855-X, 219.
206. O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, A. A. Starobinsky, et al., in *Modern problems of extragalactic astronomy, Abstr. 19th conf. 25-27 April, Puschino, PRAO* (2002), `http://www.astro.spbu.ru/P2002/`.
207. O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, and A. A. Starobinsky, (submitted to Pis'ma Astron. Zh., 2003).
208. G. Bruzual and S. Charlot, Astrophys. J. **405**, 538 (1993).
209. Yu. N. Parijskij, V. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Astron. Zh. **75**, No. 4, 483 (1998).
210. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Astron. Astrophys. Trans. **18**, 437 (1999).

211. Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, A. I. Kopylov, et al., Pis'ma Astron. Zh. **26**, No. 7, 493 (2000).
212. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Astron. Astrophys. Trans. **19**, No. 3-4, 297 (2000), astro-ph/0005240.
213. T. Pursimo, K. Nilsson, P. Teerikorpy, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **134**, 505 (1999), astro-ph/9811265.
214. S. N. Dodonov, Yu. N. Parijskij, V. M. Goss, et al., Astron. Zh. **76**, No. 5, 323 (1999).
215. O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **48**, 41 (1999), astro-ph/9910559.
216. O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, et al., Astron. Astrophys. Trans. **19**, No. 3-4, 536 (2000), astro-ph/9912499.
217. O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **52**, 5 (2001), astro-ph/0203522.
218. O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, et al., Astron. Zh. **79**, No. 7, 589 (2002).
219. V. R. Amirkhanian, A. G. Gorshkov, A. A. Kapustkin, et al., Astron. Tsirk. **1099**, 1 (1980).
220. V. R. Amirkhanian, A. G. Gorshkov, A. A. Kapustkin, et al.,, Astron. Tsirk. **1137**, 1 (1980).
221. A. G. Gorshkov, M. G. Larionov, and M. V. Popov, Astron. Zh. **1**, 19 (1975).
222. A. G. Gorshkov and V. K. Konnikova, Pis'ma Astron. Zh. **7**, 215 (1981).
223. A. G. Gorshkov, Astron. Zh. **68**, 1121 (1991).
224. S. Ia. Braude, A. V. Megn, S. L. Rashkovskii, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **54**, 37 (1978).
225. S. Ia. Braude, A. V. Megn, K. P. Sokolov, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **64**, 73 (1979).
226. S. Ia. Braude, A. P. Miroshnichenko, K. P. Sokolov, and N. K. Sharykin, Astrophys. J., Suppl. Ser. **74**, 409 (1981).
227. S. Ia. Braude, N. K. Sharykin, K. P. Sokolov, and S. M. Zakharenko, Astrophys. J., Suppl. Ser. **111**, 1 (1985).
228. S. Ya. Braude, K. P. Sokolov, and S. M. Zakharenko, Astrophys. J., Suppl. Ser. **213**, 1 (1994).
229. S. Y. Braude, S. L. Rashkovsky, K. M. Sidorchuk, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **280**, 235 (2002).
230. K. P. Sokolov, Pis'ma Astron. Zh. **12**, 259 (1986).
231. R. D. Dagkesamanskij and I. M. Zheleznykh, ZhETF **50**, 233 (1989).
232. S. S. Komissarov and A. G. Gubanov, Astron. Astrophys. **285**, 27 (1994).
233. I. A. Strukov and D. P. Skulachev, Pis'ma Astron. Zh. **10**, 3 (1984).
234. A. A. Klypin, I. A. Strukov, and D. P. Skulachev, Mon. Not. R. Astron. Soc. **258**, 71 (1992).
235. I. V. Gosachinsky, V. K. Dubrovich, S. P. Zhelenkov, et al., Astron. Zh. **79**, 601 (2002).
236. V. K. Dubrovich, Pis'ma Astron. Zh. **3**, 243 (1977).
237. P. J. E. Peebles, Publ. Astron. Soc. Pac. **111**, 274 (1999).
238. Yu. N. Parijskij, *Project "Cosmological Gene of the Universe"* (1999), `http://www.sao.ru/Doc-k8/Science/science.html`

NON-GAUSSIANITY OF THE DERIVED MAPS FROM THE FIRST-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE DATA*

Lung-Yih Chiang[1], Pavel D. Naselsky[1,2], Oleg V. Verkhodanov[1,3], Michael J. Way[1,4]

[1]Theoretical Astrophysics Center, Juliane Maries Vej 30, DK-2100, Copenhagen, Denmark
[2]Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark
[3]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia
[4]NASA Ames Research Center, Space Science Division, Moffett Field, CA 94035

We present non-Gaussianity testing on recently-released derived maps from the first-year *WMAP* data by Tegmark, de Oliveria-Costa and Hamilton. Our test is based on a phase mapping technique which has the advantage of testing non-Gaussianity at separate multipole bands. We show that their foreground-cleaned map is against the random-phase hypothesis at all 4 multipole bands centered around $\ell = 150$, 290, 400 and 500. Their Wiener-filtered map, on the other hand, is Gaussian for $\ell < 250$, and marginally Gaussian for $224 < \ell < 350$. However, we see the evidence of non-Gaussianity for $\ell > 350$ as we detect certain degrees of phase coupling, hence against the random-phase hypothesis. Our phase mapping technique is particularly useful for testing the accuracy of component separation methods.

Keywords: cosmology: cosmic microwave background, observations — methods: data analysis

1. INTRODUCTION

With the first-year data release of the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (*WMAP*) [13,14], it has been proclaimed that we have entered the era of "precision cosmology". The temperature fluctuations of the cosmic microwave background (CMB) radiation are believed to be the imprint of primordial density fluctuations in the early Universe which give rise to the large-scale structures we see today. Hence the data enable us to test the statistical character of the primordial fluctuations, making subsequent inferences on the topology and content of the Universe.

Although the *WMAP* team [3] claims that the signal is Gaussian with 95% confidence level (CL), the internal linear combination map released by the *WMAP* team is not up for CMB studies due to "complex noise properties"[1]. Another group led by M. Tegmark has performed an independent foreground cleaning from the first-year *WMAP* data and made public their whole-sky CMB maps. Their foreground-cleaned map (FCM) and the Wiener-filtered map (WFM) are available online [4].

The FCM by the authors' definition is such that the foreground contamination is removed as much as possible. As foregrounds are rather non-Gaussian, any residual after cleaning would manifest itself in the phase configuration. In this *Letter* we display the phases of the FCM and the WFM with color coding and implement our phase-mapping technique to test quantitatively the Gaussianity of both maps, based on the random-phase hypothesis of homogeneous and isotropic Gaussian random fields. Our phase mapping technique can play a crucial role as a qualitative criterion for component separation similar to the field of image reconstruction.

2. GAUSSIAN RANDOM FIELDS AND THE RANDOM PHASE HYPOTHESIS

The statistical characterization of temperature fluctuation of CMB radiation on a sphere can be expressed as a sum over spherical harmonics:

$$\Delta T(\theta,\varphi) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\varphi), \qquad (1)$$

*Lung-Yih Chiang, Pavel D. Naselsky, Oleg V. Verkhodanov, and Michael J. Way, Non-Gaussianity of the derived maps from the first-year *WMAP* data, The Astrophysical Journal, 590, Number 2, L65-L68, 2003 June 20. DOI: https://doi.org/10.1086/381249. © AAS. Reproduced with permission.

[1]http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/m_products.html

where $a_{\ell m} = |a_{\ell m}| \exp(i\phi_{\ell m})$. Homogeneous and isotropic Gaussian random fields (GRFs), as a result of the simplest inflation paradigm, possess Fourier modes whose real and imaginary parts are independently distributed. In other words, they have phases $\phi_{\ell m}$ that are independently distributed and uniformly random on the interval [0,2π] [5, 6]. Thus the spatial variations should constitute a *statistically homogeneous and isotropic GRF* [5] whose statistical properties are completely specified by its angular power spectrum C_ℓ,

$$\langle a_{\ell m} a^*_{\ell' m'} \rangle = C_\ell \, \delta_{\ell\ell'} \delta_{mm'}. \qquad (2)$$

The strict definition of a homogeneous and isotropic GRF requires that the amplitudes are Rayleigh distributed and the phases are random [7]. At the same time, the Central Limit Theorem guarantees that a superposition of a large number of Fourier modes with random phases will be Gaussian. Therefore, the random-phase hypothesis on its own serves as a definition of Gaussianity [5].

3. COLOR-CODED PHASE MAP OF THE DERIVED *WMAP* MAPS

Tegmark in [8] (TDH03) perform an independent foreground analysis from the *WMAP* data and provide a FCM and WFM. We first use a visual display of phases by colors to show phase associations [9]. In color image display devices, each pixel represents the intensity and color at that position in the image. Two color schemes are usually used for the quantitative specification of color, namely the Red-Green-Blue (RGB) and Hue-Saturation-Brightness (HSB) color schemes. Hue is the term used to distinguish between different basic colors (blue, yellow, red and so on). Saturation refers to the purity of the color, defined by how much white is mixed with it. Brightness indicates the overall intensity of the pixel on a grey scale. The HSB color model is particularly useful because of the properties of the "hue" parameter, which is defined as a circular variable. Therefore we are mapping phases from 0 to 2π to the hue circle.

We have used the HEALPIX [2] package to produce $a_{\ell m}$. In fig. 1 we show the color-coded phase gradient $D_\ell \equiv \phi_{\ell+1,m} - \phi_{\ell,m}$ for the FCM and WFM. The vertical axis is the multipole ℓ up to $\ell = 600$ and the horizontal the m axis where $m \leq \ell$. Due to the relation $a_{\ell m} = a^*_{\ell,-m}$, only modes from non-negative m are shown. Although the phase gradient (from neighboring modes) is the most primitive way of qualitatively checking phase correlations, the apparent presence of stripes shown in the FCM indicates strong coupling between modes of neighboring ℓ of the same m.

[2] http://www.eso.org/science/healpix/

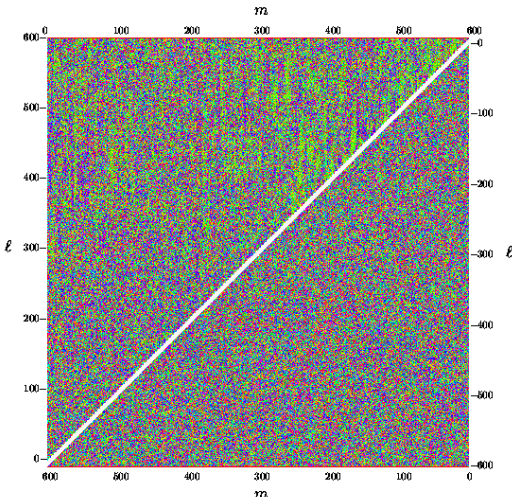


Fig. 1. Color-coded phase gradient D_ℓ for the FCM (top left triangle) and the WFM (bottom right). The vertical axis is the ℓ up to $\ell = 600$ and horizontal the m axis. Due to the relation $a_{\ell,m} = a^*_{\ell,-m}$, we only show modes from non-negative m. Although the phase gradient (from neighboring modes) is the most primitive, the stripes shown from the FCM indicate strong phase correlation between modes of neighboring ℓ of the same m.

4. PHASE MAPPING AND THE MEAN CHI-SQUARE STATISTIC OF THE DERIVED MAPS

To test the Gaussianity of the FCM and the WFM based on the random-phase hypothesis, we apply a phase mapping technique [10, 11] to quantify the degree of "randomness" of the phases (i.e. Gaussian). The return map of phases is a bounded square in which all phase pairs of fixed separation $(\Delta m, \Delta\ell)$ are mapped as points (see fig. 2). For example, one single return map for phase pairs with separation $(\Delta m, \Delta\ell) = (0,1)$ contains points with (x,y) coordinate $(\phi_{\ell,m}, \phi_{\ell+1,m})$, i.e. all phase pairs from modes that are separated by $\Delta\ell = 1$. If the phases are random, we expect to have an ensemble of return maps of all possible separations, each of which should be a scatter plot. As such we are testing the 'randomness' on the most strict terms. After mapping phase pairs on to a return map, we can apply a *mean* χ^2 statistic on the return map, which is defined as

$$\overline{\chi^2} = \frac{1}{M} \sum_{i,j} \frac{\left[p(i,j) - \overline{p}\right]^2}{\overline{p}}, \qquad (3)$$

where M is the number of pixels on the return map, $\overline{p}$ is the mean value for each pixel on the discretized return map. Chiang in [11] have shown that for a homogeneous and isotropic GRF, return mapping of

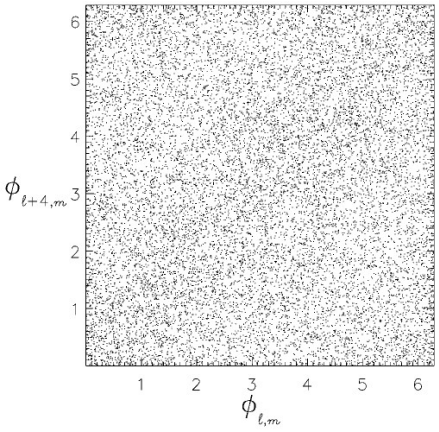


Fig. 2. Example of a return map for $(\Delta m, \Delta\ell) = (0,4)$ of phases $\phi_{\ell,m}$ of the FCM where $41 < \ell < 250$. The $\overline{\chi^2}$ of this return map is 0.0332 when it is discretized into 128^2 pixels with smoothing scale $R = 2$.

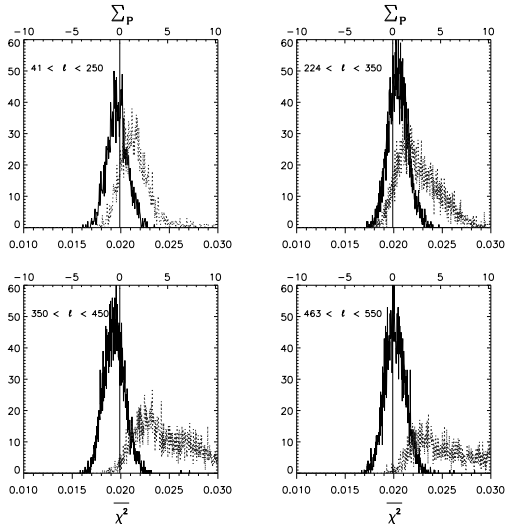


Fig. 3. Histograms of $\overline{\chi^2}$ statistic for the FCM (dotted gray curves) and the WFM (solid dark curves) at different multipole ranges ℓ. One of the advantages of the phase mapping technique is that it enables us to check non-Gaussianity for different multipole ranges. The top horizontal axis is annotated in terms of the theoretical dispersion Σ_p of GRFs with origin set at the expectation value $\langle\overline{\chi^2}\rangle_p = (4\pi R^2)^{-1}$ (vertical line in each panel). The smoothing scale on the $M = 128^2$ discretized return map is $R = 2$.

phases results in an ensemble of return maps, each with a Poisson distribution. The expectation value of the $\overline{\chi^2}$ from such ensembles of Poisson-distributed maps is

$$\langle\overline{\chi^2}\rangle_p = \frac{1}{4\pi R^2}, \tag{4}$$

where R is the scale of smoothing from a 2D Gaussian convolution in order to probe the spatial structure. The $\overline{\chi^2}_p$ will have a statistical spreading around $\langle\overline{\chi^2}\rangle_p$ with a dispersion Σ_P where

$$\Sigma_p^2 = \frac{1}{\pi^3 R^2 (M/2)}. \tag{5}$$

Fig. 3 shows the histograms of the $\overline{\chi^2}$ statistics from the ensemble of the return maps of the FCM and the WFM for 4 multipole bands. One of the advantages of phase mapping technique is that we are able to check Gaussianity in different multipole bands, in particular those corresponding to foreground contamination and noise. Here we present the $\overline{\chi^2}$ statistic at 4 bands centered around $\ell \simeq 150$, 290, 400 and 500: $41 < \ell < 250$ (roughly the first Doppler peak), $224 < \ell < 350$, $350 < \ell < 450$ and $463 < \ell < 550$. The solid dark and dotted gray curves are the WFM and FCM, respectively. In each panel the vertical line denotes the expectation value $\langle\overline{\chi^2}\rangle_p = (4\pi R^2)^{-1}$. The curves from the FCM are obviously skewed, and hence are manifestations of phase correlations (i.e. non-Gaussian).

In fig. 4 we display the gross behavior of the distribution curves in terms of the arithmetic mean $\langle\overline{\chi^2}\rangle$ and the dispersion Σ from the mean chi-square statistic. The top panel is from the FCM and the bottom WFM. The contours mark 68% (solid curve) and 95% (dotted curve) CL regions from 2000 realizations of GRFs. The symbols corresponds to 4 multipole bands centered at $\ell \simeq 150$, 290, 400 and 500. Note that the contour region in the bottom panel corresponds to a small section in the top panel. The phases of the 4 multipole bands from the FCM are all strongly correlated, so they are far away from the 95% CL region. The WFM, however, shows that phases below the first Doppler peak are random, with the other 3 multipole bands around the edge of 68% CL region.

We see evidence of non-Gaussianity, however, in the WFM of the following two bands centered $\ell \simeq 400$ and 500. In the lower two panels of fig. 3 there are points appearing at the tails above $6\Sigma_p$. On the other hand, among the 2000 realizations we simulate for GRFs, *no* mapping of phases reaches $\overline{\chi^2}$ value over $6\Sigma_p$, setting the probability below 0.05% for a GRF to have such mapping. Phase mapping from the separation $(\Delta m, \Delta\ell) = (0,2)$ produces $\overline{\chi^2}$ value at $7.3\Sigma_p$ for the multipole band centered $\ell \simeq 400$, also at $6.5\Sigma_p$ at $(\Delta m, \Delta\ell) = (1,2)$. For the band $\ell \simeq 500$, $7.6\Sigma_p$ appears at $(\Delta m, \Delta\ell) = (2,2)$. These phase couplings are clear signs against the random-phase hypothesis, therefore a manifestation of non-Gaussianity.

We plot in fig. 5 the CMB temperature map from only two multipoles $\ell = 350$ and 352 (of all m) of

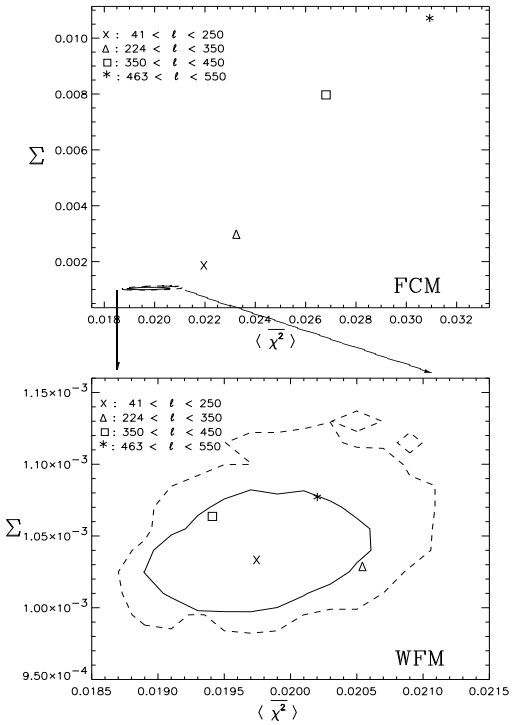


Fig. 4. The mean chi-square statistic from the FCM (top) and WFM (bottom) against 2000 realizations of GRFs, which is displayed in terms of the arithmetic mean $\langle\overline{\chi^2}\rangle$ and the dispersion Σ of their distribution curves. The contours mark 68% (solid curve) and 95% (dotted curve) CL regions from 2000 realizations of GRFs. Although 68% and 95% denotes 1 and 2-σ deviation in Gaussian statistics, the distribution is not *Gaussian* but rather chi-square. The cross, triangle, square, and asterisk symbols denote $\overline{\chi^2}$ statistic from multipole ranges centered $\ell \simeq 150$, 290, 400 and 500, respectively. Note that the contour region in the bottom panel corresponds to a small section in the top panel.

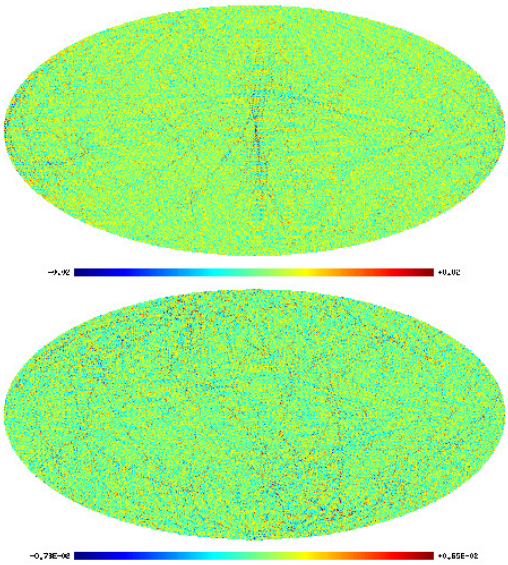


Fig. 5. CMB temperature from two multipoles $\ell = 350$ plus 352 of the FCM (top) and the WFM (bottom). These two multipole modes are chosen because of the pronounced coupling between modes $\Delta\ell = 2$ of all m. The structures at $\varphi \simeq 0$ and π shown in the FCM disappear after Wiener filtering, from which it is marginally Gaussian at these two multipoles.

the FCM and WFM. The choice of these specific multipoles of $\Delta\ell = 2$ from our previous calculation is to demonstrate non-Gaussian signals the correlated phases will produce in the map. The structures at $\varphi \simeq 0$ and π in the FCM, the residual signal after foreground cleaning, disappear after Wiener filtering.

5. DISCUSSIONS

In this *Letter* we have tested non-Gaussianity of two maps: the Foreground-cleaned map and the Wiener-filtered map, which are processed by TDH03 from the *WMAP* data. Based on the random-phase hypothesis, we use a phase mapping technique to yield a statistic that has detected considerable non-Gaussian signals for both maps at most multipole bands. Our phase mapping technique is particularly useful in separating non-Gaussian contributions from different sources when various contaminations are present at different ℓ ranges. A multipole band which is considerably non-Gaussian could have an insignificant non-Gaussian contribution in the whole map and still produce an over-all Gaussian realization within a certain confidence level. As the uncertainties in foreground cleaning propagate through the data-processing pipelines to the accuracy of the angular power spectrum, it is therefore necessary to have effective methods in component separation. We believe that our phase mapping technique is a useful criterion to be incorporated into such methods. Our statistic based on phase mapping also holds great advantage when it comes to the issue of creating many whole-sky Gaussian realizations for Gaussian statistics. As our null hypothesis is that phases are random, we only need to put random phases (with Gaussian instrumental noise being automatically included) for each harmonic mode, which is easily done without any limit on the highest harmonic number ℓ from any pixelization scheme. It is worth mentioning that the upcoming *Planck* mission will have higher sensitivity

and resolution, hence every step of data processing will be crucial in reaching such precision.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was supported by Danmarks Grundforskningsfond through its support for the establishment of the Theoretical Astrophysics Center. We thank Max Tegmark et al. for providing their processed maps and making them public with openness. We thank Peter Coles and Max Tegmark for useful discussions. We also acknowledge the use of HEALPIX package [12] to produce $a_{\ell m}$ and fig. 5.

BIBLIOGRAPHY

1. C. L. Bennett, M. Bay, M. Halpern, et al., Astrophys. J. **583**, 1 (2003).
2. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0203208.
3. E. Komatsu, A. Kogut, M. R. Nolta, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 119 (2003), astro-ph/0203223.
4. M. Tegmark, (2003), `http://www.hep.upenn.edu/œmax/wmap.html`
5. J. M. Bardeen, J. R. Bond, N. Kaiser, and A. S. Szalay, Astrophys. J. **304**, 15 (1986).
6. J. R. Bond and G. Efstathiou, Mon. Not. R. Astron. Soc. **226**, 655 (1987).
7. P. I. R. Watts and P. Coles, Mon. Not. R. Astron. Soc. **338**, 806 (2003).
8. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, Phys. Rev. D, submitted (2003), astro-ph/03022496.
9. P. Coles and L.-Y. Chiang, Nature **406**, 376 (2000).
10. L.-Y. Chiang, P. Coles, and P. D. Naselsky, Mon. Not. R. Astron. Soc. **337**, 488 (2002), astro-ph/0207584.
11. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, and P. Coles, (2002), astro-ph/0208235.
12. K. M. Górski, E. Hivon, and B. D. Wandelt, in *Proceedings of the MPA/ESO Cosmology Conference "Evolution of Large-Scale Structure"*, Ed. by A. J. Banday, R. S. Sheth and L. Da Costa (Print Partners Ipskamp, NL, 1999).
13. C. L. Bennett, M. Bay, M. Halpern, et al., Astrophys. J. **583**, 1 (2003).
14. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0203208.

PHASE CROSS-CORRELATION OF THE WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE INTERNAL LINEAR COMBINATION MAP AND FOREGROUNDS*

Pavel D. Naselsky[1,2,3], Andrey G. Doroshkevich[1], Oleg V. Verkhodanov[1,2]

[1]Theoretical Astrophysics Center, Juliane Maries Vej 30, DK-2100, Copenhagen, Denmark
[2]Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark
[3]Rostov State University, Space Research Department, Zorge,5, 344091 Russia
[4]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia

We present a circular cross-correlation tests for the phases of the Internal Linear Combination Map (ILC) and *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* foregrounds for all K–W frequency bands at the range of multipoles $\ell \leq 50$. We have found significant deviations from the expected Poissonian statistics for the ILC and the foregrounds phases. Our analysis shows that the low multipole range of the ILC power spectrum contains some of the foregrounds residues.

Keywords: cosmology: cosmic microwave background, observations — methods: data analysis

1. INTRODUCTION

The recently-published Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (*WMAP*) data sets (see [1–3], [4, 5]) strongly promote the development of the high sensitive statistics for testing of the properties of the derived foregrounds and foreground cleaned maps ([6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]). The *WMAP* team produces the Internal Linear Combination (ILC) map and maps for the foregrounds (synchrotron, free-free, dust emission) for each K–W bands which are the basis for our analysis. Homogeneous and isotropic CMB Gaussian random fields, as a result of the simplest inflation paradigm, is a crucial test for the early stages of the cosmological expansion. Because of the pronounced non-Gaussianity of the foregrounds it would be natural to expect that possible non-Gaussianity of the ILC and other cleaned maps derived from the *WMAP* data would reflect directly contamination of the foregrounds at different levels.

In this Letter we present the result of a statistical test of the coupling the ILC map and the foreground taking from the *WMAP* data[1]. The test is based on the circular cross-correlations analysis of the ILC and foregrounds phases. Our method complementing the mentioned above ones, exploits a natural assumption that phases of the "true" CMB signal should not correlate with the phases of the foregrounds[2]. This allows us to detect significant ILC–"W band foregrounds" cross-correlations. These peculiarities determine the accuracy of the power spectrum estimation for the ILC map and the statistical properties of the ILC signal. We would like to point out that the detected non-Gaussianity of the ILC map (see for example, [14], [15], [16]) is most likely related with foreground contaminations (see also [8]) produced most likely by the Galactic dust emission.

2. ILC AND FOREGROUNDS PHASE CORREALTIONS

The basic idea of the phase analysis of the CMB maps was proposed and discussed in [17], [18], [19], chiang2003, [13], [20].

The CMB signal from can be expressed as a sum

*Pavel D. Naselsky, Andrey G. Doroshkevich, Oleg V. Verkhodanov, Phase cross-correlation of the *WMAP* ILC map and foregrounds, The Astrophysical Journal, 599, Number 2, L53-L56, 2003 Decemper 20. DOI: https://doi.org/10.1086/376822. © AAS. Reproduced with permission.

[1]see http://lambda.gsfc.nasa.gov

[2][13] have shown that for any linear separations of the CMB signal and foregrounds, the phases of derived CMB signal should be correlate with the foreground phases at different level depending on separation technic.

over spherical harmonics:

$$\Delta T(\theta,\varphi) = \sum_{\ell=0}^{\infty}\sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\varphi), \qquad a_{\ell m} = |a_{\ell m}|\exp(i\Psi_{\ell m}), \quad (1)$$

where $a_{\ell m}$ are the coefficients of expansion, $|a_{\ell m}|$ is the modulus and $\Psi_{\ell m}$ is the phase of each $a_{\ell m}$ harmonic. Homogeneous and isotropic CMB Gaussian random fields (GRFs), as a result of the simplest inflation paradigm, possess Fourier modes whose real and imaginary parts are independently distributed. The statistical properties of GRF are completely specified by its angular power spectrum C_ℓ,

$$C(\ell,\ell',m,m') = \langle a_{\ell m} a^*_{\ell' m'}\rangle = \langle |a_{\ell m}||a_{\ell' m'}|\rangle \langle \exp\left(i(\Psi_{\ell m} - \Psi_{\ell' m'})\right)\rangle = C(\ell)\delta_{\ell\ell'}\delta_{mm'} \quad (2)$$

where the angle means averaging over the modulus and phase distribution functions. In fig. 1 we plot the cross-correlation of phases between the ILC map and the common foregrounds defined as a sum over synchrotron, free-free and dust emission maps for each frequency band[3].

As one can see from fig. 1 the distribution of the ILC map phases and corresponding foregrounds seems to be non-correlated one. However, in order to test such a distribution, for these phase diagram we will apply circular statistics ([21]) to investigate the possible cross-correlation quantitatively.

3. CORRELATIONS OF THE ILC AND FOREGROUNDS PHASES

Naselsky in [13] have shown that for linear methods of the foreground separation from the CMB signal we can expect to find some cross–correlations between the phases of the cleaned signal, ϕ_s, and the foregrounds, ψ_f, which can be used to characterize the degree of separation achieved. To do this, here we will use the circular correlation coefficients which reflect directly the 2π-phase periodicity.

For the K–W frequency band the maps were taking from the *WMAP* web site[4] and all the phases are obtained by the spherical harmonic decomposition using the HEALPix ([22]) and the GLESP ([23]) codes. We consider the ranges of multipoles, $2 \le \ell \le \ell_{\max} = 50$ for which the *WMAP* own foreground are presented in the *WMAP* web site. In addition to the *WMAP* foregrounds for each band we produce the five maps as a difference between signal (S) in the band and the ILC signal: $F = S - ILC$. We will call the F-map as the derived foreground. Let ψ and ϕ be the foreground and ILC phases, respectively, for a given value of ℓ and all the corresponding values of m. Following [21] we define the statistics

$$\begin{aligned} x_m = \cos(\psi_m), y_m = \sin(\psi_m), \\ \nu_m = \cos(\phi_m), \mu_m = \sin(\phi_m), \\ M_p = (1/\ell_{\max})\sum_{m}^{\ell_{\max}} \exp\left(ip(\phi_m - \langle\phi\rangle)\right), \\ \langle\phi\rangle = \tan^{-1}\left(\frac{\sum_m \mu_m}{\sum_m \nu_m}\right), \\ M1_p = (1/\ell_{\max})\sum_{m}^{\ell_{\max}} \exp\left(ip(\psi_m - \langle\psi\rangle)\right), \\ \langle\psi\rangle = \tan^{-1}\left(\frac{\sum_m y_m}{\sum_m x_m}\right), \\ R_{\rm sf}(\ell) = \ell^{-1}\sum_{m=1}^{\ell}\cos(\phi_m - \psi_m), \\ r_{\rm sf} = (\ell_{\max} - \ell + 1)^{-1}\sum_{\ell}^{\ell_{\max}} R_{\rm sf}(\ell) \end{aligned} \quad (3)$$

where M_p and $M1_p$ are the p-th trigonometric moments of the phase samples, $\langle\phi\rangle$ and $\langle\psi\rangle$ are the corresponding mean directions of the samples, $R_{\rm sf}(\ell)$ is the circular cross-correlation coefficient in each mode ℓ and $r_{\rm sf}$ is the mean circular cross-correlation coefficient for all phases. For $m = 0$ and for all ℓ phases $\phi(\ell,0) = \psi(\ell,0) = 0$ and here we neglect them.

For the K–W bands the circular coefficients, $R_{\rm sf}(\ell)$ are plotted in fig. 2 for the ILC and its own foreground, and for the ILC and the derived foreground. As is seen from the fig. 2, for the first three channels these coefficients are quite moderate and do not exceed the random scatter (1σ) obtained from 200 random realizations. Note that, for all the bands, the shape of the functions $R_{\rm sf}(\ell)$ are quite similar to each other which reflects the strong corre[13]. As one can see from fig. 2, the cross-correlation of the ILC phases and the derived foreground seems to be more significant. The same tendency follows from the estimation of the mean coefficients, $r_{\rm sf}$, for $2 \le \ell \le 50$, listed in table 1 for the two samples of the foregrounds. As is expected, for the first three channels these coefficients are small but they become significant for channels V and W.

To test the sensitivity of circular statistics, we used the so called "WMAP simulator", in which we simulated the W band with all own *WMAP* foregrounds and the CMB signal with random phases instead of

[3]Hereafter we will use the term "foreground for" such a combinations of each component.

[4]`http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/m_products.cfm`

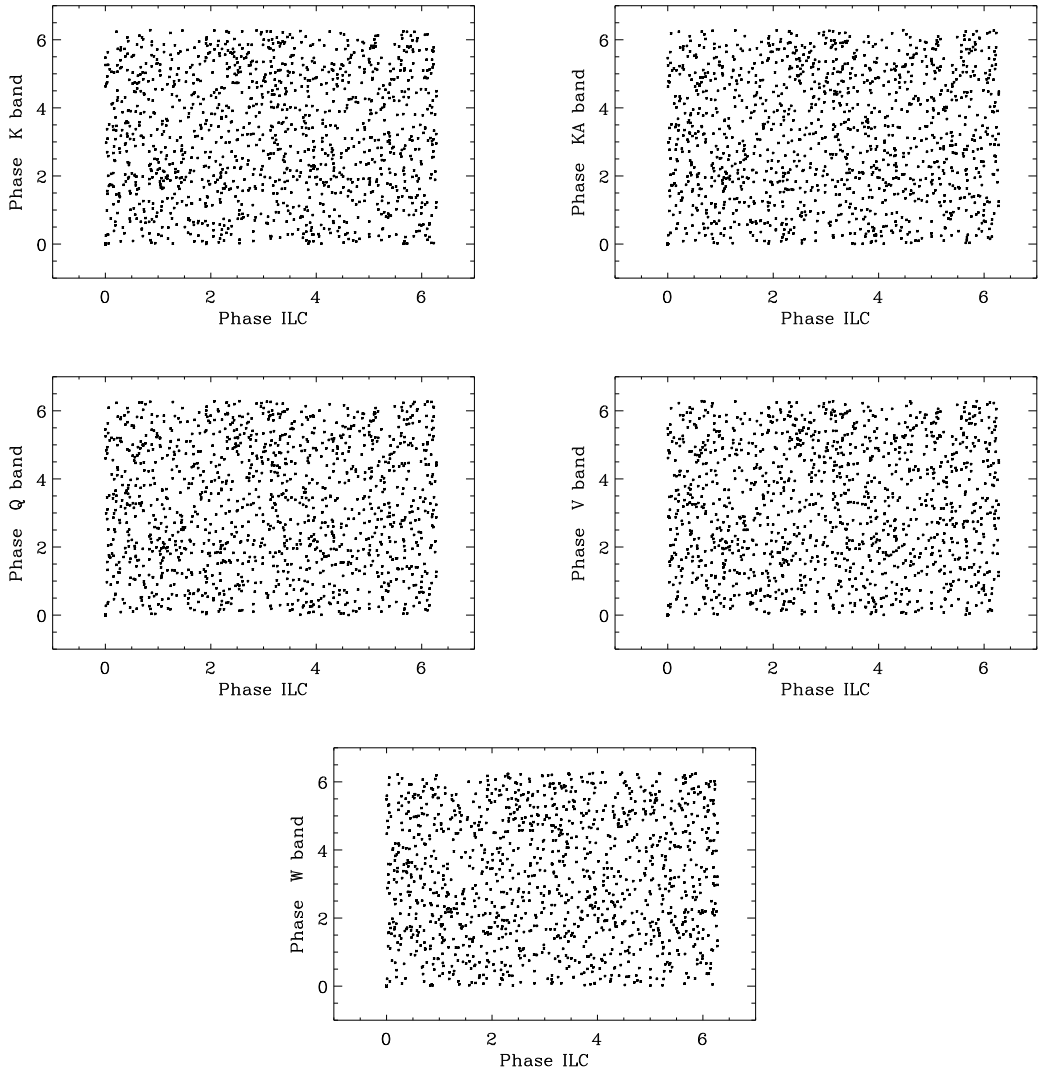


Fig. 1. Cross-correlation of phases for ILC and the K–W bands foregrounds. All the foreground maps and derived phases were taking from the *WMAP* web-site.

Table 1. Circular cross-correlation coefficients between phases of ILC and the *WMAP* own foregrounds (ILC_o) and the ILC and derived foregrounds (ILC_d).

	K	KA	Q	V	W
ILC_o	-0.026	-0.031	-0.030	-0.033	-0.033
ILC_d	-0.017	0.002	0.022	0.112	0.262

the ILC signal[5]. After that, we repeat the circular phase analysis in the same way as it was done for the ILC map. Our results are shown in fig. 3.

For the simulator, corresponding mean cross-correlation coefficients are $r_{\rm sf} = -0.036$ for the CMB–Foreground correlations and $r_{\rm sf} = -0.194$ for "wrong" foreground (actual signal minus simulated CMB), corresponds to the dashed line in fig. 3. Thus, if the CMB

[5]We used the best fit *WMAP* ΛCDM cosmological model from CMBfast in [24].

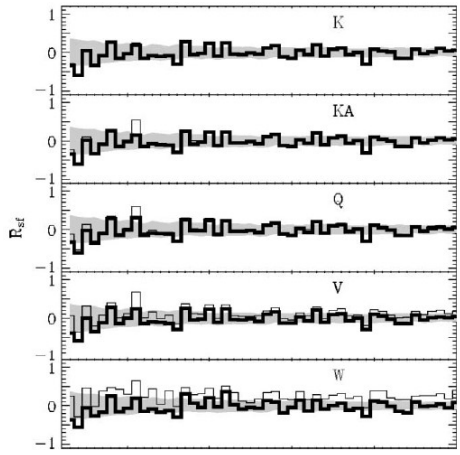


Fig. 2. Circular correlation coefficient between the cleaned signal and the foreground phases in V–W channels vs. the harmonic index, ℓ. The thick solid line corresponds to the *WMAP*'s own foreground. The thin solid line corresponds to derived foreground. The gray area represents 1σ error bars level taking from 200 random realizations.

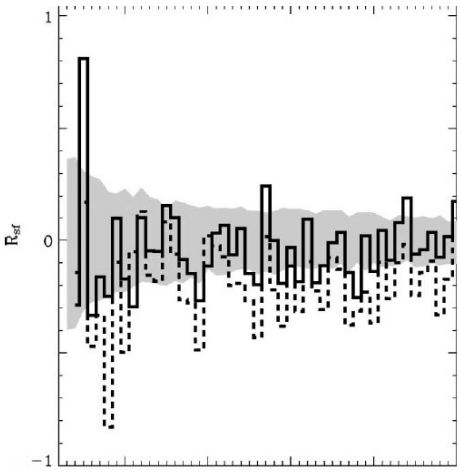


Fig. 3. $R_{\rm sf}$ for the "WMAP simulator". The thick solid line corresponds to the simulated random CMB signal, cross-correlated with *WMAP*'s own foreground. For the CMB and derived foregrounds we have the same curve. The dashed line is the cross-correlation between the foreground, defined as the W band signal minus the simulated CMB signal (not the ILC !), and the simulated CMB signal.

map and foreground are extracted correctly, corresponding mean cross-correlation coefficient should be less then statistical error ($\sim 5\%$), while the wrong foreground and CMB should have significant positive or negative bias. For the ILC map it means that a positive bias for $r_{\rm sf}$ for the V and W bands (see table 1) reflects directly the cross-correlation with the foreground phases.

4. CONCLUSION

The circular cross-correlation analysis for the ILC map and K–W foregrounds and shows that the ILC map has significant correlation with the derived foregrounds obtained by subtraction the ILC map from the V and W bands signals. Some of this correlations could be linked with non-Gaussianity of the ILC map detected by [10], [14], [16], [15]. For example, Vielva ([15]) has reported about characteristic scale of non-Gaussianity in order to 10°, which corresponds to $\ell \sim 10$. Our analysis shows that the cross-correlation coefficients $r_{\rm sf}$ at $\ell = 11$ have the highest maxima for both V and W bands. At high multipole range $\ell \sim 40$ corresponding peculiarities are above 95% confidential level. If we take into account that for $\ell \sim 40$ all $m \sim 35 - 40$ lies along Galactic plane in the map, we can conclude that they are related with the V and W bands signal at the same longitude. Some of the peculiarities need an additional investigation which would be published soon.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by Danmarks Grundforskningsfond through its support for the establishment of the Theoretical Astrophysics Center. We thank Max Tegmark et al. for providing their processed maps and making them public with openness. We thank Igor Novikov and Lung-Yih Chiang for useful discussions. We also acknowledge the use of HEALPIX [6] package healpix to produce $a_{\ell m}$ from *WMAP* maps the use of GLESP package of the TAC CMB collaboration.

BIBLIOGRAPHY

1. C. L. Bennett, M. Bay, M. Halpern, et al., Astrophys. J. **583**, 1 (2003).
2. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/020320.

[6] http://www.eso.org/science/healpix/

3. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0203208.
4. G. Hinshaw, E. Komatsu, A. Kogut, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 63 (2003).
5. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 135 (2003).
6. E. Komatsu, A. Kogut, M. R. Nolta, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 119 (2003), astro-ph/0203223.
7. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, Phys. Rev. D, submitted (2003), astro-ph/0302496.
8. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. J. Way, Astrophys. J. **590**, 65 (2003), astro-ph/0303643.
9. P. Dineen and P. Coles, Mon. Not. R. Astron. Soc., accepted (2003), astro-ph/0306529.
10. C.-G. Park, Mon. Not. R. Astron. Soc., submitted (2003), astro-ph/0307469.
11. E. Gaztanaga, J Wagg, T. Multamaki, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc., accepted (2003), astro-ph/0304178.
12. W. N. Colley and J. R. Gott, Mon. Not. R. Astron. Soc. **344**, 686 (2003), astro-ph/0303020.
13. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, L.-Y. Chiang, and I. D. Novikov, Astrophys. J., submitted (2003), astro-ph/0310235.
14. H. K. Eriksen, F. K. Hansen, A. J. Banday, et al., Astrophys. J., submitted (2003), astro-ph/0307507.
15. P. Vielva, E. Martinez-Gonzalez, R. B. Barreiro, et al., Astrophys. J., submitted (2003), astro-ph/0310273.
16. P. Coles, P. Dineen, J. Earl, and D. Wright, Mon. Not. R. Astron. Soc., submitted (2003), astro-ph/0310252.
17. L.-Y. Chiang and P. Coles, Mon. Not. R. Astron. Soc. **311**, 809 (2000), astro-ph/9905250.
18. P. D. Naselsky, D. I. Novikov, and J. Silk, Mon. Not. R. Astron. Soc. **335**, 550 (2002).
19. L.-Y. Chiang, P. Coles, and P. D. Naselsky, Mon. Not. R. Astron. Soc. **337**, 488 (2002), astro-ph/0207584.
20. T. Matsubara, Astrophys. J. **591**, L79 (2003), astro-ph/0303278.
21. R. Fisher, *Statistical Analysis of Circular Data* (Cambridge University Press, Cambridge, 1993).
22. K. M. Górski, E. Hivon, and B. D. Wandelt, in *Proceedings of the MPA/ESO Cosmology Conference "Evolution of Large-Scale Structure"*, Ed. by A. J. Banday, R. S. Sheth and L. Da Costa (Print Partners Ipskamp, NL, 1999).
23. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Astron. Astrophys., submitted (2003), astro-ph/0305537.
24. U. Seljak and M. Zaldarriaga, Astrophys. J. **469**, 437 (1996), astro-ph/9603033.

PRIMORDAL MAGNETIC FIELD AND NON-GAUSSIANITY OF THE 1-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE *(WMAP)* DATA*

Pavel D. Naselsky[1], Lung-Yih Chiang[1], Poul Olesen[1], Oleg V. Verkhodanov[2]

[1]Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark
[2]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia

Alfvén turbulence caused by statistically isotropic and homogeneous primordial magnetic field induces correlations in the cosmic microwave background (CMB) anisotropies. The correlations are specifically between spherical harmonic modes $a_{\ell-1,m}$ and $a_{\ell+1,m}$. In this paper we approach this issue from phase analysis of the CMB maps derived from the *WMAP* data sets. Using circular statistics and return phase mapping we examine phase correlation of $\Delta\ell = 2$ for the primordial non-Gaussianity caused by the Alfvén turbulence at the epoch of recombination. Our analyses show that such specific features from the power-law Alfvén turbulence do not contribute significantly in the phases of the maps and could not be a source of primordial non-Gaussianity of the CMB.

Keywords: cosmology: cosmic microwave background, observations — methods: data analysis

1. INTRODUCTION

After the release of the 1-year *WMAP* data for analysis [1–5], one of the most exciting area of investigation is in the statistical characterization of the CMB signal. After the *WMAP* science team's report on the observational constraint on the quadratic non-Gaussianity of the anisotropy of the CMB [6], [7–15] have reported detections of non-Gaussianity by various methods for the CMB maps derived from the *WMAP* data. Unfortunately, the origin of such non-Gaussian features, detected by different methods, is still unknown. In [7, 9, 10, 13], they point out that the non-Gaussian features might come from the foregrounds, whereas [14] argue in favor of systematic effects. Moreover, different methods detect various properties of non-Gaussian features from localized peculiar spots [11] to global north-south asymmetry in the *WMAP* signal and COBE map as well [16].

There is another point of view on the issue of the *WMAP* non-Gaussianity. It comes from the theory of turbulence in magnetohydrodynamics (MHD). Using the so-called extended self-similarity (ESS) method, [17, 18] point out that the statistical properties of angular increments $\delta T_r = T(\boldsymbol{R} + \boldsymbol{r}) - T(\boldsymbol{R})$, where $\boldsymbol{r}$ is the vector connecting two pixels $\boldsymbol{R} + \boldsymbol{r}$ and $\boldsymbol{R}$ of the map, have the following relation in MHD: $\langle|\delta T_r|^p\rangle \sim r^{\xi_p}$ for high order moments $p = 4, 6 \dots 12$. For those moments, the ESS is clearly detected both in the COBE and the *WMAP* data : $\langle|\delta T_r|^p\rangle \sim \langle\delta T_r^4\rangle^{\xi_p}$ where $\xi_p = p/8 + 1 - (1/2)^{p/4}$. Moreover, in [19–23] it was shown that primordial magnetic field, one of the most significant relics from inflation, can generate vorticity of Alfvén waves before and during the epoch of hydrogen recombination. It interacts with the CMB photons, producing non-adiabatic tail of the CMB anisotropy and polarization. Assuming statistical homogeneity and isotropy on primordial magnetic field, it is shown that such Alfvén turbulence shall have non-Gaussian properties, because of quadratic dependence of the vorticity amplitude on the magnetic strength $\boldsymbol{B}$. Namely, such a magnetic field induces correlation between the $a_{\ell-1,m}$ and $a_{\ell+1,m}$ multipole coefficients of the CMB temperature anisotropy expansion by the spherical harmonics.

An intriguing issue then follows: has *WMAP* observed the cosmological Alfvén turbulence? Recently this issue is discussed in chen, which exploits the correlations between $a_{\ell-1,m}$ and $a_{\ell+1,m}$ of the CMB caused by the vorticity of Alfvén waves in order to put constraints on the strength of the magnetic field: $|\boldsymbol{B}| < 15$ nG for the spectral power index $n = -5$, and $|\boldsymbol{B}| < 1.7$ nG for the spectral

*Pavel D. Naselsky, Lung-Yih Chiang, Poul Olesen, Oleg V. Verkhodanov, Primordial magnetic field and non-Gaussianity of the 1-year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* data, The Astrophysical Journal, 615, Issue 1, P. 45-54, 2004 November 1. DOI: https://doi.org/10.1086/424477.
© AAS. Reproduced with permission.

power index $n = -7$.

In this paper we discuss this issue from another aspect: could the detected non-Gaussianity from the *WMAP* data be related to the Alfvén turbulence? The basic idea is that even if the Alfvén turbulence is small in amplitude in the CMB signal, it shall manifest itself in the *WMAP* maps between the phases $\phi_{\ell-1,m}$ and $\phi_{\ell+1,m}$. Phase correlation between Fourier modes has been investigated in relation to large-scale structure formation of the universe [24–26] and also applied as a test on non-Gaussianity [7,8,27] based on the random phase hypothesis as a practical definition of Gaussian random fields [28,29]. phspointsource use neighboring phase correlations to extract extragalactic point sources.

Assuming that the CMB signal is composed of pure Gaussian signal and sub-dominant vorticity tail, we use circular statistics on phases for such a signal in order to place constraint on the power spectrum of Alfvén turbulence at each multipole number ℓ. We will show that circular statistics allow us to decrease contamination of the dominant (Gaussian) part of the signal in order to investigate possible contamination from the non-Gaussian sub-dominant part.

2. CIRCULAR STATISTICS OF THE ALFVÉN TURBULENCE

For statistical characterization of temperature fluctuations on a sphere we express each signal (either CMB or foreground components) as a sum over spherical harmonics:

$$\Delta T(\theta,\varphi) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}| e^{i\phi_{\ell m}} Y_{\ell m}(\theta,\varphi), \quad (1)$$

where $|a_{\ell m}|$ and $\phi_{\ell m}$ are the moduli and phases of the coefficients of the expansion.

Homogeneous and isotropic CMB Gaussian random fields (GRFs), as a result of the simplest inflation paradigm, possess Fourier modes whose real and imaginary parts are Gaussian and mutually independent. The statistical properties are then completely specified by its angular power spectrum $C_\ell^{\rm CMB}$,

$$\langle a_{\ell m}^{\rm CMB} (a_{\ell' m'}^{\rm CMB})^* \rangle = C_\ell^{\rm CMB}\, \delta_{\ell\ell'} \delta_{mm'}. \quad (2)$$

In other words, from the Central Limit Theorem their phases

$$\Psi_{\ell m}^{\rm CMB} = \tan^{-1} \frac{\Im(a_{\ell m}^{\rm CMB})}{\Re(a_{\ell m}^{\rm CMB})} \quad (3)$$

are randomly and uniformly distributed at the range $[0,2\pi]$. We hereafter denote with G as the pure Gaussian tail of the CMB signal. For the combined signal

$$a_{\ell m} = G_{\ell m} + V_{\ell m}, \quad (4)$$

where $G_{\ell m}$ is the Gaussian tail and $V_{\ell m}$ is the vortex tail. We can write down

$$a_{\ell m} = |a_{\ell m}| \exp(i\Psi_{\ell m}), \quad (5)$$

where

$$|a_{\ell m}|^2 = |G_{\ell m}|^2 + |V_{\ell m}|^2 + 2|G_{\ell m}||V_{\ell m}| \cos(\Psi_{\ell m}^G - \Psi_{\ell m}^V);$$

$$\tan \Psi_{\ell m} = \frac{|G_{\ell m}| \sin \Psi_{\ell m}^G + |V_{\ell m}| \sin \Psi_{\ell m}^V}{|G_{\ell m}| \cos \Psi_{\ell m}^G + |V_{\ell m}| \cos \Psi_{\ell m}^V} \quad (6)$$

and $\Psi_{\ell m}^G$, $\Psi_{\ell m}^V$ are the phases of Gaussian and vortex at the (ℓ, m) harmonics, respectively.

In [20] (hereafter DKY) it is shown that for the CMB anisotropy produced by the Alfvén turbulence, the properties of the power spectrum and phases are different from the adiabatic modes, which corresponds to the Gaussian tail of the signal. Namely, for the power spectrum $C_\ell(m) = \langle a_{\ell m} a_{\ell m}^* \rangle$ and the autocorrelator $D_\ell(m) = \langle a_{\ell-1,m} a_{\ell+1,m}^* \rangle$ from DKY we get

$$C_\ell(m) = A \frac{\Gamma(-n-1)\Gamma(\ell + n/2 + 3/2)}{\Gamma(-n/2)^2 \Gamma(\ell - n/2 + 1/2)} \times \frac{2\ell^4 + 4\ell^3 - \ell^2 - 3\ell + (6 - 2\ell - 2\ell^2)m^2}{(2\ell - 1)(2\ell + 3)};$$

$$D_{\ell(m)} = \frac{2A}{|n+1|} \frac{(\Gamma(-n-1)\Gamma(\ell + n/2 + 3/2)}{\Gamma(-n/2)^2 \Gamma(\ell - n/2 + 1/2)} (\ell - 1)(\ell + 2) \times \left[\frac{(\ell + m + 1)(\ell - m + 1)(\ell + m)(\ell - m)}{(2\ell - 1)(2\ell + 1)^2 (2\ell + 3)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

where A is the normalization constant and $-7 \le n \le -1$ is the power spectral index of the Alfvén turbulence. Below we discuss the models with $n = -3$, -5 and -7, for which the mean power spectrum over m direction in eq. (7) are $\overline{C}_\ell$, $\overline{D}_\ell \propto \ell^{n+3}$. Note that the model of $n = -5$ corresponds to the power spectrum $\overline{C_\ell} \propto \ell^{-2}$, which at the multipole range of $5 < \ell < 20$ has the same feature as that of the CMB for adiabatic perturbation. For the model of $n = -7$, on the other hand, the power of vertex tail is $\overline{C_\ell} \propto \ell^{-4}$ and increase rapidly if $\ell \to 0$, which is typical for the diffuse extragalactic foregrounds. For $n = -3$ the vertex power $\overline{C_\ell} \sim$ const mimic the power of extragalactic point source component. Therefore, simple statistics based on the estimation of the $\overline{D}_\ell$-th moment from the *WMAP* data is potentially misleading, because of possible contribution from such kind of foregrounds as sub-dominant components to the signal.

The method we propose in this paper is based on the statistical characterization: non-Gaussianity of the vortex part of the CMB signal and related with correlation of the phases of $(\ell-1,m),(\ell+1,m)$ harmonics. The correlation vanishes for pure Gaussian CMB signal, whereas it is significant for the vortex component. We therefore, introduce some specific functions of phases which minimize the contribution from non-correlated Gaussian signal and maximize the non-Gaussian tail of the phases. For this purpose we use trigonometric moment statistics to counter the circular nature of phases ([31], see also [9]). Let us define the following trigonometric moments:

$$\boldsymbol{C}(\ell)=\frac{1}{\ell-1}\sum_{m=1}^{\ell-1}\cos(\Psi_{\ell-1,m}-\Psi_{\ell+1,m});$$

$$\boldsymbol{S}(\ell)=\frac{1}{\ell-1}\sum_{m=1}^{\ell-1}\sin(\Psi_{\ell-1,m}-\Psi_{\ell+1,m});$$

$$r^2(\ell)=\boldsymbol{C}^2(\ell)+\boldsymbol{S}^2(\ell);$$

$$R=\frac{1}{\ell_{\max}-\ell_{\min}+1}\sum_{\ell_{\min}}^{\ell_{\max}}r(\ell), \tag{8}$$

The reason for such statistics is clear. Simple algebra leads to the following properties of the phases:

$$\begin{aligned}\cos(\Psi_{\ell-1,m}-\Psi_{\ell+1,m})=&\\ |g_{\ell-1,m}||g_{\ell+1,m}|\cos(\Psi^G_{\ell-1,m}-\Psi^G_{\ell+1,m})&\\ +|v_{\ell-1,m}||v_{\ell+1,m}|\cos(\Psi^V_{\ell-1,m}-\Psi^V_{\ell+1,m})&\\ +|g_{\ell-1,m}||v_{\ell+1,m}|\cos(\Psi^G_{\ell-1,m}-\Psi^V_{\ell+1,m})&\\ +|g_{\ell+1,m}||v_{\ell-1,m}|\cos(\Psi^G_{\ell+1,m}-\Psi^V_{\ell-1,m})&\end{aligned} \tag{9}$$

where $|g_{\ell m}|=|G_{\ell m}|/|a_{\ell m}|$,$|v_{\ell m}|=|V_{\ell m}|/|a_{\ell m}|$. As one can see from eq. (9) the first term is proportional to $D_\ell(m)=\langle a_{\ell-1,m}a^*_{\ell+1,m}\rangle$ moment for the pure Gaussian tail of the signal, which should be vanish, the second term is $D_\ell(m)$ for the vortex, and last two terms correspond to correlations between G and V, which should be statistically negligible after summation over m. If the vortex component is subdominant, then in eq. (6) and eq. (9) $|V_{\ell m}|\ll|G_{\ell m}|$ for all ℓ,m and $|a_{\ell m}|$ is given by eq. (6). This means that $|g_{\ell m}|\simeq 1$ and $|v_{\ell m}|\ll 1$. However, because of finite number of m-modes and especially for low ℓ-range, correlations can manifest themselves between $(\ell-1,m)$, $(\ell+1,m)$ harmonics. In order of magnitude this effect can be estimated by the following way. For pure Gaussian signal with non-correlated phases $\phi_{\ell m}$ one obtains

$$\frac{1}{\ell}\sum_{m=1}^{\ell}\cos\phi_{\ell m}\simeq\frac{1}{\sqrt{\ell}};\qquad\frac{1}{\ell}\sum_{m=1}^{\ell}\sin\phi_{\ell m}\simeq\frac{1}{\sqrt{\ell}}. \tag{10}$$

Then, for the moduli $|a_{\ell m}|$ from eq.(6) one gets

$$\begin{aligned}|a_{\ell m}|^2\simeq|G_{\ell m}|^2+|V_{\ell m}|^2&\\ \text{if } |V_{\ell m}|\gg|G_{\ell m}|/\sqrt{\ell};&\\ |a_{\ell m}|^2\simeq|G_{\ell m}|^2+2|G_{\ell m}||V_{\ell m}|\cos(\Psi^G_{\ell m}-\Psi^V_{\ell m}),&\\ \text{if } |V_{\ell m}|\ll|G_{\ell m}|/\sqrt{\ell}.&\end{aligned} \tag{11}$$

For the asymptotic $|V_{\ell m}|\gg|G_{\ell m}|/\sqrt{\ell}$,

$$\begin{aligned}\boldsymbol{C}(\ell)\sim\frac{1}{\sqrt{\ell}}-\frac{1}{\ell^{\frac{3}{2}}}\sum_m\frac{|V_{\ell-1,m}||V_{\ell+1,m}|}{|G_{\ell-1,m}||G_{\ell+1,m}|}+&\\ +\frac{1}{\ell}\sum_m\frac{|V_{\ell-1,m}||V_{\ell+1,m}|}{|G_{\ell-1,m}||G_{\ell+1,m}|}\cos(\Psi^V_{\ell-1,m}-\Psi^V_{\ell+1,m}).&\end{aligned} \tag{12}$$

For the correlated phases of the vortex component, the last term in eq. (12) is larger than the second and, if $\Psi^V_{\ell-1,m}\simeq\Psi^V_{\ell+1,m}$, then

$$\boldsymbol{C}(\ell)\sim\frac{1}{\sqrt{\ell}}+\frac{\overline{D}_\ell}{\overline{G}^2_\ell}, \tag{13}$$

where $\overline{G}^2_\ell$ is the power spectrum of the Gaussian tail.

For highly correlated vortex perturbations, therefore, the contribution to the $\boldsymbol{C}$ function is significant if $(\overline{D}_\ell/\overline{G}^2_\ell)\sqrt{\ell}\geq 1$. At $\ell=100$, $(\overline{D}_\ell/\overline{G}^2_\ell)\geq 0.1$, which is exactly the DKY criterion for estimation of the magnetic field amplitude for different values of the spectral index n. However, if the observable data sets covering the range of multipoles up to the Silk damping scale ℓ_d for the vortex perturbations, $\ell_d\sim 500$ [20], then non-Gaussian features could be detectable for $(\overline{D}_\ell/\overline{G}^2_\ell)\geq 0.045$. Moreover, one interesting feature comes from power spectral index dependence of the vortex perturbations mentioned above. For $n=-7$, $\overline{D}_\ell\propto\ell^{-4}$, while $\overline{G}^2_\ell$ has the same asymptotic ℓ^{-2} as the ΛCDM *WMAP* best fit model at $5<\ell<30$. For that model of the power index, the most stringent constraint should come from statistics of the low multipoles from the *WMAP* data, then from high multipole range $\ell\sim\ell_d$ and simple estimator could be $6-7$ times bigger than in DKY: $(\overline{D}_\ell/\overline{G}^2_\ell)\sim 0.6-0.7$.

We would like to point out that the above-mentioned properties of the $\boldsymbol{C}$-statistics provide natural explanations in terms of the cosmic variance limit of error bars for any CMB experiments. Assuming no systematic effect present in the data, for low multipoles $\ell<100$ the cosmic variance limit corresponds to $\delta C_\ell/C_\ell\simeq(f_{\rm sky}\ell)^{-1/2}$, where $f_{\rm sky}$ is the sky coverage of the observation. The whole sky *WMAP* coverage gives $f_{\rm sky}=1$. If some part of the CMB power spectrum is related to vortex perturbations, then [23]

$$C_\ell=\overline{G}^2_\ell+\overline{C}_\ell\sim\overline{G}^2_\ell+|n+1|\left[\frac{\Gamma(-\frac{n+1}{2})}{\Gamma(-\frac{n}{2})}\right]^2\overline{D}_\ell. \tag{14}$$

Using the definition $\delta C_\ell/C_\ell = (C_\ell - \overline{G}_\ell^2)/\overline{G}_\ell^2$, which corresponds to the contribution of the vortex perturbations to the power spectrum, we have the following threshold of detectability

$$|n+1|\left[\Gamma(-\frac{n+1}{2})/\Gamma(-\frac{n}{2})\right]^2 \frac{\overline{D}_\ell}{\overline{G}_\ell^2} > \frac{1}{\sqrt{\ell}}, \qquad (15)$$

which is in perfect agreement with our estimation eq. (13).

Let us briefly discuss the properties of the $\boldsymbol{S}$-statistics. Similar to eq. (9) one can prove that $\sin(\Psi_{\ell-1,m} - \Psi_{\ell+1,m})$ is given by eq. (9) with transition from cosine to sine function. However, because of sin dependency, if phases of the non-Gaussian tail are highly correlated, we have degradation of the $|v_{\ell-1,m}||v_{\ell+1,m}|\sin(\Phi^V_{\ell-1,m} - \Phi^V_{\ell+1,m})$ term, even if $|V_{\ell m}| \gg |G_{\ell m}|/\sqrt{\ell}$. So, if the phases of the vortex perturbations $(\Psi^V_{\ell-1,m} - \Psi^V_{\ell+1,m})$ are highly correlated, for the $\boldsymbol{S}$ statistics we get $\boldsymbol{S} \sim 1/\sqrt{\ell}$. Thus, the presence of vertex perturbation (as all non-Gaussian signals) in the CMB data manifest itself as asymmetry of the $\boldsymbol{C}$-$\boldsymbol{S}$ statistics, while for the pure Gaussian signals it should be symmetrical one. In order of magnitude this asymmetry for each mode ℓ is

$$A(\ell) = \frac{\boldsymbol{S}(\ell)}{\boldsymbol{C}(\ell)} = \frac{1}{1+\sqrt{\ell}(\overline{D}_\ell/\overline{G}_\ell^2)} \ll 0.5, \qquad (16)$$

for highly correlated phases of vortex perturbations. Addition to eq. (16) we can define global asymmetry of the signal

$$A_g = \left|\frac{\sum_\ell \boldsymbol{S}(\ell)}{\sum_\ell \boldsymbol{C}(\ell)}\right|. \qquad (17)$$

In terms of circular statistical variables [31], this global asymmetry corresponds to the mean angle $\Theta = \tan^{-1} A_g$ for orientation of all harmonics (ℓ,m) in the CMB map. Needles to say, for vertex perturbations with $n = -5$ global asymmetry is expected to be in order of magnitude

$$A_g = \frac{1}{1+\frac{\overline{D}_\ell}{\overline{G}_\ell^2}\ell_{\max}}, \qquad (18)$$

and can be detectable, if $(\overline{D}_\ell/\overline{G}_\ell^2)\ell_{\max} \gg 1$. At the end of this section we would like to mention one peculiar asymptotic of the $A(\ell)$ and A_g parameters related with correlations of phases. From eq. (12) one can find that correlation $\Psi^V_{\ell-1,m} - \Psi^V_{\ell+1,m} = \pi/2, 3\pi/2$ leads to $A(\ell)$,$A_g > 1$. So any peaks of the function $A(\ell)$,$A_g \gg 1$ are the mark of $\pi/2, 3\pi/2$ correlations for the non-Gaussian tail of the CMB signal. Below in addition to definition eq. (8) we introduce the phase difference

$$D_{\ell m}(\Delta\ell) = \Psi_{\ell-\Delta\ell/2,m} - \Psi_{\ell+\Delta\ell/2,m} \qquad (19)$$

for even $\Delta\ell$ and

$$D_{\ell m}(\Delta\ell) = \Psi_{\ell+\Delta\ell,m} - \Psi_{\ell-\Delta\ell-1,m} \qquad (20)$$

for odd $\Delta\ell$ and corresponding circular moments $\boldsymbol{S}_{\Delta\ell}(\ell)$ and $\boldsymbol{C}_{\Delta\ell}(\ell)$ similar to eq. (8). These variables allow us to describe properties of the CMB phases for any $\Delta\ell$ separations of the modes.

3. CIRCULAR STATISTICS OF THE ILC, FC AND WCF MAPS DERIVED FORM THE *WMAP* DATA

In this section we apply the $\boldsymbol{S}$-, $\boldsymbol{C}$-statistics for the three high resolution whole-sky maps: the Internal Linear Combination Map (ILC) by the *WMAP* science team, the [32] foreground-cleaned map (FC) and the [32] Wiener-filtered map (WFC). The ILC and the FC maps are obtained from a weighted combination of the *WMAP* 5 maps at frequency 23, 33, 41, 61 and 94 GHz in order to separate the microwave foreground. The WCF is the map after foreground residue cleaning by Wiener filtering. All the maps formally claim resolution up to $\ell = 1024$, but none of them is correct for investigation of the CMB properties. The ILC map, as is mentioned at the *WMAP* website, is applicable for the foregrounds property investigation at the range of multipoles $\ell < 300$. The FC and WFC maps are smoothed for the multipole range $\ell > 300$ by a Gaussian window function and the CMB signal is completely erased by the smoothing. However, looking at the V and Q bands of the *WMAP* data and combining all the foregrounds (synchrotron, free-free, dust emission) and the point sources from the *WMAP* catalog, one can find that this map reproduces the CMB signal outside the Kp2 Galactic cut mask extremely well at the range of multipoles $\ell \leq 50$.

The FC and WFC maps have well-defined scale of smoothing in the image domain. However, smoothing does not change at all the phases of the signal even down to the limit $\ell = 1024$. So, using FC and WCF maps we can examine the phases at the whole range of multipoles. One additional reason for using the FC and WCF maps is that they are tested by ESS method, from which the manifestation of the Alfvén turbulence properties could be clearly seen [17,18].

In fig. 1 we plot for the three maps (ILC, FC and WCF) the $\boldsymbol{S}$-$\boldsymbol{C}$ phase diagrams for $\Delta\ell = (\ell+1) - (\ell-1) = 2$. For comparison we include the statistics of Gaussian random signal, which reproduce our expectation of the phase properties. From the second row in fig. 1 one can see that ILC phases perfectly reproduce the properties of Gaussian signal phases in terms of $\boldsymbol{S}(\ell)$, $\boldsymbol{C}(\ell)$ and $A(\ell)$ variables. One can

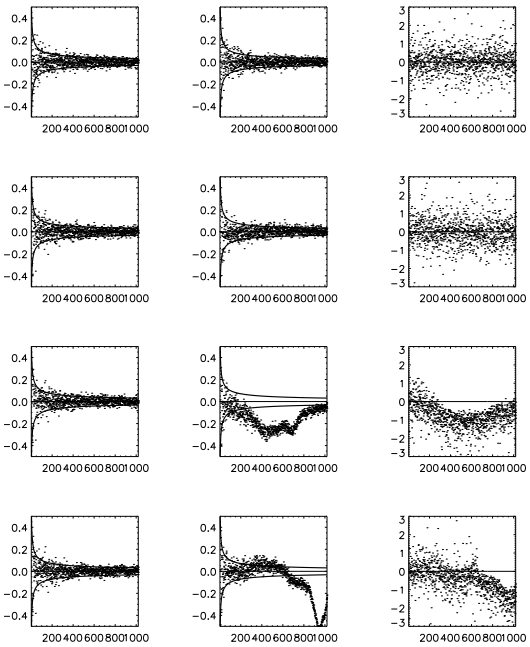


Fig. 1. Circular statistics on phase correlations with $\Delta\ell = 2$. The columns (from left to the right) correspond to $\boldsymbol{S}(\ell)$, $\boldsymbol{C}(\ell)$ and $\log A(\ell)$, respectively. The first row is for a Gaussian realization (random phases). The second row is the ILC map, the third the FC map and the last the WCF map.

see that on the third and the fourth row, which corresponds to the FC and WCF maps, starting from $\ell \sim 100$ the $\boldsymbol{S}$-$\boldsymbol{C}$ symmetry is broken, and while the $\boldsymbol{S}$ follows Gaussian statistics, its $\boldsymbol{C}$ and $A(\ell)$ appear non-Gaussian.

According to fig. 1, the phases of the FC and WCF maps are in agreement with the expectation, described in section 2. We have significant increase of the $\boldsymbol{C}$ statistics, while $\boldsymbol{S}$ statistics are nearly the same as for the Gaussian signal. However, next three Figures display clearly non-Gaussianity. Fig. 2 are the circular statistics $\boldsymbol{S}(\ell)$, $\boldsymbol{C}(\ell)$ and $A(\ell)$ for $\Delta\ell = 1$, and fig. 4 and fig. 3 are for $\Delta\ell = 3$ and $\Delta\ell = 4$ respectively. According to DKY, for all $\Delta\ell \neq 2$ the phases of the signal should not display any correlated features. One can also find remarkable symmetry in the FC and WCF maps between even and odd $\Delta\ell$ statistics (e.g. the $\boldsymbol{C}$ in fig. 1 and fig. 4 and the $\boldsymbol{S}$ in fig. 2 and fig. 3).

$$\begin{aligned} \mathrm{sign}\,\boldsymbol{C}_{\Delta\ell} &= \text{-sign}\,\boldsymbol{C}_2 \cos(\frac{\pi}{2}\Delta\ell), \text{for even } \Delta\ell \\ \mathrm{sign}\boldsymbol{S}_{\Delta\ell} &= \mathrm{sign}\,\boldsymbol{S}_1 \sin(\frac{\pi}{2}\Delta\ell), \text{for odd } \Delta\ell. \end{aligned} \quad (21)$$

This symmetry reflects the symmetry of the phases $D_{\Delta\ell}(\ell)$, namely

$$\Psi_{\ell+\Delta\ell/2,m} - \Psi_{\ell-\Delta\ell/2,m} = \frac{\pi}{2}\Delta\ell + \pi \quad (22)$$

for even $\Delta\ell$ and

$$\Psi_{\ell+\Delta\ell,m} - \Psi_{\ell-\Delta\ell-1,m} = \frac{\pi}{2}\Delta\ell \quad (23)$$

for odd $\Delta\ell$ and for all values of m.

4. NON-LINEAR STATISTICS

In this section in order to investigate the properties of non-Gaussianity, we apply non-linear statistics $r^2(\ell)$ for the ILC, FCM and WFC maps phases. From eq. (8) one obtains

$$r^2(\ell) = \frac{1}{\ell - 1} + \sum_m \sum_{n \neq m} \frac{\cos[D_{\ell m}(\Delta\ell) - D_{\ell n}(\Delta\ell)]}{(\ell-1)^2} \quad (24)$$

That means, that r-statistics are sensitive to m dependence of the phase difference for given values ℓ and $\Delta\ell$.

This statistic has well-defined properties. If the signal is highly correlated and $D_{\ell m}(\Delta\ell) \to 0$ then

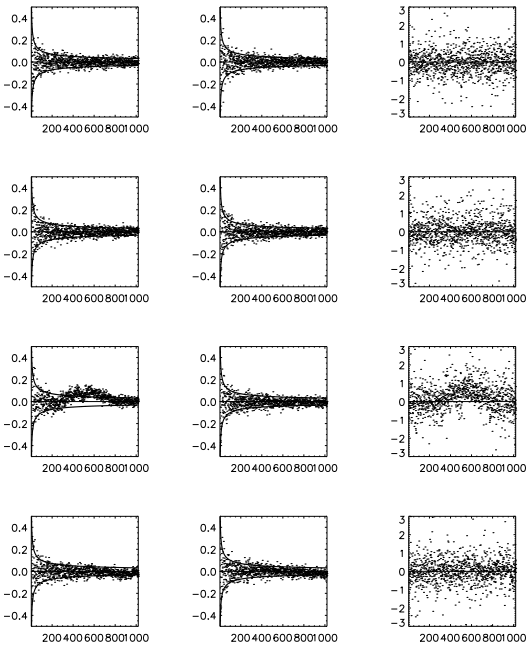


Fig. 2. The same as in fig.1, but for $\Delta\ell = 1$.

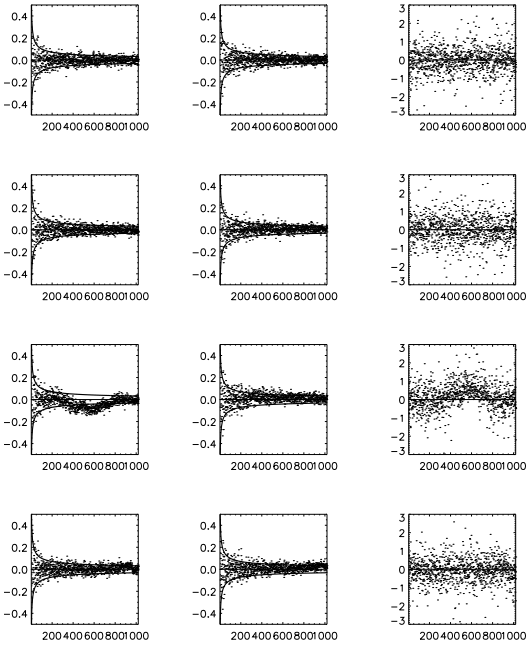


Fig. 3. The same as in fig.1, but for $\Delta\ell = 3$.

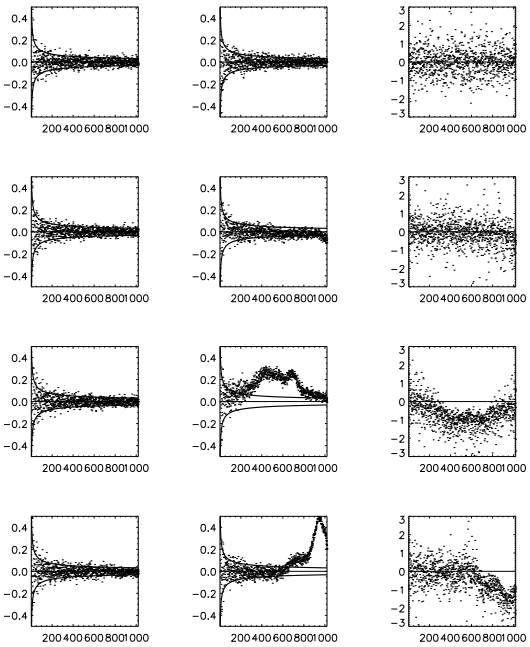


Fig. 4. The same as in fig.1, but for $\Delta\ell = 4$.

$r^2(\ell) \to 1$. If the phases are non-correlated, however, $r^2(\ell) \to \ell^{-1}$. In fig. 5 and 6 we plot $r^2(\ell)$ versus ℓ for the same model and the same order as in fig.1. For all even $\Delta\ell$ the corresponding $r^2(\ell)$ are similar to fig. 5 and for all odd $\Delta\ell$ the r^2 statistics follow fig. 6.

Like $\boldsymbol{S}$ and $\boldsymbol{C}$ statistics, $r^2(\ell)$ statistics reflect non-Gaussian features for $\Delta\ell = 1, 2, 3\ldots$, which allow us to conclude that non-Gaussianity of FC and WFC maps does not relate with the vortex turbulence at the epoch of recombination. Moreover, in the next Section we will show, how the symmetry of the $\boldsymbol{S}$ and $\boldsymbol{C}$ statistics allow us to detect the source of non-Gaussianity of FC and WFC maps.

5. LOCAL DEFECTS OF THE ILC, FC AND WFC MAPS

In order to detect the nature of the non-Gaussianity of the maps with different powers of signals, we will use the power filter $P(\ell) = 1/|a_{\ell m}|$, proposed by [33] and [34]. This linear filter transforms any maps with $a_{\ell m}$ coefficients of spherical harmonic expansions to maps with the same amplitude (= 1) at each mode ℓ,m, but preserving all the phases $\Psi_{\ell m}$ and their correlations.

$$N_{\ell m} = P(\ell) a_{\ell m} = \exp(i\Psi_{\ell m}) \qquad (25)$$

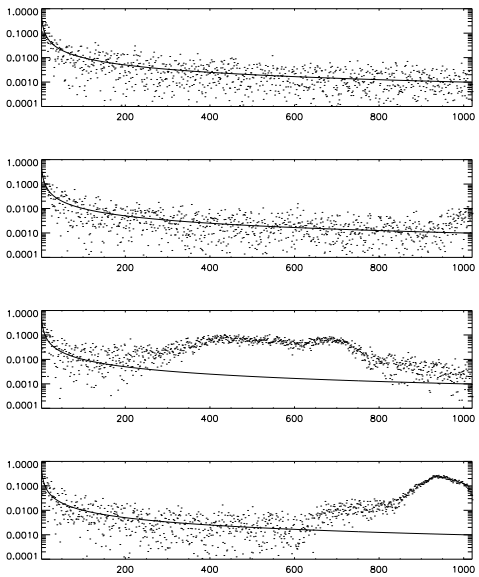


Fig. 5. The $r^2(\ell)$ statistics for $\Delta\ell = 2$ for (from top to bottom) a Gaussian random realization, ILC, FC and WCF maps, respectively. Solid line corresponds to $r^2(\ell) = \ell^{-1}$ asymptotic.

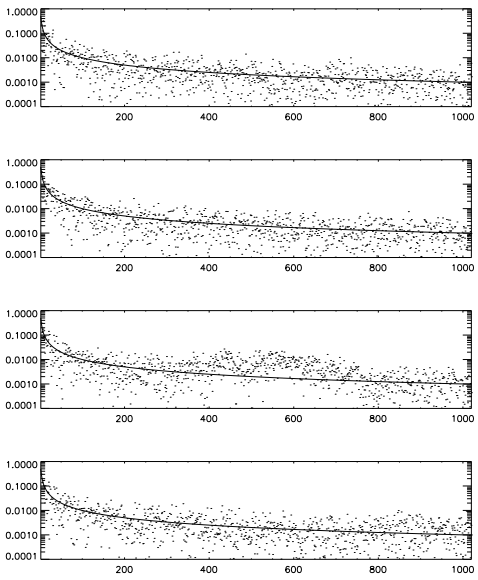


Fig. 6. Same as in fig. 5, but for $\Delta\ell = 1$.

In fig. 7 we plot the power filtered ILC, FC and WCF maps after power filtration for the range of multipoles up to $\ell = 1024$ in order to show how power filter allows us to detect some of the local defects of the maps close to the Galactic plane. In particular, one can easily see that there are defects in the ILC map which was originally obscured by the amplitudes $|a_{\ell m}|$. The clear cut features is obviously not of astrophysical origin. One crude guess for such peculiar shape in the middle of the ILC map is that the *WMAP* science team might have used a direct mask at the center of the map where there are pronounced contaminations from foregrounds and then used Wiener filtering, combining with the best-fit power spectrum, to recover the signal in that area. However, the morphology is related to phases [35] and such mask shall alter the morphology, which manifests itself in the phases. On the other hand, one can see foreground residues in both the FCM and WCF maps. Qualitatively speaking, these are clear signatures of non-Gaussianity.

Using eq. (25), one can easily visualize the $N_{\ell-\Delta\ell/2,m}N_{\ell+\Delta\ell/2,m}$ cros-correlations using simple definition

$$G_{\ell m}(\Delta\ell) = N_{\ell-\frac{\Delta\ell}{2},m}N^*_{\ell+\frac{\Delta\ell}{2},m} = \exp\left[iD_{\ell m}(\Delta\ell)\right] \tag{26}$$

For these maps the common features, like a small in size clusters, seems to be typical (corresponding statistics one can find in [10]). In order to show how local defects of the maps can produce corresponding features, let us introduce the following model of subdominant non-Gaussian signal. Suppose that we have a set of points (pixels) with coordinates θ_j,ϕ_j in which the signal looks like a combination of δ-functions

$$\Delta T_{loc}(\theta,\phi) = \sum_j A_j\delta(\phi-\phi_j)\delta(\cos\theta-\cos\theta_j), \tag{27}$$

where A_j are the amplitudes of defects. In order to obtain the corresponding $c_{\ell m}$ coefficients, we convolve ΔT from eq. (27) with conjugated spherical harmonics

$$\begin{aligned} c_{\ell m} &= \int_{-1}^{1} d(\cos\theta)\int_{-\pi}^{\pi} d\phi\Delta T_{loc}(\theta,\phi)Y^*_{\ell m}(\theta,\phi) \\ &= \sum_i A_i Y^*_{\ell m}(\theta_i,\phi_i) \end{aligned} \tag{28}$$

5.1. Pecularities of $\Delta\ell$-even statistics

To obtain the correlators for $\boldsymbol{S}$ and $\boldsymbol{C}$ statistics, we need to know $\cos[D_{\ell m}(\Delta\ell)]$ and $\sin[D_{\ell m}(\Delta\ell)]$, which can be found from eq. (28) as

$$\begin{aligned} &C_{\ell m}(\Delta\ell) = |c_{\ell-\Delta\ell/2,m}||c_{\ell+\Delta\ell/2,m}|\cos\left[D_{\ell m}(\Delta\ell)\right] \\ &= \left(c_{\ell-\Delta\ell/2,m}c^*_{\ell-\Delta\ell/2,m} + c^*_{\ell-\Delta\ell/2,m}c_{\ell-\Delta\ell/2,m}\right)/2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &S_{\ell m}(\Delta\ell) = |c_{\ell-\Delta\ell/2,m}||c_{\ell+\Delta\ell/2,m}|\sin\left[D_{\ell m}(\Delta\ell)\right] \\ &= \left(c_{\ell-\Delta\ell/2,m}c^*_{\ell-\Delta\ell/2,m} - c^*_{\ell-\Delta\ell/2,m}c_{\ell-\Delta\ell/2,m}\right)/2i \end{aligned} \tag{29}$$

Taking into account eq. (28), from eq. (29) we have

$$\begin{aligned} C_{\ell m}(\Delta\ell) &= \sum_{j,k} B_{jk}(\ell,m)\cos\left[m(\phi_j-\phi_k)\right]\times \\ &\quad\times P^m_{\ell-\Delta\ell/2}(\cos\theta_j)P^m_{\ell+\Delta\ell/2}(\cos\theta_k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\ell m}(\Delta\ell) &= \sum_{j,k} B_{jk}(\ell,m)\sin\left[m(\phi_j-\phi_k)\right]\times \\ &\quad\times P^m_{\ell-\Delta\ell/2}(\cos\theta_j)P^m_{\ell+\Delta\ell/2}(\cos\theta_k) \end{aligned} \tag{30}$$

where $P^m_\ell(\cos\theta)$ are the associated Legendre polynomials and

$$\begin{aligned} &B_{jk}(\ell,m) = \\ &A_jA_k\left[\frac{\Gamma(\ell-\Delta\ell/2-m+1)\Gamma(\ell+\Delta\ell/2-m+1)}{\Gamma(\ell-\Delta\ell/2+m+1)\Gamma(\ell+\Delta\ell/2+m+1)}\right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{31}$$

Following [9], let us describe an ideal situation when $\theta_j = \theta_k = \pi/2$, but $\phi_j \neq \phi_k$. For this model in

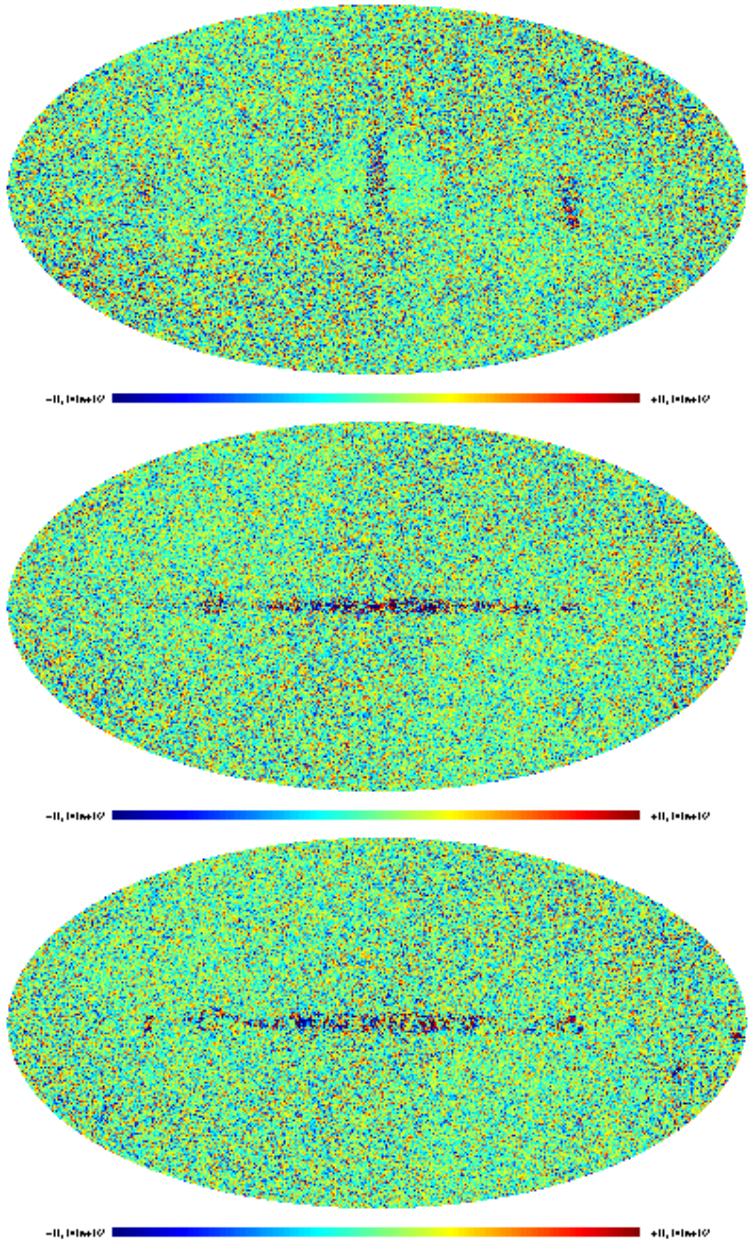


Fig. 7. The ILC (top), FC (middle) and WCF (bottom) power filtered maps. These whiten images are to display how foreground cleaning and the residues manifest themselves in phases, which are otherwise obscured by the amplitudes $|a_{\ell m}|$. One can see the clear cut feature in the middle of the ILC map and galactic and point source contaminations for FC and WFC maps. Qualitatively, these are clear signatures of non-Gaussianity.

eq. (30) we get

$$P^m_{l-\Delta\ell/2}(0) = \sqrt{\pi}2^m \times \\ \times\left[\Gamma\left(1+\frac{\ell-m-\Delta\ell/2}{2}\right)\Gamma\left(\frac{1-\ell-m+\Delta\ell/2}{2}\right)\right]^{-1} \quad (32)$$

As one can see from eq. (32) and eq. (30) the major part of the summation over m is related with $m = \ell - \Delta\ell/2$, for which

$$P^m_{\ell-\Delta\ell/2}(0)P^m_{\ell+\Delta\ell/2}(0)|_{m=\ell-\Delta\ell/2} = \\ = 2^{2\ell-\Delta\ell}\pi\frac{\Gamma\left(\frac{1}{2}+(\ell-\frac{\Delta\ell}{2})\right)\Gamma(\frac{1}{2}+\ell)}{\Gamma(\frac{1}{2}+\frac{\Delta\ell}{2})}\cos(\frac{\pi\Delta\ell}{2}) \quad (33)$$

Thus, the sign of the $C_{\ell m}(\Delta\ell)$ for even $\Delta\ell$ is determined by the cosine terms. Moreover, if $\Delta\ell = 2n$, $n = 1, 2, 3\ldots$, the contribution of the local defects with $\theta_j = \pi/2$ to $\boldsymbol{C}$ statistics manifest itself as the changes of the sign, mentioned in eq. (21). One may ask, why are $\boldsymbol{S}$- and $\boldsymbol{C}$-statistics so different, if they depends on θ_j in the same way? Taking into account the ϕ_j dependency of $C_{\ell m}(\Delta\ell)$ and $S_{\ell m}(\Delta\ell)$ one can see that for $j = k$ the cosine terms in eq. (30) ($\cos[m(\phi_j - \phi_k)]$) goes to unity while the sine terms for $S_{\ell,m}(\Delta\ell)$ is equal to zero. All $j \neq k$ modes in eq. (30) are represented by highly oscillated functions and look like a noise in the phase diagrams (see fig. 1-4).

5.2. Pecularities of odd $\Delta\ell$ statistics

Let us discuss the model $\Delta\ell = 2n+1$, $n = 1, 2, 3\ldots$. There are two possibilities to understand the properties of the phase correlations for odd $\Delta\ell$. Firstly we discuss the Galactic plane sources contamination. In such a case similar to eq. (33) one can find

$$P^m_{\ell-\Delta\ell}(0)P^m_{\ell}(0)|_{m=\ell-\Delta\ell} \sim \cos\left(\frac{\pi\Delta\ell}{2}\right), \quad (34)$$

and odd $\Delta\ell$ does not contribute to $\boldsymbol{S}$- and $\boldsymbol{C}$-statistics, if $\theta_j = \pi/2$ for all j. However, if for some of the local defects $\theta_j \neq \pi/2$, but $\cos\theta_j \ll 1$, there should produce significant peculiarities in $\boldsymbol{S}$-statistics by the following way. Close to the Galactic plane we can expand the Legendre polynomials using a Taylor series

$$P^m_{\ell-\Delta\ell}(\cos\theta_j) = P^m_{\ell-\Delta\ell}(0) + \\ + \left.\frac{dP^m_{\ell-\Delta\ell}(cos\theta_j)}{d(\cos\theta_j)}\right|_{\cos\theta_j=0}\cos\theta_j + \\ + \frac{1}{2}\left.\frac{d^2P^m_{\ell-\Delta\ell}(\cos\theta_j)}{d(\cos\theta_j)^2}\right|_{\cos\theta_j=0}\cos^2\theta_j \quad (35)$$

Simple algebra allows us to conclude that the dependence $\mathbf{S}_{\ell m}(\Delta\ell)$, $\boldsymbol{C}_{\ell m}(\Delta\ell) \propto \cos^2\theta_j \sin(\pi\Delta\ell/2)$ comes from interference between the first and the last terms in eq. (35), after their substitution to eq. (30). Thus, this dependency over $\Delta\ell$ takes place for some of the multipoles, for which $\ell\theta_j \ll 1$, while for $\ell\theta_j \gg 1$ $\mathbf{S}_{\ell m}(\Delta\ell), \boldsymbol{C}_{\ell m}(\Delta\ell)$ statistics goes to zero for odd $\Delta\ell$. This dependency of the $\mathbf{S}_{\ell m}(\Delta\ell), \boldsymbol{C}_{\ell m}(\Delta\ell)$ over $\delta\ell$ can be clearly seen in fig. 2 and fig. 3, where symmetry $\boldsymbol{S}$ and $\boldsymbol{C}$ statistics are restored for high ℓ. However, $\mathbf{S}_{\ell m}(\Delta\ell)$ as $\boldsymbol{C}_{\ell m}(\Delta\ell)$ depends on $\Delta\ell$ in the same way, while in fig. 2 and fig. 3 one can see significant asymmetry in the $\boldsymbol{S}$- and $\boldsymbol{C}$-statistics. The reason for that could be localization of the the defects in ϕ direction close to the Galactic center with the width $-\pi/2 \ll \delta\phi_j \ll \pi/2$ in the Galactic coordinates.

6. CONCLUSION

In this paper we examine the primordial non-Gaussian feature from Alvén turbulence caused by primordial magnetic field. The distortion of the blackbody CMB spectrum by such homogeneous magnetic field is not discussed in this paper. Due to the vector nature of the magnetic field, off-diagonal correlations between spherical harmonic modes $a_{\ell-1,m}$ and $a_{\ell+1,m}$ are induced. To see the $\Delta\ell = 2$ correlations, we apply circular statistics of phases to analyze such non-Gaussian component from the CMB signal. We have applied the statistics on the ILC, FC and WCF maps, using all the available phases. The phase information can help us to test some of the properties of the signal even when the amplitude of the power spectra were smoothed by Gaussian window functions starting from $\ell \sim 50 - 200$.

The FC and WCF maps have non-Gaussian signature registered in the phases, as we have found phase correlations not only $\Delta\ell = 2$, but also $\Delta\ell = 1$, 3 and 4. Such strong correlations are related to the residues from component separation in the Galactic plane and some point sources. None of the maps shows specific features from the vortex perturbations at the last scattering surface. Moreover, the detected non-Gaussianity is completely different from the vortex perturbations properties. Roughly speaking, all the modes with $\Delta\ell = 1$, 2, 3 and 4 show pronounced correlations, which is not the specific features for the vortex. The correlations such as $\Delta\ell = 4, 8\ldots$ might have been the higher order correlation from $\Delta\ell = 2$, but the $\Delta\ell = 1$ and others indicate that such strong correlations are related to the residues from foreground component separation. We conclude that the Alfvén turbulence does not contribute significantly in the phase information. The method we propose for phase analysis is useful for the upcoming PLANCK mission, espe-

cially for testing the properties of foreground cleaning methods. Our final remark is that the MHD structure claimed by [36] and [18] in the WCF map is related with Galactic plane residues but not with the Alfvén turbulence contamination.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Tegmark et al. for providing their processed maps. We acknowledge the use of HEALPIX [1] package [37] to produce $a_{\ell m}$ from the *WMAP* data and the use of the GLESP package [38] for data analyses and the whole-sky figures.

BIBLIOGRAPHY

1. C. L. Bennett, et al., Astrophys. J. **583**, 1 (2003).
2. C. L. Bennett, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/020320.
3. C. L. Bennett, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0203208.
4. G. Hinshaw, E. Komatsu, A. Kogut, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 63 (2003).
5. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 135 (2003).
6. E. Komatsu, A. Kogut, M. R. Nolta, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 119 (2003), astro-ph/0203223.
7. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. J. Way, Astrophys. J. **590**, 65 (2003), astro-ph/0303643.
8. P. Coles, P. Dineen, J. Earl, and D. Wright, Mon. Not. R. Astron. Soc., accepted (2004), astro-ph/0310252.
9. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **599**, 53 (2003), astro-ph/0310542.
10. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
11. P. Vielva, E. Martinez-Gonzalez, R. B. Barreiro, et al., Astrophys. J., submitted (2004), astro-ph/0310273.
12. C.-G. Park, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 313 (2004), astro-ph/0307469.
13. H. K. Eriksen, F. K. Hansen, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **605**, 14 (2004), astro-ph/0307507.
14. F. K. Hansen, P. Cabella, D. Marinucci, and N. Vittorio, Astrophys. J., in press (2004), astro-ph/0402396.
15. D. L. Larson and B. D. Wandelt, Astrophys. J., submitted (2004), astro-ph/0404037.
16. H. K. Eriksen, A. J. Banday, K. M. Górski, and P. B. Lilje, Astrophys. J., submitted (2004), astro-ph/0403098.
17. A. Bershadskii and K. R. Sreenivasan, Phys. Lett. A **319**, 21 (2003).
18. A. Bershadskii and K. R. Sreenivasan, Int. J. Mod. Phys. D **13**, 281 (2004).
19. A. Branderburg, K. Enqvist, and P. Olesen, Phys. Rev. D **54**, 1291 (1996), astro-ph/9602031.
20. R. Durrer, T. A. Kahniashvili, and A. Yates, Phys. Rev. D **58**, 123004 (1998).
21. A. Mack, T. Kahniashvili, and A. Kosowsky, Phys. Rev. D **65**, 123004 (2002), astro-ph/0105504.
22. K. Subramania, T. R. Seshadri, and J. D. Barrow, Mon. Not. R. Astron. Soc. **344**, L31 (2003).
23. G. Chen, P. Mukherjee, T. Kahniashvili, and B. Ratra, Astrophys. J., in press (2004), astro-ph/0403695.
24. R. J. Scherrer, A. L. Melott, and S. F. Shandarin, Astrophys. J. **377**, 29 (1991).
25. L.-Y. Chiang and P. Coles, Mon. Not. R. Astron. Soc. **311**, 809 (2000), astro-ph/9905250.
26. L.-Y. Chiang, P. Coles, and P. D. Naselsky, Mon. Not. R. Astron. Soc. **337**, 488 (2002), astro-ph/0207584.
27. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, and P. Coles, Astrophys. J. **602**, 1 (2004), astro-ph/0208235.
28. J. M. Bardeen, J. R. Bond, N. Kaiser, and A. S. Szalay, Astrophys. J. **304**, 15 (1986).
29. J. R. Bond and G. Efstathiou, Mon. Not. R. Astron. Soc. **226**, 655 (1987).
30. P. D. Naselsky, D. I. Novikov, and J. Silk, Astrophys. J. **655**, 565 (2002), astro-ph/0007133.
31. R. Fisher, *Statistical Analysis of Circular Data* (Cambridge University Press, Cambridge, 1993).
32. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, Phys. Rev. D, accepted (2003), astro-ph/0302496.
33. K. M. Górski, in *Microwave Background Anisotropies*, Ed. by F. R. Bouchet, R. Gispert, B. Guideroni, and J. Tran Thanh Van (Gif-sur-Yvette: Edition Frontieres, 1997), p. 77, astro-ph/9701191.
34. D. Novikov, P. Naselsky, and H. E. Jorgensen, Int. J. Mod. Phys. D **10**, 245 (2001), astro-ph/0001432.
35. L.-Y. Chiang, Mon. Not. R. Astron. Soc. **325**, 405 (2001), astro-ph/0011021.

[1] `http://www.eso.org/science/healpix/`

36. A. Bershadskii, Int. J. Mod. Phys. D **12**, 509 (2003), astro-ph/0305433.
37. K. M. Górski, E. Hivon, and B. D. Wandelt, in *Evolution of Large-Scale Structure: From Recombination to Garching*, Ed. by A. J. Banday, R. S. Sheth, and L. Da Costa (Garching: ESO, 1999), p. 37, astro-ph/9812350.
38. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Astron. Astrophys., submitted (2003), astro-ph/0305537.

THE CATS SERVICE: AN ASTROPHYSICAL RESEARCH TOOL*

O. V. Verkhodanov[1], S. A. Trushkin[1], H. Andernach[2], V. N. Chernenkov[1]

[1]Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia
[2]Argelander-Institut fuer Astronomie, Bonn, Germany (on leave of absence from Departamento de Astronomia, Universidad de Guanajuato, Mexico)

We describe the current status of CATS (astrophysical CATalogs Support system), a publicly accessible tool maintained at Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS) (`http://cats.sao.ru`) allowing one to search hundreds of catalogs of astronomical objects discovered all along the electromagnetic spectrum. Our emphasis is mainly on catalogs of radio continuum sources observed from 10 MHz to 245 GHz, and secondly on catalogs of objects such as radio and active stars, X-ray binaries, planetary nebulae, HII regions, supernova remnants, pulsars, nearby and radio galaxies, AGN and quasars. CATS also includes the catalogs from the largest extragalactic surveys with non-radio waves. In 2008 CATS comprised a total of about 10^9 records from over 400 catalogs in the radio, IR, optical and X-ray windows, including most source catalogs deriving from observations with the Russian radio telescope RATAN-600. CATS offers several search tools through different ways of access, e.g. via Web-interface and e-mail. Since its creation in 1997 CATS has managed about 10^5 requests. Currently CATS is used by external users about 1500 times per day and since its opening to the public in 1997 has received about 4000 requests for its selection and matching tasks.

Keywords: astronomical databases: catalogs — radio astronomy: radio sources

1. INTRODUCTION

Vast amounts of astrophysical information are now being published, based on observations of small and large sky regions. Typically, this information includes coordinates of the observed objects and their physical characteristics in the form of source catalogs. In fact, almost every new large-scale observational experiment produces a new catalog of objects. Modern astrophysics operates with source parameters obtained in different wavelength ranges with the goal of obtaining the most detailed understanding of physical properties and the processes of radiation of these objects. The ability of using different catalogs makes this problem considerably simpler.

Over the past decades several different attempts have been made to combine large numbers of astronomical catalogs and make them accessible in a unified way, which can be classified grossly into two categories: databases of objects and catalog browsers. Examples of the former are NED [1,2], Simbad [3,4], and LEDA [5]. Examples of the latter are Vizier [6] and Datascope (`http://heasarc.gsfc.nasa.gov/vo/`).

Motivated by RATAN-600 observation requirements, problems of radio source study, and the underrepresentation of radio source catalogs in the then existing object databases, the present authors decided, in 1995, to create CATS, the astrophysical CATalogues Support system. Following the radioastronomical needs, the architecture of the operating system and the considerations expressed in the reviews by Andernach [7–9], we chose to design CATS as a catalog browser rather than an object database, given that it would allow us to achieve a much better completeness in terms of the number of records, implying e.g. a more complete coverage of radio source measurements over the entire radio frequency window. We thus deliberately delayed the known problem of cross-identification of all the catalogs, as provided in NED, SIMBAD, or LEDA, to a later stage. In that sense CATS is ideally suited for the experienced researcher who is looking for the largest amount of data available, but willing and able to work out the correct cross-identifications by himself. This effort will be

*Data Science Journal, 2009, 8, C.34. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License. To view a copy of this license, visit `https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/`

compensated for by more complete data than those obtained from other existing object databases.

The first steps of the creation of CATS were described by Verkhodanov and Trushkin [10–15]. CATS allows one to operate with catalogs stored in ASCII and FITS binary tables, to fit radio continuum spectra, and to calculate spectral indices obtained from different radio catalogs. This service is located on the server 'cats.sao.ru' at SAO, Russia, and currently runs on a Dual Opteron 244 under OS Linux Fedora Core 6.

2. IMPLEMENTATION OF CATS

There are many modern databases operating with standard software that allow a user to obtain information on celestial objects, their images at different wavelengths, and the corresponding bibliographic data. The abovementioned services like NED, SIMBAD, and LEDA are among these. Other services, which may be called "virtual telescopes," offer extractions from large, dedicated imaging surveys, such as the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) at `www.sdss.org`, 2MASS at `www.ipac.caltech.edu/2mass/`, and SkyView at `skyview.gsfc.nasa.gov` make use of modern Web-technologies allowing one to select sky regions either via coordinates or object name resolvers. We developed our own simple approach, following both the RATAN-600 observational tasks for the preparation of radio source spectra, as well as users' desire to be able to select observing targets from available source catalogs. Based on simple system commands and basic functions in C, our approach permitted us to achieve the fast speed of source selection and easy portability among different Unix-like systems. Moreover, this approach was better suited to our very limited resources as it allowed easier integration of new catalogs. We believe that our best contribution is a larger number of searchable catalogs rather than a more sophisticated search interface with less accessible data. We also wish to emphasize that we are not trying to simply duplicate other catalog browsers by using their sets of catalogs. A major fraction of these has been obtained or prepared by members of our team (see e.g. [16]), and over 100 radio source lists available from CATS are not available from VizieR.

The present data collection consists of catalogs, their descriptions, and corresponding programs operating under OS Linux. The program codes are created in the C language and translated with the GNU project C compiler. The codes are freely shared, provided they are used for non-commercial goals.

New catalogs may be added to the system in conformity with the following rules:

1) Every new catalog of objects should be placed in the UNIX directory with the same name as the catalog of objects.
2) The description of the catalog should also be placed in that directory.
3) The programs (or operating scripts) for local operations with the catalog of objects are also placed in the same directory.
4) Brief characteristics, program names and description file of the astrophysical catalog are stored in a file named 'cats_descr'.

The following information is stored in the description file 'cats_descr':

- the name of the catalog, which coincides with the name of the UNIX directory,
- the type of the catalog (radio, optical, combined, etc.),
- frequency/wavelength range,
- minimum fluxes or magnitudes,
- equatorial or/and galactic coordinate ranges of the respective catalog,
- names of the local programs for the 'select' and 'match' functions (see Section 3.2),
- name of the document file,
- number of records in the catalog,
- the size of the beam pattern or angular resolution,
- a recalibration factor (if available) to put the flux densities on a commonly agreed flux scale, and
- a reference.

Parameters from the description file are used by the programs that process the input data, e.g., user-specified limits in coordinates and/or flux density inform the operating programs about the relevant sky zones to be searched and thus economize on processing time if a given catalog is out of the required range.

The lower level of the CATS control system includes several basic utilities:

(1) 'c_sel' selects objects with parameters within the user-specified ranges;
(2) 'c_match' looks for objects falling within a certain distance from a user-specified coordinate (a "cone search");
(3) 'cats_divide' operates with catalogs sorted by right ascension and produces an index of record numbers corresponding to a certain right ascension;
(4) 'epoch' converts the user-specified coordinates if they are provided for non-standard equinox, i.e. neither 1950.0 nor 2000.0 (proper motions are assumed to be zero);
(5) catalog coordinates stored according to the

equinox as published, and user-specified coordinates are converted to that equinox;

(6) 'cats_base' controls the file of descriptions 'cats_descr' selecting characteristics of catalogs and produces input parameters for the programs 'c_sel' and 'c_match.'

For catalogs in FITS binary table format (e.g., NVSS or SDSS catalogs), special programs for the 'select' and 'match' functions were prepared.

To organize access of a local user of CATS from any directory of the OS, the operation programs that process the main CATS tasks are placed in a commonly accessible directory of the OS Linux. The control procedures 'cats_sel' and 'cats_match,' organized as shell-scripts, cover all the low-level programs and provide the interface between CATS and a local user, or requests made via HTTP or e-mail. The described method of the catalog storage facilitates the database development, its expansion with new data, and the possibility to tune the supporting programs.

CATS has its own indexing procedure 'cats_divide' for object coordinates in a catalog. The program decides where to start searching records of the input catalog from an index prepared from a right-ascension sorted list, allowing one to make efficient use of hard-disk seeking functions. To avoid problems of searching within a few degrees of the poles where recalculation from one equinox to another one is done, we process the total list of objects in these zones to find a required source. The indexing of CATS lists by declination is now under consideration.

3. THE MAIN FUNCTIONS

The following functions are currently implemented in CATS:

(1) Selection of objects from one or several catalogs by the following criteria: equatorial or galactic coordinates, flux densities, spectral indices, frequencies, names, and (for some catalogs) the type of objects. Parameters common to all catalogs (coordinates and flux density) are used in the selection.

(2) Search for counterparts of objects (selected from one or several catalogs) by coordinate matching within a box, a circle, or an ellipse.

(3) Cross-identification of different catalogs. This procedure is currently available only for local users. It uses the output from the selected zones of one catalog as input for the matching procedure on another catalog.

(4) Preparation of a file with a short description and characteristics of each catalog, printing of the total list of catalogs for the required sky areas (for local user).

(5) Plotting radio spectra of selected sources. This can be done from multi-frequency catalogs, or catalogs prepared by the CATS team from cross-identification of radio catalogs at different frequencies, or even by individual user input of frequencies and flux densities for a source (at `cats.sao.ru/~satr/SP/spectrum.html`). This function is realized in two procedures. The first is a Java script for data in the homogenized CATS format for single objects, accessible from the web page. The second one is suitable for object lists in the local RATAN-600 data processing system.

The result of the object selection is a datafile sorted according to different object characteristics, such as right ascension (default mode), declination or frequency. This file can either be displayed on the standard output devices or sent to the user in the following formats:

(1) The 'native' (original) format of the catalog (i.e. columns as published).

(2) Standard ("homogenized") output format. This format is organized to be common for all the catalogs and used later for unification of data, preparation of spectra and statistical analysis. The standard FITS Table format describing data and fields of the table may be added as a header of the resulting file.

3.1. Access to CATS

Different modes of access are provided according to user requirements and CATS goals, following modern trends of software development. Thus, three main modes of on-line access to the CATS service have been prepared:

(1) Dialog mode (non-graphics) has been maintained until the present. Several scripts written in the UNIX 'shell' language have been created ([10]). They permit one to operate with CATS' supporting programs via TCP/IP and NFS protocols in the local computer network.

(2) Hypertext access (`http://cats.sao.ru`) is provided to allow a user from the Internet system to operate with CATS via a hypertext transfer protocol. It allows one to execute all described operations from the Web-page.

(3) FTP access (`ftp://cats.sao.ru`) allows a user to obtain both the description of CATS catalogs and the catalogs themselves. Here is an example of access by anonymous FTP to the catalog WISH:

`anonymous@ftp://cats.sao.ru`

```
ftp> bin
ftp> cd pub/cats/
ftp> cd WISH
ftp> get wish11.cat
ftp> bye
```

All the catalog names are stored in a file of descriptions 'cats_descr' (`ftp://cats.sao.ru/cats_descr`).

(4) E-mail access allows the user to send batch requests to CATS.

One can send an e-mail with requests of matching with lists or selection by several parameters. The e-mail will be read automatically and sent for execution to the CATS scripts. The result will be sent back automatically to the user via e-mail.

3.2. 'Select' and 'match' procedures

Two main procedures of data selection have been provided at different levels of CATS control: the 'select' and 'match' tasks. They follow the first three main functions described above and are realized in different access modes. As was described earlier, the two low-level procedures 'c_sel' and 'c_match' provide information according to the corresponding user requests and pass it to the upper-level control scripts 'cats_sel' and 'cats_match.' Using these two procedures, the cross-identification of catalogs is possible by using output from the 'select'-function of the first complete catalog as the input of the 'match'-function of the second catalog or catalogs.

3.3. E-mail access

In order to economize user's real time and avoid delays in on-line data exchange, we provide the possibility to submit a batch task in the form of an e-mail letter. The e-mail requests may have several formats (as explained in a file that is returned on an empty e-mail to `cats@sao.ru`, with no subject). Two examples of the body of an email (no subject required) are shown below.

(1) selection task:

```
mail -s "" cats@sao.ru
cats select
ra min=10:30 max=10:40:00.
dec > 10' < 12' 30"
flux > 0.5mJy
catalogs r epoch=1950
cats end
```

(2) matching task:

```
mail -s "" cats@sao.ru
cats match
catalogs NVSS,FIRST
window box x=30" y=10'
sources:
s1 02:02:00 +31:23:16 1950
s2 02:23:10 34:03:00 1950
s3 21:26:33.9 -18:34:33.0 1950
cats end
```

These examples demonstrate the use of some keywords for batch requests. The beginning and end of the requests are defined by the statements: 'cats start' and 'cats end'. The first example shows how to search within certain limits of coordinates by using the 'min, max' or '<', '>' operators for right ascension 'ra' and declination 'dec'. The keywords expression 'catalogs r' sets the type of catalogs to be used for selection, where 'r' means all the radio catalogs. Instead of 'r', one may choose 'o' for the optical catalogs, 'x' for the X-ray ones, 'ir' for the infrared ones, or just the names of used lists separated with comma, e.g. 'catalogs NVSS,FIRST,WISH' (the full list of the CATS catalogs can be obtained from the CATS Web-page `http://cats.sao.ru/doc/CATS_list.html`). The keyword 'epoch' sets the equinox of the input coordinates. 'Flux' sets flux limits.

The second example of the e-mail task is the matching procedure. There are some additional keywords 'window box x=30″ y=10', where 'box' is the type of matching window (others are 'circle' and 'ellipse'), 'x' and 'y' are along longitude and latitude of the corresponding coordinate system, respectively. Note that 'x' and 'y' are half the side lengths of the search 'box,' the value following the 'circle' keyword is its radius, and those following the 'ellipse' keyword are the semi-major and semi-minor axes of the ellipse.

4. THE MAIN CATALOGS

The major source of the radio catalogs in CATS is the collection one of us ([7, 9]), who has spent considerable effort to recover older source lists not previously available in electronic form, using a scanner and optical character recognition software ([16]). This collection is complemented in several ways: contributions from authors, astro-ph preprints, tables from electronic journals and the CDS catalog archive, as well as occasional manual retyping of the original catalog. About 70 catalogs have been typed and/or corrected manually at SAO RAS by S. Trushkin. The largest catalogs (e.g. NVSS, FIRST, SDSS, etc.) were copied from Web-sites of the catalog authors.

CATS is mainly a radio-astronomical catalog service. All major catalogs incorporated into CATS are shown in tables 1 (adapted and updated from table 1 of [9]) and 2.

Table 1. Major radio astronomical catalogs available in CATS.

Freq. (MHz)	Name	Year of Publ.	RA(h) I(d)	Dec(degr) B(d)	Beam Width (arcmin)	min F.D. (mJy)	Number Objects
10-25	UTR-2	78-02	0-24	$>$-13	25..60	10000	1754
38	8C	90/95	0-24	$>$+60	4.5	1000	5859
74	VLSS	2004	0-24	>-30	1.3	350	32521
80	CUL1	73	0-24	-48,+35	3.7	2000	999
80	CUL2	75	0-24	-48,+35	3.7	2000	1748
82	IPS	87	0-24	-10,+83	27x350	500	1789
151	6CI	85	0-24	$<$+80	4.5	200	1761
151	6CII	88	8.5-17.5	+30,+51	4.5	200	8278
151	6CIII	90	5.5-18.3	+48,+68	4.5	200	8749
151	6CIV	91	0-24	+67,+82	4.5	200	5421
151	6CVa	93	1.6-6.2	+48,+68	4.5	$\sim$300	2229
151	6CVb	93	17.3-20.4	+48,+68	4.5	$\sim$300	1229
151	6CVI	93	22.6-9.1	+30,+51	4.5	$\sim$300	6752
151	7CI	90	(10.5+41)	(6.5+45)	1.2	80	4723
151	7CII	95	15-19	+54,+76	1.2	$\sim$100	2702
151	7CIII	96	9-16	+20,+35	1.2	$\sim$150	5526
178	4C	65	0-24	-7,+80	15x7.5	2000	4844
232	MIYUN	96	0-24	+30,+90	3.8	$\sim$100	34426
325	WENSS	98	0-24	+30,+90	0.9	18	229420
327	WSRT	91	5 fields	(+40,+72)	$\sim$1.0	3	4157
352	WISH	2002	0-24	-25,-9	0.9	18	90357
365	TXS	96	0-24	-35.5,+71.5	$\sim$.1	250	66841
408	MRC	81/91	0-24	-85,+18.5	$\sim$3	700	12141
408	B2	70-73	0-24	+24,+40	3x10	250	9929
408	B3	85	0-24	+37,+47	3x5	100	13354
608	WSRT	91	sev.fields	($\sim$40,$\sim$72)	0.5	3	1693
611	NAIC	75	22-13	-3,+19	12.6	350	3122
843	SUMSS	99	0-24	$<$-30	0.72	6	178975
1400	GB	72	7-16	+46,+52	10x11	90	1086
1400	GB2	78	7-17	+32,+40	10x11	90	2022
1400	WB92	92	0-24	-5,+82	10x11	$\sim$150	31524
1400	NVSS	98	0-24	-40,+90	0.9	2.0	1810668

Freq. (MHz)	Name	Year of Publ.	RA(h) I(d)	Dec(degr) B(d)	Beam Width (arcmin)	min F.D. (mJy)	Number Objects
1400	FIRST	98	7.3,17.4	22.2,57.6	0.1	1.0	811117
		98	21.3,3.3	-11.5,+1.6			
1400	PDF	98	1.1-1.3	-46,-45	0.1-0.2	0.1	1079
1500	VLANEP	94	17.4,18.5	63.6,70.4	0.25	0.5	2436
2700	PKS	(90)	0-24	-90,+27	∼8	50	8264
3900	Z	89	0-24	0,+14	1.2x52	50	8503
3900	RC	91/93	0-24	4.5,5.5	1.2x52	4	1189
3900	Z2	95	0-24	0,+14	1.2x52	40	2943
4850	MG1-4	86-91	var.	0,+39	∼3.5	50	24180
4850	87GB	91	0-24	0,+75	∼3.5	25	54579
4850	GB6	96	0-24	0,+75	∼3.5	18	75162
4850	PMNM	94	0-24	-88,-37	4.9	25	15045
4850	PMN-S	94	0-24	-87.5,-37	4.2	20	23277
4850	PMN-T	94	0-24	-29,-9.5	4.2	42	13363
4850	PMN-E	95	0-24	-9.5,+10	4.2	42	11774
4850	PMN-Z	96	0-24	-37,-29	4.2	70	2400
31	NEK	88	350<l<250	|b| <2.5	13x11	4000	703
151	7C(G)	98	80<l<180	|b| <5.5	1.2	∼100	6262
327	WSRTGP	96	43<l<91	|b| <1.6	∼1.0	∼10	3984
1400	GPSR	90	20<l<120	|b| <0.8	0.08	25	1992
1408	RRF	90	357<l<95.5	|b| <4.0	9.4	98	884
1420	RRF	98	95.5<l<240	-4<b<5	9.4	80	1830
1400	GPSR	92	350<l<40	|b| <1.8	0.08	25	1457
2700	F3R	90	357<l<240	|b| <5	4.3	40	6483
4875	ADP79	79	357<l<60	|b| <1	2.6	∼120	1186
5000	GT	86	40<l<220	|b| <2	2.8	70	1274
5000	GPSR	94	350<l<40	|b| <0.4	∼0.07	3	1272
5000	GPSR	79	190<l<40	|b| <2	4.1	260	915

CATS also contains observational and combined catalogs of various Galactic and extragalactic objects unified in the combined tables described in [17] where the references to all the mentioned catalogs can be found.

5. SUMMARY

CATS provides a simple and convenient access to astrophysical data and complements the data available from other services, most notably for radio continuum flux densities, for which it provides the largest amount of data in any such service. Operation with CATS permits astronomers to search for peculiar ob-

Table 2. Some catalogs of other wavelength ranges in the CATS.

lambda	Name	Publ	RA	Dec	Number
opt	PGC	89	0-24	-90,+90	73197
opt	MCG	75	0-24	-33.5,+90	31886
opt	MSL	85	0-24	-90,+90	181603
opt	SDSS	DR6	2007	Several fields	Gals: 216906
					QSOs: 22033
ir	IRASPSC	87	0-24	-90,+90	245889
ir	IRASFSC	89	0-24	$\|b\| > 10$	235935
ir	IRASSSC	89	0-24	-90,+90	43886
ir	2MASS	2000	0-24	-90,+90	470992970
Xray	ROSAT	95	0-24	-90,+90	74301
mix	QSO HB2	93	0-24	-84,+86	7315
mix	VERON+11	93	0-24	-83,+85	48921

jects and study physical processes in sources of cosmic radiation.

Until October 2004, we registered over 28000 requests for the 'select' or 'match' procedures, which are the most popular. The most popular catalogs for FTP-copying over the last five years are QSO by Hewitt and Burbidge (20 times), PGC (19 times), and NVSS (18 times). CATS processes daily up to 1000 HTTP-requests for information concerning the catalog descriptions.

CATS is being expanded continuously and presently comprises more than 400 catalogs including all the RATAN-600 catalogs. In its present form CATS occupies about 60Gb of disk space, which makes its installation possible also on notebooks. One of the possible future developments of the system is the preparation of the VOTable format for output tables. At present, limited resources preclude linkage with the Virtual Observatory (VO).

BIBLIOGRAPHY

1. G. Helou, B. F. Madore, M. D. Bicay, et al., in *Windows on Galaxies, Proc. on the 6th Workshop of the Advanced School of Astronomy of the Ettore Majorana Centre, 160, Erice, May 21-23, 1989*, Ed. by G. Fabbiano, J. S. Gallagher, and A. Renzini (Astrophys. and Space Sci. Library, Dordrecht: Kluwer, 1990), p. 109.
2. J. M. Mazzarella, B .F. Madore, J. Bennett, et al., in *Astron. Data Analysis II, Proc. of the SPIE, 4847* , Ed. by J.-L. Starck, F. D. Murtagh (2002). p. 254.
3. D. Egret, Bull. Inf. CDS **24**, 109 (1983).
4. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **143**, 9 (2000), astro-ph/0002110.
5. G. Paturel, H. Andernach, L. Bottinelli, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **124**, 109 (1997).
6. F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **143**, 23 (2000).
7. H. Andernach, Bull. Inf. CDS **38**, 69 (1990).
8. H. Andernach, Bull. Inf. CDS **45**. 35 (1994), astro-ph/9411027.
9. H. Andernach, in *Internet Resources for Professional Astronomy*, Ed. by M. Kidger, I. Perez-Fournon, F. Sanchez (Cambridge Univ. Press, 1999), p.67, astro-ph/9807346.
10. O. V. Verkhodanov and S. A. Trushkin, Report 228 SAO RAS (Library SAO RAS, Nizhnij Arkhys, Russia, 1994).
11. O. V. Verkhodanov and S. A. Trushkin, Preprint No 106 SAO RAS, (Library SAO RAS, Nizhnij Arkhys, Russia, 1995).
12. O. V. Verkhodanov and S. A. Trushkin, in *Proc. "XXVI Radio Astron. Conf.", 1995* (St.Petersburg, IAA RAS, 1995), p. 252
13. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, 1997*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne (ASP Conf. Ser., 125, 1997), p. 322, astro-ph/9610262.

14. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, V. N. Chernenkov, and H. Andernach, Baltic Astronomy **9**, 604 (2000).
15. S. A. Trushkin, O. V. Verkhodanov, V. N. Chernenkov, and H. Andernach, Baltic Astronomy **9**, 608 (2000).
16. H. Andernach, Data Sci. J., in press (2009).
17. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005), astro-ph/0705.2959.

MORPHOLOGY OF HIGH-MULTIPLICITY EVENTS IN HEAVY ION COLLISIONS*

P. Naselsky[1], C. H. Christensen[1], P. R. Christensen[1], P. H. Damgaard[1], A. Frejsel[1], J. J. Gaardhøje[1], A. Hansen[1], M. Hansen[1], J. Kim[1], O. Verkhodanov[2], U. A. Wiedemann[3]

[1]Discovery Center, Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark
[2]Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, 369167 Russia
[3]Physics Department, Theory Unit, CERN, CH-1211 Geneve, 23, Switzerland

We discuss opportunities that may arise from subjecting high-multiplicity events in relativistic heavy ion collisions to an analysis similar to the one used in cosmology for the study of fluctuations of the Cosmic Microwave Background (CMB). To this end, we discuss examples of how pertinent features of heavy ion collisions including global characteristics, signatures of collective flow and event-wise fluctuations are visually represented in a Mollweide projection commonly used in CMB analysis, and how they are statistically analyzed in an expansion over spherical harmonic functions. If applied to the characterization of purely azimuthal dependent phenomena such as collective flow, the expansion coefficients of spherical harmonics are seen to contain redundancies compared to the set of harmonic flow coefficients commonly used in heavy ion collisions. Our exploratory study indicates, however, that these redundancies may offer novel opportunities for a detailed characterization of those event-wise fluctuations that remain after subtraction of the dominant collective flow signatures. By construction, the proposed approach allows also for the characterization of more complex collective phenomena like higher-order flow and other sources of fluctuations, and it may be extended to the characterization of phenomena of non-collective origin such as jets.

1. INTRODUCTION

The bulk of low-momentum particles produced in heavy ion collisions at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) and at the Large Hadronic Collider (LHC) appears to emerge from a common flow field that is largely driven by the density gradients produced in the earliest stage of the collision [1–4]. This fluid dynamic paradigm of heavy ion collisions is supported by a large set of data from the LHC [5–7] and RHIC [8–13] which includes the dependence of particle production on the azimuthal angle relative to the reaction plane and its dependence on transverse momentum, pseudorapidity η, particle species and centrality (impact parameter) of the collision. Complementary support comes from recent indications that also event-by-event fluctuations of the energy density distribution produced in the earliest stage of a heavy ion collision, are propagated fluid dynamically. In particular, the measurement of non-vanishing odd harmonic coefficients, v_n, in the azimuthal dependence of particle distributions is an unambiguous signal for the presence of sizable fluctuations in the initial stage of a heavy ion collision [14–20].

These findings point to a remarkable set of commonalities between the physics of the "Big Ban" determining the evolution of the Universe, and the physics of the "Little Bangs" formed in heavy ion collisions, that creates hot and dense matter under conditions akin to those prevailing in the early universe around the first microsecond, where the transition from the Quark Gluon Plasma (QGP) to a confined hadron gas (HG) occurred.

In both cases, the physical system is viewed at an initial time as exhibiting a phase space distribution with a high degree of symmetry, overlaid with distributions of localized fluctuations. In both cases, these initial fluctuations are propagated fluid dynamically and are experimentally accessible, in the first case as fluctuations of the (photon) Cosmic Microwave Background (CMB) [21–27] and, in the second case, as fluctuations and characteristic variations in the density of particles produced in very energetic heavy ion

*Reprinted article with permission from P. Naselsky, C. H. Christensen, P. R. Christensen, P. H. Damgaard, A. Frejsel, J. J. Gaardhøje, A. Hansen, M. Hansen, J. Kim, O. Verkhodanov, and U. A. Wiedemann, Phys. Rev. C 86, 024916 (2012). Copyright (2012) by the American Physical Society. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevC.86.024916
Readers may view, browse, and/or download material for temporary copying purposes only, provided these uses are for noncommercial personal purposes. Except as provided by law, this material may not be further reproduced, distributed, transmitted, modified, adapted, performed, displayed, published, or sold in whole or part, without prior written permission from the American Physical Society.

collisions [28, 29]. Also, in both cases, the decoupling of the different particle species from the common fluid dynamical system provides important possibilities for experimental verification of the collective dynamics. In the case of Big Bang physics, it sets the time scale for the decoupling of photons and determines the primordial abundances of light nuclei. In the case of heavy ion physics, it sets, i.a., the hierarchy of temperatures for chemical and kinematic freeze-out, and determines the relative abundances of hadronic resonances. Furthermore, the study of fluctuations is motivated mainly by the idea that details of the fluid dynamical evolution of a system make it possible to constrain its material properties. In the case of Big Bang physics, this has allowed to constrain the composition of the Universe in terms of visible matter, dark matter and dark energy [23]. In the case of heavy ion collisions, this has allowed to establish that the produced matter exhibits the properties of an almost perfect fluid with a shear viscosity to entropy density ratio that is close to minimal [1–4, 30, 31].

The question arises whether these qualitative analogies between the physics of the Early Universe and the physics of heavy ion collisions can provide conceptual or technical advances in either field. Can heavy ion physics learn from the techniques developed to analyze Big Bang physics, or vice versa, can it contribute to advances in modern cosmology? Synergies between both fields may arise on different levels. For instance, cosmology has studied in significant detail the question of how fluid dynamic perturbations are propagated in an expanding system, and there is at least some understanding of how non-linearities and turbulent phenomena relevant for structure formation build up, and which experimental measures may give access to them. In the context of heavy ion collisions, first analyses of the propagation of fluid dynamic perturbations have been undertaken with analytical and numerical techniques [32–37], but these are arguably at the very beginning, and further explorations in close analogy to developments in cosmology may be beneficial.

Similarities between the Big Bang and the Little Bangs may also lead to synergies on the level of the techniques for the analysis of data on fluctuations. The main purpose of the present paper is to initiate such an effort. To this end, we shall use here a standard tool [38] for analyzing the CMB anisotropy, and apply it to the study of sets of simulated particle densities from ultra-relativistic heavy ion collisions.

We note that studies of the physical system produced in the Big Bang and the systems produced in heavy ion collisions share not only remarkable commonalities but have also significant differences. For an analysis of fluctuations and their separation from other sources of signals, some of the obvious differences (such as the vastly different scales involved in both problems, the different fundamental forces that govern the dynamics, and the difference in formulating the dynamics in general relativity or special relativity) may be less important. Potentially relevant, however, is the difference between a study of one 'big' event (even if consisting of a large but finite sample of statistically independent patches) and the study of an – in principle arbitrarily abundant – sample of mesoscopic events.

The paper is organized as follows. In section 2 we introduce the spherical harmonic approach that underlies CMB data analysis. In sections 3 and 4, we present and discuss an application of this approach to simulated heavy ion data, and in section 5 we apply the method to the particular case of elliptic flow, a standard measurement in heavy ion collisions. In section 6 we summarize our findings and we present a brief outlook. Finally, in Appendix A we have presented mathematical details of the method and generalization of the model with constant flow amplitude to more complex one, when the amplitude of the flow depends on pseudorapidity.

2. FORMULATION OF THE PROBLEM

In cosmology, the CMB anisotropy is analyzed by means of two-dimensional maps that essentially cover the full sky (like those from the COBE, WMAP and PLANCK experiments [21–23]), or only patches of the sky (Boomerang, MAXIMA, CBI, ACT etc.[24–27]). Analysis of such maps reveal the small temperature fluctuations and anisotropies that the early Universe has left on top of an otherwise smooth and constant background. By expressing the measured signal in terms of an expansion in spherical harmonics, useful quantities such as the power spectrum, alignment between different multipoles, statistical anisotropy and Gaussianity of the CMB can be constructed and compared with theory even from a single map (realization) of the CMB sky [21]. In the analysis of CMB data, the methods focus on the separation of the different components of the observed signal from that of the primordial CMB. The by-product of this separation yields additional maps for different kinds of foreground effects (e.g. synchrotron, free-free and dust emission) and the point-sources catalog [39].

The analysis of heavy ion data from nuclear collisions at the LHC and the RHIC faces similar challenges. On one hand, several independent statistical methods are in use [40, 41] to analyze two- and multi-particle correlations in terms of flow coefficient v_n, taken to be sensitive to the fluid dynamical properties of the high density partonic system in its early stages of expansion. On the other hand, the same particle

correlations are known to be sensitive to other important dynamical features of heavy ion collisions, such as jets or resonance decays. Typical tasks in heavy ion collisions are then to either clean the flow signal as far as possible from confounding dynamical features, or to analyze a different class of interesting physical phenomena (such as the 'point-sources' produced by jets) without biasing its analysis by underlying collective effects. The question arises, what one could learn for this class of problems if the investigation of morphological features commonly done in the CMB data analysis was applied directly to heavy ion collisions?

Each heavy ion collision results in a distribution $f(\eta,\phi)$ of particles as a function of azimuthal angle ϕ and pseudorapidity η. Pseudorapidity is related to the polar angle θ of the produced particle with respect to the beam direction via $\eta = -\ln(\tan(\frac{\theta}{2}))$, and ϕ characterizes the angle in the transverse plane orthogonal to the beam. We simulate such distributions with HIJING [42] (Heavy-Ion Jet INteraction Generator), which is an event generator that reproduces a number of main features of heavy ion physics in the energy range of RHIC and LHC. It is build on PYTHIA [43] routines for hard interactions and JETSET [44] routines for string fragmentation. The initial geometry and matter distribution is determined via a Glauber model [45, 46]. Various phenomenologically relevant nuclear effects are also implemented, including e.g. the nuclear modification of parton distribution functions, or parametrization of the expected parton energy loss. However, HIJING does not directly model a collective dynamics resulting in flow. As this is relevant for our study, we include flow effects a posteriori by modulating the azimuthal distribution of particles from HIJING.

Particle production in heavy ion collisions is known to display a regular η-dependence that peaks around $\eta = 0$ and exhibits a forward-backwards symmetry in the case of collisions between identical nuclei. Fig. 1 shows results for a semi-peripheral Pb-Pb collision at the LHC with a total of 12316 particles produced over more than 16 units of pseudo-rapidity. The pseudorapidity distribution of this randomly chosen simulated single event shows visible but relatively small fluctuations around a smooth event-averaged distribution. In preparation of the following analysis, we have replotted this distribution as a function of the polar angle θ. We see that the θ-distribution is approximately flat over an extended range $\frac{\pi}{4} < \theta < \frac{3\pi}{4}$ which corresponds to a sizeable window around mid-rapidity ($0.88 < \eta < 0.88$). A presentation in the variable θ thus highlights the region of approximately one unit around mid-rapidity for which most differential data are available.

As remarked already, HIJING does not generate realistic flow signals. For our study, we superimpose

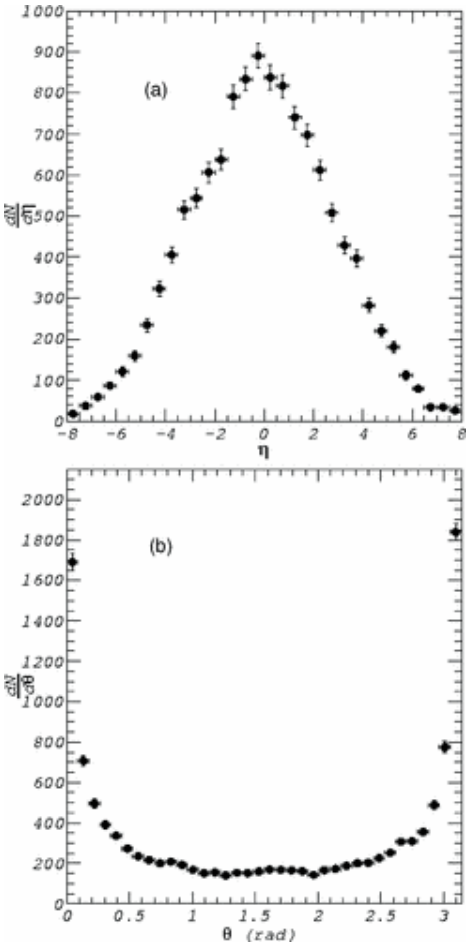


Fig. 1. Top: Pseudorapidity density of charged particles simulated by HIJING for a single semi-central collision between two Pb nuclei at current LHC energies ($\sqrt{s_{nn}} = 2.76$ TeV). Bottom: The same distribution as a function of the polar angle θ relative to the beam direction.

such flow signals a posteriori on HIJING events by redistributing the generated particles such that event-averaged ensembles of collisions show a second order harmonic oscillation of the azimuthal angle ϕ with some prescribed magnitude v_2. This procedure results in events that carry azimuthal oscillations supplemented by event-by-event fluctuations. Fig. 2 shows a typical event realization for an average flow amplitude $v_2 = 0.10$. We caution the reader that experimental data on flow reveal characteristic dependencies of v_2 on transverse momentum, rapidity and particle identity that are not included in this ad hoc simulation. The simplified procedure adopted here will not account for all phenomenologically relevant properties

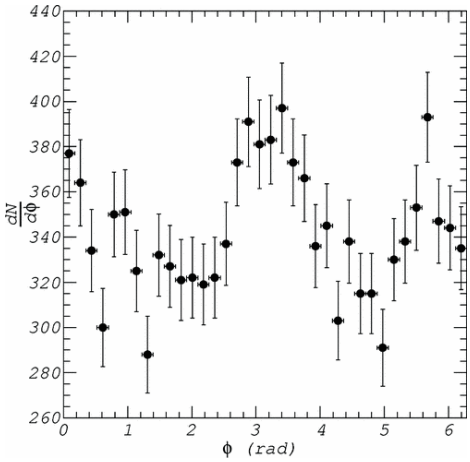


Fig. 2. Density of charged particles as a function of the azimuthal angle ϕ in the plane transverse to the beam direction, simulated by HIJING and modified by an elliptic flow with $v_2 = 0.10$.

of particle flow, but it will be sufficient for the purpose of our study.

3. SPHERICAL HARMONIC DECOMPOSITION AND ANALYSIS OF THE SYMMETRIES OF THE MODEL

The harmonic analysis of particle production in heavy ion collisions focus typically on the Fourier decomposition of the ϕ-dependence (see fig. 2) over a narrow region in pseudorapidity around $\eta = 0$. Here, we contrast this procedure with the one employed in the CMB data analysis that starts from an expansion of the entire twodimensional map $f(\theta, \phi)$ in terms of spherical harmonics

$$Y_{l,m}(\theta, \phi),$$

$$f(\theta, \phi) = \sum_{l=1}^{l_{\max}} \sum_{m=-l}^{l} a_{l,m} Y_{l,m}(\theta, \phi),$$

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

where $a_{l,m} = |a_{l,m}| \exp(-im\Phi_{l,m})$ are the coefficients of decomposition with amplitudes $|a_{l,m}|$ and phases $\Phi_{l,m}$ for each component l, m, $P_l^m(\cos\theta)$ are the associated Legendre polynomials, and

$$C^S(l) = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{l} |a_{l,m}|^2 \quad (2)$$

the total power spectrum.

As it is seen from eq. (1), the constant term with $l = 0$ which corresponds to the average density of the particles on the sphere is not included in our analysis. Thus, $f(\theta, \phi)$ represents the fluctuations of the number density of particles with respect to the mean value and it can take positive or negative values. The parameter $l_{\max}$ in eq. (1) characterizes the angular resolution of the map. In principle, infinitely precise pointing resolution requires ($l_{\max} \to \infty$) which is computationally prohibitive. In the CMB analysis, one choses the parameter $l_{\max}$ according to the angular resolution of the experimental data which is dictated by the segmentation of the detector. For instance, $l_{\max} = 100$ corresponds to an angular resolution $\Delta = \pi/l_{\max} \simeq 1.8°$. In heavy ion physics, other physics considerations such as the typical angular separation of nearest charged tracks in the $\Delta\eta$ and $\Delta\phi$ may motivate the choice of $l_{\max}$. In the following, we use a resolution $l_{\max} = 100$ that is sufficiently high to reveal fluctuations on small scale. We work for illustrative purposes with the standard GLESP [38] pixelization where $l_{\max} = 100$ corresponds to a number of pixels in the θ-direction $N_\theta = 2l_{\max} + 1$ and in the azimuthal direction $N_\phi = 2N_\phi$.

3.1. Mollweide projection of heavy ion events

To familiarize ourselves with the main features of a CMB-like harmonic analysis of heavy ion collisions, we start from a 'baseline' distribution $f(\theta, \phi)$ of a heavy ion collision in which features of global collective dynamics are absent. To this end, we consider as baseline a HI-JING event without superimposed flow signal ($v_2 = 0$). Fig. 3 shows the corresponding fluctuations of the distribution $f(\theta, \phi)$ in the so-called Mollweide projection that is heavily used in CMB analysis. In this representation the polar angle θ runs vertically from the 'north pole' to the 'south pole' and the azimuthal angle ϕ runs along the 'equator' from the center to left. Let us pause to discuss in more detail the information shown in this map.

We have seen already in the context of fig. 1 that particle distributions are approximately flat in a wide window of the polar angle $\frac{\pi}{4} < \theta < \frac{3\pi}{4}$. Accordingly, the particle density and fluctuations in θ remain approximately unchanged in a broad band around the equator of the Mollweide projection (see upper part of fig. 3). Larger particle densities are found at the poles reflecting the large number of particles emitted at small angles with respect to the beam direction (see bottom panel of fig. 1). This enhanced particle yield at the poles is a kinematically trivial but potentially confounding factor for studies that aim at establishing event-by-event global or local signals on top of an event-average background that varies significantly in η or θ. Thus, irrespective of the choice

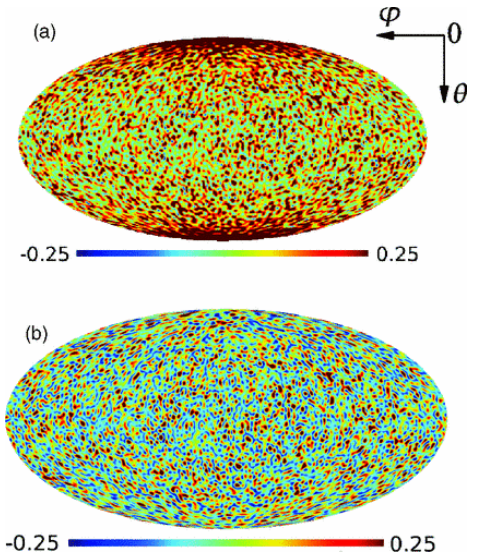


Fig. 3. Top: Mollweide projection of a single HIJING event without flow. The azimuthal angle ϕ runs along the 'equator', the polar angle θ runs from pole to pole. The color coding tracks deviations relative to the average level of counts. Bottom: The $m = 0$ mode has been removed from the map. The angular resolution of the maps corresponds to $l_{\max} = 100$ (see eq. (1). The multiplicity of the event is 17000.

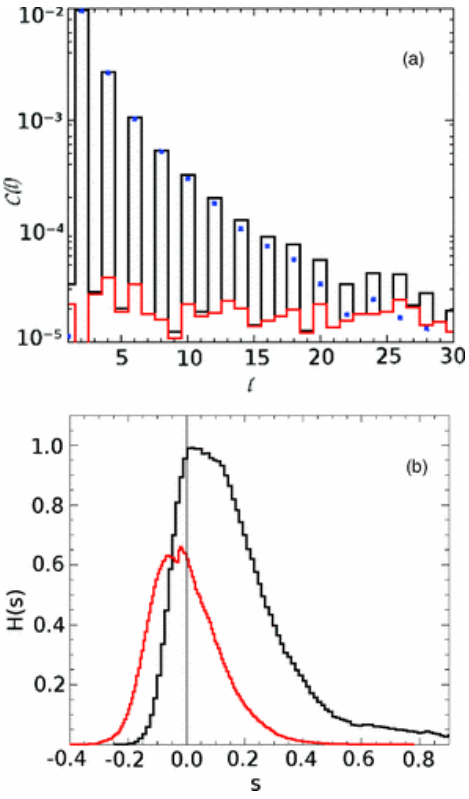


Fig. 4. Top panel: power spectra for the map from Fig. 3. The black line is the total power spectrum $C^S(l)$, the blue dots are for the $m = 0$ mode only and the red line is for the $|m| \geq 1$ modes. Bottom panel: the normalized distribution function $H(s)$ for versus amplitude of fluctuations s for the total signal (the black line) and for the signal with $|m| \geq 1$ (the red line).

of coordinates, the question arises to what extend potentially interesting information about fluctuations and azimuthal asymmetries can be disentangled from the strongly varying background in η or θ. The approximately uniform distribution of fluctuation in the lower panel of fig. 3 demonstrates that removing from the expansion of $f(\theta, \phi)$ the $m = 0$ mode of the harmonic decomposition goes a long way towards achieving this aim. We note that the $m = 0$ spherical harmonic components do not depend on ϕ but only on θ. Therefore, removing this component will remove the dominant dependence on the average pseudorapidity particle distribution without modifying any flow signal. In general, a dependence of particle distributions on pseudo-rapidity will remain after subtraction of the dominant $m = 0$ component, of course. In appendix A, we explain how an arbitrary η-dependence can be dealt with in the present formalism. For the sake of a particularly transparent presentation, we focus in the main text on the simpler case in which the η-dependence can be treated satisfactorily by subtracting the $m = 0$ mode.

To further quantify this separation of background from fluctuations, we discuss now in more detail the spherical harmonic analysis of $f(\theta, \phi)$. Using eq. (1) and, for instance, the GLESP transform method, we can decompose this distribution into its multipole components (see Appendix A for details). The result of this operation is the set of amplitude coefficients $a_{l,m}$. With a suitably high choice of $l_{\max}$ all morphological features of the initial angular distribution of counts are preserved. For the decomposition we have used $l_{\max} = 100$ in accordance with the original binning of the fluctuations shown in fig. 3. The corresponding power spectrum $C(l)$ is shown in the top panel of fig. 4.

In the case of a perfect reflection symmetry of particle production around mid-rapidity, $\theta - \frac{\pi}{2} \leftrightarrow -(\theta - \frac{\pi}{2})$, the odd components $C^S(l)$ of the total power spectrum vanish. Event-by-event fluctuations, however, will break this reflection symmetry. As a consequence of such fluctuations, the top panel of fig. 4 shows very small but non-vanishing values $C^S(l) \in [10^5; 10^4]$ for essentially all odd integers l. In contrast, the even

modes of $C^S(l)$ are for small even integers l up to a factor 1000 larger since they are dominated by the strong dependence of particle production on pseudorapidity. Removing the dominant $m = 0$ mode from this power spectrum, we see that all even and odd modes in $C^S(l)$ have now approximately equal signal strength, and that the odd modes do not change in strength. This quantifies the extent to which removing the $m = 0$ mode removes the trivial background dependence without affecting information on fluctuations. We conclude that this procedure allows one to represent a 'baseline' event, in which fluctuations are superimposed on top of a varying background, in a way in which the varying background is efficiently removed and fluctuations dominate the visual representation (see fig. 3) and the statistical information (see fig. 4). We shall discuss in the following section how this changes if the event contains, for example, a collective flow component.

We finally mention yet another way of checking that removal of the $m = 0$ mode isolates information about the nature of fluctuations in the event. To this end, we recall that $a^{l,m=(1)^m a_{l,m}}$, and we write the power spectrum of eq. (2) in the form

$$C^S(l) = C(l) + D(l) = \frac{|a_{l,m=0}|^2}{2l+1} + \frac{2}{2l+1}\sum_{m=1}^{l} |a_{l,m}|^2. \quad (3)$$

The first part of eq. (3), $C(l)$, corresponds to the most symmetric $m = 0$ azimuthal modes, while the second part, $D(l)$, shows the power spectrum of fluctuation above the $|m| = 0$ threshold. It would be worth to note, that both these components have significantly different statistical properties, which can be characterized in terms of the probability distribution functions. The bottom panel of fig. 4 shows the difference in the statistical properties of the signal when all m modes are included (black) and the case $|m| \leq 1$ (red). Normalized to the total number of pixels ($N_{\rm tot} \simeq 8l^2_{\rm max}$), the probability distribution function, $H(s)$, is defined as the number of pixels with corresponding amplitude of fluctuation within an interval $[s - \delta s, s + \delta s]$. Here, $\delta s = (s_{\rm max} - s_{\rm min})/N_{\rm bin}$, $s_{\rm max}$ and $s_{\rm min}$ are the absolute maxima and minima of the signal in the map with $m \leq 1$ (red), and $N_{\rm bin} = 200$ is a number of intervals (bins). As it is seen from fig. 4 the probability distribution function for signal with removed the $m = 0$ mode, is quite close to a Gaussian distribution, while the one including all m modes (black) is far from a symmetric Gaussian distribution with respect to $s = 0$.

To the extent to which the $m = 0$-mode dominates the distribution, any distortion of the morphology of the map will provide relatively small corrections to the total power spectrum C^S, but it may result in strong modifications of the power spectrum $D(l)$ (see eq. (3)), and of the corresponding multipole coefficients $a_{l,m}$. Note that any features of the $a_{l,m}$ and of the corresponding power spectrum can be detected only if they exceed the level of statistical event-by-event fluctuations. This is why the above mentioned 'Gaussianisation' trend of the probability distribution function for the sub-dominant component power spectrum, $D(l)$, reflects the level of detectability of particular features with small amplitudes above the statistical level.

4. SINGLE EVENT υ_n-FLOW

Due to Lorentz contraction the colliding ultrarelativistic nuclei appear pancake-like just before a heavy ion collision in the laboratory frame of reference. For non-central collisions, the overlap between the two nuclei has an approximately almond-shaped cross section. This initial and anisotropic collision geometry results in large pressure gradient differences along the principal axes of the distribution and gives rise to a fluid dynamical flow characterized by fundamental properties of the fluid like the reinteraction time and residual interaction between the constituents. This flow, in turn, leads to an anisotropic distribution of particle momenta and numbers in the transverse plane which may be quantified as a function of the azimuthal angle, ϕ [40, 41].

Recent experimental results from both RHIC and the LHC suggest that the particle flow is established at the quark-gluon level over a characteristic time scale of about $12 fm/c$ and that the flow is quite sensitive to detailed features of the system, such as the viscosity [30, 31]. Recently, the presence of higher order flow moments was understood as resulting from fluctuations around the almond shape in the initial collision geometry [14–20].

In the present study, the angular distribution of particles produced in each heavy ion collision will be viewed as a 'stochastic' map

$$S(\theta,\phi) = f(\theta,\phi)\left[1 + 2\sum_n \upsilon_n \cos[n(\phi - \Psi_n)]\right]. \quad (4)$$

This expression maps the random distribution of particles without flow, $f(\theta,\phi) = d^2N/d\phi d\eta|_{\upsilon_n=0}$ onto a distribution $S(\theta,\phi) = d^2N/d\phi d\eta$ that shows azimuthal dependencies with harmonic flow amplitudes υ_n in azimuthal orientations Ψ_n. The model distributions considered in the following were obtained in line with this expression by modulating, a posteriori, an azimuthal uniform distribution $f(\theta,\phi)$ simulated in HIJING or a simple random generator with prescribed flow amplitudes υ_n with angular orientations

Ψ_n[1]. The case $n = 2$ corresponds to so called *elliptic flow*, to which we restrict ourselves in the present study. For simplicity, the model used in this section assigns the same flow value to all regions of η and transverse momentum p_t, and to all particle species (e.g. mesons and baryons). This could be extended easily to account for dependencies in these parameters, or to treat the flow coefficients as random functions with statistical properties that differ from those of $f(\theta,\phi)$. The arguments in the present study will not require such a more detailed modeling.

A typical experimental task is to extract from a given particle distribution $d^2N/d\phi d\eta$ the flow coefficients υ_n, defined as [47]

$$\upsilon_n = \langle\langle e^{in(\phi-\Psi_n)}\rangle\rangle. \quad (5)$$

Here $\langle\langle..\rangle\rangle$ denotes the average over all particles for each heavy ion collision and over the entire statistical ensemble of events. The following discussion will not involve this later step. Rather, we shall discuss how different flow coefficients υ_n and event planes Ψ_n can be identified in a CMB-like harmonic analysis of *single heavy ion events*. To this end, we decompose eq. (4) in spherical harmonics

$$b_{l,m} \simeq a_{l,m} + \sum_n \upsilon_n (c_{l,m+n} e^{-in\Psi_n} + c_{l,m-n} e^{in\Psi_n}). \quad (6)$$

Here, $b_{l,m}$ are the coefficients of the spherical harmonic decomposition for $S(\theta,\phi)$, and $c_{l,m\mp n} = a_{l,m} g(l,m,\mp n)$, where $g(l,m,\mp n) = 2\pi N_{l,m\mp n} N_{l,m} \int_{-1}^{1} dx P_l^{m\mp n}(x) dx P_l^m(x)$. This type of equation is also encountered in the CMB data analysis [48] for cases where the statistical isotropy of the signal is broken by regular modulations. We now discuss this equation in more detail.

4.1. υ_n-modulation with $n = even$

The iterative solution of eq. (6) has an especially simple form for even-$n, n = 2k, k = 1, 2....$ In this case, the dominant component of the $a_{l,m}$-coefficients is associated with $m = 0$ modes, and $l = even$. As we have pointed out in section 3, the strongest component of the $f(\theta,\phi)$ signal is the $m = 0$ component (blue dots in fig. 4). This implies that, in eq. (6), the last term in the brackets $a_{l,mn}$ is maximal, if m.

[1] In general, the event plane angles Ψ_n are correlated to the azimuthal orientation Ψ_R of the reaction plane, that is defined as the plane spanned by the impact parameter vector and the beam direction. However, while Ψ_R and the Ψ_n's are correlated, they are in general not identical and different harmonic modes can be correlated differently. Therefore, there will be in general an event plane angle Ψ_n associated with each harmonic n, that may be determined in a more comprehensive analysis in terms of higher order harmonics, and different Ψ_n's will not coincide in general.

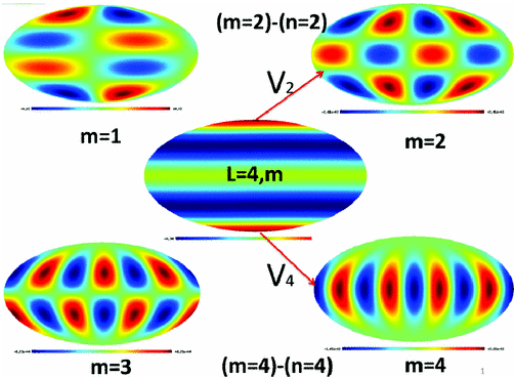


Fig. 5. Schematic representation of the contribution of υ_2 (elliptic) and υ_4 flow to the various m components of the $b_{l=4,m}$-coefficient. The υ_2-modulation will change the amplitude and the phase of the $b_{4,2}$ coefficient without contributing to the other components. The υ_4 modulation will only change the $b_{4,4}$ component.

For $m = 0$, eq. (6) reads

$$b_{l,0} = a_{l,0} + \sum_n \upsilon_m (c_{l,n} e^{-in\Psi_n} + c_{l,-n} e^{in\Psi_n}) = a_{l,0} + 2\sum_n \upsilon_m |c_{l,n}| \cos(n(\phi_{l,n} - \Psi_n)), \quad (7)$$

where we have used the relation $a_{l,m} = (1)^m a^{l,m}$. For the scenario studied here, we can neglect in eq. (7) the second term ($\propto \upsilon_n |c_{l,n}|$) relative to the first one, due to the inequality $|a_{l,0}| \gg |c_{l,n}|$ which follows from the dominance of the $m = 0$ modes. We consequently obtain the following approximate solution: $b_{l,0} \simeq a_{l,0}$.

The coefficients $b_{l,m}$ vanish for $l < |m|$. As a consequence, in eq. (6), for instance, the coefficient $b_{l,m}$ with $m = 2$ and $l = 2$ is connected to the υ_2 component only, and does not receive contribution from higher flow momentum with $n > 2$. For $l = 4$ there exists only two terms in $b_{4,m}$ which are in resonance with the $b_{4,0}$ mode: $b_{4,2}$ through the υ_2 term in eq. (6), and $b_{4,4}$ through υ_4. We illustrate these relations further in fig. 5. We note that the elliptic flow will also provide a $b_{4,3} \leftrightarrow b_{4,1}$ coupling, but this effect is significantly smaller ($\sim \upsilon_2$), in comparison with the discussed $b_{4,2}$ and $b_{4,4}$ components. These features of eq. (6) motivate to use

$$b_{n,n} = a_{n,n} + \upsilon_n b_{n,0} g(n) e^{in\Psi_n}, \quad (8)$$

as a basis for separating the contributions from different υ_n, where $g(n) = 2\pi N_{n,0} N_{n,n} \int_{-1}^{1} dx P_n^0(x) P_n^n(x)$ (see Appendix A).

For a sufficiently large flow signal, such that $|a_{n,n}| \ll \upsilon_n |b_{n,0}| g(n)$, the iterative solutions of Eq. (8)

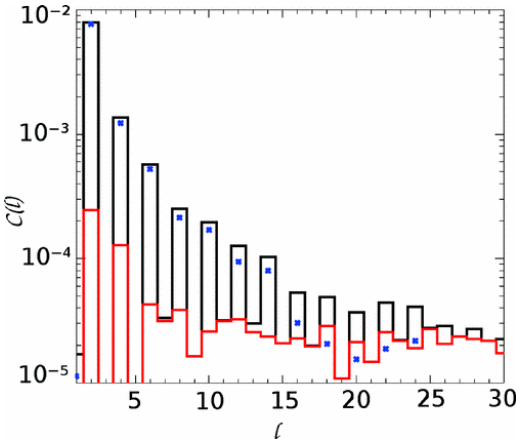


Fig. 6. The power spectrum for an event with elliptic flow $v_2 = 0.07$. The total power $C^S(l)$ is shown in black, the blue stars correspond to $C^S(l)D(l) = C(l)$, and the $D(l)$ power spectrum is shown in red (see eq. (3)).

for the amplitude of the flow v_n and the event plane Ψ_n for a single event are then given by

$$v_n \simeq \frac{|b_{n,n}|}{g(n)|b_{n,0}|},\ n\Psi_n = \phi_{n,n}. \tag{9}$$

4.2. v_n-modulation with $n = odd$

The method presented above clearly illustrates how spherical harmonics with $l = even$ give access to amplitudes of the v_n-flow coefficients with $n = 2, 4, 6...$ We now focus on the odd harmonics v_n, $n = 1, 3, 5, ...$ that are known to provide information about the fluid dynamic response to fluctuations present in the initial stage of heavy ion collisions. To this end, we study the $b_{l,m}$-basis of eq. (6) for the case $l = even$ and $n = odd$. We start from the most powerful $l = 2$ and $l = 4$ components of $b_{l,m}$ under consideration (see fig. 4). For the quadrupole component, $l = 2$, in the presence of even and odd flow harmonics, the "resonant" component $b_{2,m}$ for v_1 is $b_{2,1}$:

$$b_{1,2} =\simeq v_1 c_{2,1} e^{i\Psi_1} \tag{10}$$

where the phase of the event plane Ψ_1 corresponds to v_1-flow. In eq. (10) the major contribution to $b_{2,1}$ is given by the first term, proportional to the most powerful component $a_{2,0} \simeq b_{2,0}$, and

$$b_{2,1} \simeq v_1 b_{2,0} g_1 e^{i\Psi_1},\ v_1 = \frac{|b_{2,1}|}{g_1|b_{2,0}|},\ \Psi_1 = \phi_{2,1}, \tag{11}$$

where $\phi_{2,1}$ is the phase of the $b_{2,1}$-component, and $g_1 = 4\pi \int_0^1 dx P_2^0(x) P_2^1(x)$. It is obvious that for any odd n the corresponding solution for the amplitude and the phase is given by

$$v_n = \frac{|b_{n+1,n}|}{g(n+1)|b_{n+1,0}|},\ n\Psi_n = \phi_{n+1,n}, \tag{12}$$

where $g(n+1) = 4\pi \int_0^1 dx P_{n+1}^0(x) P_{n+1}^n(x)$. Similar to $n = even$ case, the phase of the event plane for $n = odd$ can be reconstructed also from $\phi_{n,n}$ phase as follows: $n\Psi_n = \phi_{n,n}$.

Note that all methods of reconstructing the orientation of the reaction plane(s) in heavy ion collisions distinguish between the 'true' reaction plane Ψ_n and the orientation of the event plane reconstructed from experimental data $\Psi_n^{\rm exp}$. Uncertainties in extracting the true parameter from a statistically finite amount of data are characterized by quoting the finite resolution. That means that, in respect to the statistical ensemble of realizations, v_n and Ψ_n should be treated as random variables with probability density functions P_{v_n} and P_{Ψ_n}. Performing the same estimation as in eq. (9) and eq. (12) for each event we can determine the number of realizations with v_n and Ψ_n within a given interval of uncertainty, and in fact, we can obtain the probability distribution functions P_{v_n} and P_{Ψ_n} for a given ensemble of realizations. Then, one can define the first moments of the corresponding variables $\langle v_n \rangle$ and $\langle \Psi_n$, for a statistically finite amount of data. We will illustrate this approach in the next section.

5. ELLIPTIC FLOW: THE CASE $n = 2$

Here, we further illustrate how the symmetries of the spherical harmonic representation of the particle distribution can be used to extract the elliptic flow signal following eq. (9). As discussed in Section 3 and shown in fig. 2, this signal is a modulation of the random background particle distribution by a factor $\propto v_n \cos(2\phi - \Psi)$. In fig. 6 we show the corresponding power spectrum using a flow of $v_2 = 0.07$. The power in the components $D(l), l = 2, 4, 6, 8$ is seen to be significantly higher than the asymptotically flat and small $D(l) \simeq$ const values, obtained from a random realization without flow (see fig. 4). It is in this way that the CMB-like harmonic analysis identifies - on the basis of a single event and without recourse to an event sample - the presence of a signal on top of random localized fluctuations. The enhancement of the even low-l multipoles originates from flow contributions to $b_{2,2}$, $b_{4,2}$, $b_{6,2}$. Expressing these multipoles via eq. (6), we find

$$D(l) = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=1} |a_{l,m} + v_2 b_{l,0} g(n) \delta_{m,n} e^{in\Psi_n}|^2$$
$$\simeq v_2^2 C(l) g^2(n) + \overline{D}(l), \tag{13}$$

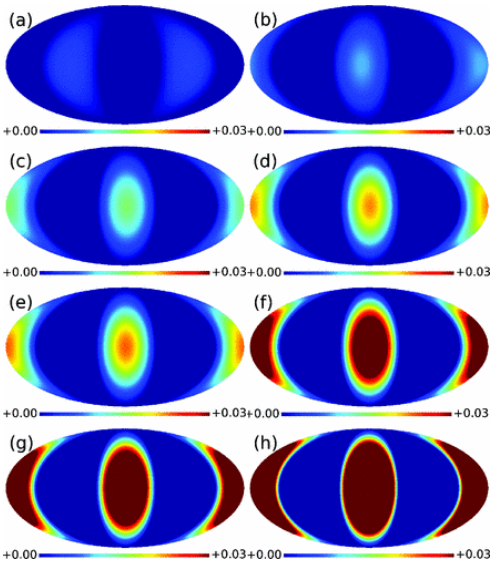


Fig. 7. From the top left down to the bottom right: Maps of the $|b_{22}|$ amplitude for input flow values of $v_2 = 0, 0.01, 0.05, 0.075, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$, respectively. For simplicity $\Psi_R^2 = 0$ in all maps. A different reaction plane angle would manifest itself as a phase shift in the 'East-West' direction.

where $(2l+1)\overline{D}(l) = \sum_{m=1} |a_{l,m}|^2$.

We discuss now in further detail the relation between the flow signal and the multipole components determined in a CMB-like harmonic analysis. In a Mollweide projection, one can visualize easily how the $|b_{2,2}|$ component changes with a flow signal varying between $v_2 = 0$ to $v_2 = 0.5$ see fig. 7. In fig. 8, we demonstrate this dependence beyond the level of single events by averaging over samples of 10^5 events with a specific flow amplitude v_2. We see that there is a linear relation between v_2 and the ratio of the dominant quadrupole components $|b_{2,2}|$ and $|b_{2,0}|$. The small error bars shown in fig. 8 correspond to a 1σ standard deviation. They illustrate the degree to which in the present model study fluctuations at the single event are small compared to the event-averaged mean. An analogous conclusion can be drawn from fig. 9 about the correlation between the true event plane (Ψ_R), which is known for each simulated event, and the phase $\phi_{2,2}$ determined in the analysis (see eq. (9)). The insert shows the distribution of the difference $\Psi_R - 0.5\phi_{2,2}$ which is a measure of the event plane resolution obtained in this method. The distribution is consistent with a Gaussian with mean value $\mu \approx 0$ and standard deviation $\sigma = 0.0254$rad. The tight correlation between both orientations is due to the fact that particles at all rapidities show on average the same azimuthal correlations and this contributes to constraining statistical fluctuations in $\phi_{2,2}$.

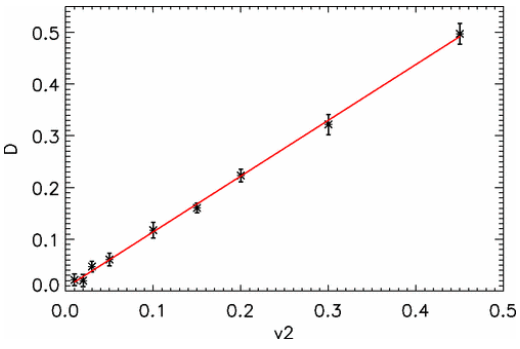


Fig. 8. Estimator $D = |b_{2,2}|/g(2)|b_{2,0}|$ for the elliptic flow amplitude obtained for single events plotted versus the v_2 value used in the simulations. The error bars correspond to 68% confidence level.

We finally indicate how a CMB-like harmonic analysis can be used to assign to an event a probability that the measured harmonic components result as fluctuations from a random background, rather than in response to a collective flow signal. To assess this question, we have generated the distribution of $|a_{2,2}|$ values obtained by decomposing 10^5 events without flow into spherical harmonics. The probability P of assigning a given event as a random background for, say $v_2 = 0.01$, can be defined as the number of realizations without flow above the limit of $|b_{2,2}|$ corresponding to $v_2 = 0.01$. We have found 9230 out of 10^5 random realizations, and the probability of correctly concluding an elliptic flow value of $v_2 = 0.01$ to an

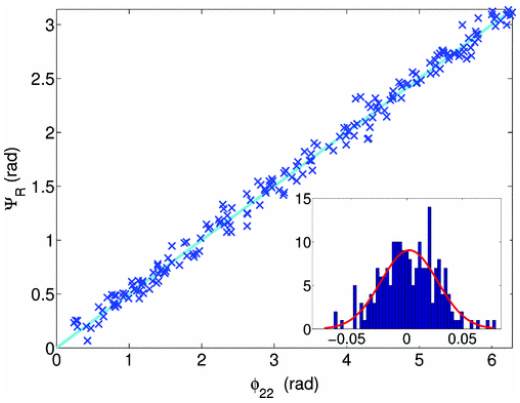


Fig. 9. The reaction plane angle Ψ_R (rad) for each of 202 HIJING events with flow = 0.07 versus the phase $\phi_{2,2}$ (rad) obtained from the analysis described in eq. (9). The insert shows the distribution of the difference $\Psi_R - 0.5\phi_{2,2}$ (rad).

event with this $|b_{2,2}|$ analysis is therefore $1-P \simeq 90\%$. For a five times larger signal $v_2 = 0.05$, the corresponding level of detectability is better than 99,999%. We parallel this analysis for the harmonic component $|b_{2,1}|$ and have confirmed the fact that the limits for $v_2 = 0.01$ and $v_2 = 0.05$ both lie around the average of the background distribution.

The exploratory analysis presented here involves information about the simulated events that is not directly accessible experimentally. For instance, experimental data do not allow to check directly the correlation between $|b_{2,2}|$ and the 'true flow signal v_2', or between $\phi_{2,2}$ and the 'true reaction plane Ψ_R', as done in fig. 8 and fig. 9. In this sense, our discussion serves mainly the purpose to illustrate that a CMB-like harmonic analysis can be applied to individual heavy ion events and that it has the sensitivity of associating flow values and event planes to single events in a meaningful way. We further note that while figs. 8 and 9 are not directly measurable, closely related quantities are. For instance, one could plot the ratio of the quadrupole components $|b_{2,2}|$ and $|b_{2,0}|$ as a function of event centrality to characterize the nature of event-by-event fluctuations in an experimentally measured event sample. We also note that we have tested the sensitivity of the method to a coarser binning of the primary particle multiplicity information, as it could result from a finite binning of the detectors. We find no significant difference in the results when using 100 bins in η and 40 bins in ϕ. Also, methods have been developed for the CMB analysis to handle partial detector acceptance and efficiency etc. A more detailed discussion of these aspects will be left to further work.

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The present work is a bold exploratory step aimed at testing the use of CMB-like analysis tools for the study of high-multiplicity heavy ion collisions. It parallels other recent efforts, see e.g. [28, 29]. We started from representing simplified simulations of heavy-ion collisions in a Mollweide projection commonly used in the CMB analysis. We then asked how pertinent features of heavy ion collisions, including collective flow and small-scale fluctuations manifest themselves visually in such a representation, and how they are characterized by standard CMB tools.

A CMB-like analysis of fluctuations is based on an expansion in terms of spherical harmonics and thus returns the two-parameter set of coefficients $b_{l,m}$. For the characterization of collective flow phenomena, that show up as purely azimuthal dependencies, the azimuthal harmonics with flow amplitudes v_n provide a complete set of functions. Therefore, the larger set of coefficients $b_{l,m}$ must arguably contain redundancies for the characterization of collective flow in heavy ion collisions. However, event-wise fluctuations in heavy ion collisions are not confined to the azimuthal ϕ-direction and may be expected to show locally no preferred orientation in the η-ϕ-plane. Our study indicates that the larger set $b_{l,m}$, while showing redundancies for the characterization of ϕ-dependent phenomena, may offer novel opportunities towards characterizing small-scale fluctuations in heavy ion collisions and separating them from flow effects. For instance, we observed that due to the $\eta \to -\eta$ reflection symmetry of event-averaged identical nucleus-nucleus collisions, expansion coefficients with even integers l are inevitably dominated by event-wise fluctuations. The set of these coefficients may then be used as a baseline on top of which collective or global event properties can be established. We have discussed all possible generalizations of the method in Appendix A, focusing on θ-dependency of the amplitude of the flow. This baseline allowed, for instance, to check in fig. 4 to what extent removal of the $m = 0$ mode subtracts efficiently the effects of a rapidity-dependent multiplicity distribution from a fluctuation analysis. And we have seen in the discussion of fig. 6 how the larger set of coefficients $b_{l,m}$ can help visually and statistically to identify flow on top of a fluctuating background.

For the detection of flow-like azimuthal modulations, the method used here is limited by the level of statistical noise $v_n \geq N^{-\frac{1}{2}}$, where N is the multiplicity. Thus, for $v_n \sim 10^2$ the corresponding multiplicity required is in order of 10^4 particles, which is close to the parameters at the LHC. This is parametrically the same dependence as e.g. in a flow analysis in terms of second order cumulants. Higher order cumulant expansions can improve this statistical limit. In this sense, the CMB-like analysis of heavy ion collisions shown here provides an alternative for characterizing collective flow but does not offer obvious parametric advantages. However, it offers arguably a very well-suited setting for analyzing those event-wise fluctuations that remain once the dominant azimuthal modulations have been removed. In analogy to the questions asked in cosmology, one can then characterize what sets the scale of these remaining fluctuations. For instance, which physics underlies the fluctuations seen in a Mollweide projection of heavy ion collisions after removal of flow harmonics, such as in fig. 3. How are these fluctuations sensitive to resonance decays, jet-like particle correlations or jets? On which scales could critical phenomena leave characteristic signatures? Which similarities or characteristic differences could be expected for the corresponding maps based on fluctuations in the distribution of electric charge, or strangeness content? We intend to follow up these and further questions in the analysis of real data, as well as in further model studies. Some of these questions are well known in CMB science, when we can

use , for instance, optimal filter approach to amplify the point-like sources , incorporated into diffuse background. This method in combination with wavelet transform of the signal can potentially detect localized features with very small amplitude of heavy ion collisions, which can be associated with low amplitude jets. This work is in progress and will be published in a separate paper.

ACKNOWLEDGMENTS

We are grateful to A. Bilandzic, S. Floerchinger, J. Nagle, R. Snellings and E. Shuryak for very useful discussions, and anonymous referee for very stimulated comments. We thank the Danish Natural Science Research Council (FNU) and the Danish National Research Foundation (Dansk Grundforsknings Fond) for support. O.V. thanks Dmitry Zimin's nonprofit Dynasty Foundation for the support. This work is a part of CERN-LFI PLANCK collaboration. We are thankful to N. Mandolesi for support and useful discussions.

A. Stochastic equation and general description of modulation

In this appendix we discuss how the method of section 4 can be generalized to an analysis that accounts for an arbitrary dependence of $\upsilon_n = \upsilon_n(\theta)$ on pseudorapdity $\eta = \ln(\tan(\frac{\theta}{2}))$. This can be done by multiplying the stochastic equation by functions $W(\theta)$ with different shapes. The stochastic equation for modulations of the random signal is given by:

$$S(\theta,\phi) = f(\theta,\phi)\left[1 + 2\sum_n \upsilon_n \cos(n(\phi - \Psi_n))\right] = f(\theta,\phi) + \sum_n \upsilon_n [e^{in\Psi_n} s^+(\theta,\phi) + e^{-in\Psi_n} s^-(\theta,\phi)], \quad \text{(A1)}$$

where

$$s^+(\theta,\phi) = f(\theta,\phi)e^{-in\phi},\ s^-(\theta,\phi) = f(\theta,\phi)e^{in\phi}. \quad \text{(A2)}$$

The distribution $S(\theta,\phi)$ can have a significant θ-dependence. We weigh the left and right hand side of eq. (A1) by the window function $W(\theta)$,

$$\hat{F}S(\theta,\phi)W(\theta) = \hat{F}S(\theta,\phi)W(\theta) + \upsilon_n \hat{F}W(\theta)[e^{in\Psi_n} s^+(\theta,\phi) + e^{-in\Psi_n} s^-(\theta,\phi)], \quad \text{(A3)}$$

where $\hat{F}$ is the linear operator of the spherical harmonic decomposition

$$\hat{F}... = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} d\theta \sin\theta Y^*_{l,m}(\theta,\phi).... \quad \text{(A4)}$$

In radioastronomy, this is referred to as the apodization approach and it serves to amplify some particular range of the (θ,ϕ) map, in order to reduce some very bright sources of contamination of the signal under investigation. Here, we use it to select bins in θ for a characterization of the dependence of the signal on pseudo-rapidity. The coefficients of the spherical harmonic decomposition read then

$$b_{l,m} = c_{l,m\upsilon n} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} d\theta \sin\theta \times \times Y^*_{l,m}(\theta,\phi)[e^{in\Psi_n} s^+(\theta,\phi) + e^{-in\Psi_n} s^-(\theta,\phi)].$$
$$b_{l,m} = \hat{F}W(\theta)S(\theta,\phi),\ c_{l,m} = \hat{F}W(\theta)f(\theta,\phi). \quad \text{(A5)}$$

Using the spherical harmonic decomposition $f(\theta,\phi) = \sum_{l',m'} a_{l',m'} Y)l',m'(\theta,\phi)$, from eq. (A5) we have

$$c_{l,m} = \hat{F}W(\theta)f\theta,\phi) = \sum_{l',m'} a_{l',m'} G^{l',m'}_{l,m}(n=0),$$
$$s^+_{l,m} = \sum_{l',m'} a_{l',m'} G^{l',m'}_{l,m}(n),$$
$$s^-_{l,m} = \sum_{l',m'} a_{l',m'} G^{l',m'}_{l,m}(-n) \quad \text{(A6)}$$

where

$$G^{l',m'}_{l,m}(n) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} d\theta \sin\theta Y^*_{l,m}(\theta,\phi) \times \times Y_{l',m'}(\theta,\phi)W(\theta)e^{in\phi}. \quad \text{(A7)}$$

The coefficients of the spherical harmonic decomposition satisfy then

$$b_{l,m} = c_{l,m} + \upsilon_n \left[e^{in\Psi_n} s^+_{l,m} + e^{-in\Psi_n} s^-_{l,m}\right]. \quad \text{(A8)}$$

It is technically advantageous to introduce the variable $x = \cos\theta$. With the help of

$$Y_{l,m} = \sqrt{\frac{(2l+1)}{4\pi}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P^m_l(x)e^{im\phi} = = N_{l,m}P^m_l(x)e^{im\phi}, \quad \text{(A9)}$$

one can then express the coefficients in eq. (A8) as

$$s^+_{l,m} = \sum_{l',m'} a_{l',m'} G^{l',m'}_{l,m}(n) \simeq \simeq \delta_{m,n} \sum_{l'} a_{l',0} G^{l',0}_{l,n}(n) + O(a_{l,0}),$$

$$G^{l',0}_{l,n}(n) = 2\pi N_{l,0} N_{l',n} \times \times \int_{-1}^{1} dx W(x) P^0_{l'}(x) P^n_l(x). \quad \text{(A10)}$$

The case of a θ-independent distribution that we discussed predominantly in the main text, is recovered for $W(x) = 1$. In this case, one can use the integrals

$$\int_{-1}^{1} dx P_l^0(x) P_l^2(x) = -\frac{2l(l-1)}{2l+1},$$

$$\int_{-1}^{1} dx [P_l^m(x)]^2 = \frac{2}{2l+1}\frac{(l+m)!}{(l-m)!} \tag{A11}$$

to write

$$G^{2,0}_{2,2}(n=2) = -\frac{1}{\sqrt{6}},\ G^{2,0}_{2,0} = 1. \tag{A12}$$

According to eq. (6), this gives

$$\upsilon_2 \simeq \sqrt{6}\frac{|b_{2,2}|}{|b_{2,0}|}. \tag{A13}$$

In order to analyze the θ-dependency of the amplitude of the flow $\upsilon_n(\theta)$, keeping in eq. (A1) the azimuthal modulations proportional to $\cos(n(\phi - \Psi_n))$. Then, we can decompose the amplitude of the flow through Legendre polynomials:

$$\upsilon_n(\theta) = \upsilon_n \sum_q C_q^m P_q(\cos\theta) \tag{A14}$$

where: $\upsilon_n = \text{const}$, and C_q^n are the coefficients of decomposition. Obviously, the decomposition of $\upsilon_n(\theta)$ in the form of eq. (A14) is not unique. One can use, for instance the associated Legendre polynomials $P_l^n(\theta)$, instead of Legendre polynomials. The particular choice of the orthogonal functions should reflect the properties of the effects of modulations under investigation.

In the most general case, azimuthal modulations are no longer separable from polar ones. In heavy ion physics, this is the case e.g. for jet-like particle correlations. Instead of eq. (A1), the starting point for analyzing such modulations would be then the stochastic equation

$$S(\theta,\phi) = f(\theta,\phi)[1 + 2V(\theta,\phi)], \tag{A15}$$

where

$$V(\theta,\phi) = \sum_l \sum_{m=-l}^{l} V_{l,m} Y_{l,m}(\theta,\phi). \tag{A16}$$

The coefficients $S_{l,m}$ of the spherical harmonic decomposition can be expressed as $S_{l,m} = a_{l,m} + D_{l,m}$, where

$$D_{l,m} = 2\sum_{l'=1}^{\infty}\sum_{m'=-l'}^{l'}\sum_{l''=0}^{\infty}\sum_{m''=-l''}^{l''}(-1)^m a_{l'm'} V_{l'',m''} \times$$
$$\times \sqrt{\frac{(2l''+1)(2l'+1)(2l+1)}{4\pi}} \begin{pmatrix} l'' & l' & l \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} l'' & l' & l \\ m'' & m' & -m \end{pmatrix}, \tag{A17}$$

and $a_{lm} = \hat{F} f(\theta,\phi)$. This equation is well known in CMB physics (see for instance [49]). The major difference between modulation of the signal in form of eq. (A16) and $\upsilon_n = \text{const}$ is related to redistribution of the power from even multipoles to odd ones, if $V_{2n+1,m}$ has non-zero components. In the case when only $V_{2n,m}$-coefficients are non-vanishing, this quadrupole modulation will redistribute the power from the n-th mode to $n1$,$n+1$ modes, where $l = 2n$ and change the orientation of the quadrupole from very planar ($\upsilon_2 = \text{const}$) to non-planar, depending on amplitude of 2, 1-component. We shall explore in future work to what extent eqs. (A16) and (A17) allow to investigate more complex modulations of the particle distribution in high-multiplicity heavy ion collisions.

BIBLIOGRAPHY

1. U. W. Heinz, in *Relativistic Heavy Ion Physics', Landolt-Boernstein New Series, I/23*, edited by R. Stock (Springer Verlag, New York, 2010), Chap. 5., arXiv:0901.4355.
2. P. Romatschke, Int. J. Mod. Phys. **E19**, 1 (2010), arXiv:0902.3663.
3. D. A. Teaney, arXiv:0905.2433.
4. T. Hirano, Prog. Theor. Phys. Suppl. **168**, 347 (2007), arXiv:0704.1699.
5. K. Aamodt, et al. (The ALICE Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 252302 (2010).
6. G. Aad, et al. (ATLAS Collaboration), arXiv:1203.3087.
7. J. Velkovska, et al. (CMS Collaboration), J. Phys. G **38**, 124011 (2011).
8. I. Arsene, et al. (The BRAHMS Collaboration), Nucl. Instrum. Methods **A757**, 1 (2005).
9. B. B. Back, et al. (The PHOBOS Collaboration), Nucl. Instrum. Methods **A499**, 603 (2003).
10. K. Adcox, et al. (The PHENIX Collaboration), Nucl. Instrum. Methods **A457**, x (2005).
11. K. H. Ackermann, et al. (The STAR Collaboration), Nucl. Instrum. Methods **A757**, x (2005).

12. K. H. Ackermann, et al. (The STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. **86**, 402 (2001).
13. S. S. Adler, et al. (The PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **94**, 111601 (2003).
14. B. Alver and G. Roland, Phys. Rev. C **81**, 054905 (2010), Erratumibid. **82**, 039903(E) (2010).
15. P. Sorensen, J. Phys. G **37**, 094011 (2010).
16. A. Adare, et al. (The PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **107**, 252301 (2011).
17. K. Aamodt, et al. (The ALICE Collaboration), Phys. Rev. Lett. **107**, 032301 (2011).
18. D. Teaney and L. Yan, Phys. Rev. C **83**, 064904 (2011), arXiv:1010.1876.
19. B. H. Alver, C. Gombeaud, M. Luzum, and J.-Y. Ollitrault, Phys. Rev. C **82**, 034913 (2010), arXiv:1007.5469.
20. R. S. Bhalerao, M. Luzum, and J.-Y. Ollitrault, Phys. Rev. C **84**, 034910 (2011), arXiv:1104.4740.
21. P. A. R. Ade, et al. (The PLANCK Collaboration), Astron. Astrophys. **536**, 1P (2011).
22. C. L. Bennett, et al., Astrophys. J. **464** ,L1 (1996), arXiv:astro-ph/9601067v1.
23. N. Jarosik, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 14 (2011), arXiv:astro-ph/1001.4744.
24. B. P. Crill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 527 (2003), arXiv:astro-ph/0206254v2.
25. A. T. Lee, AIP Conf. Proc. **476**, 224 (1999), arXiv:astro-ph/9903249v2.
26. S. Padin, et al., Astrophys. J. **549**, L1 (2001), arXiv:astro-ph/0012211v2.
27. A. Kosowsky, New Astron. Rev. **47**, 939 (2003), arXiv:astro-ph/0402234v1.
28. A. P. Mishra, R. K. Mohapatra, P. S. Saumia, and A. M. Srivastava, Phys. Rev. C **77**, 064902 (2008), Phys. Rev. C **81**, 034903 (2010).
29. A. Mocsy and P. Sorensen, Nucl. Phys. A **855**, 241 (2011).
30. D. Teaney, Phys. Rev. C **68**, 034913 (2003), arXiv:nucl-th/0301099.
31. P. Romatschke and U. Romatschke, Phys. Rev. Lett. **99**, 172301 (2007).
32. H. Holopainen, H. Niemi, and K. J. Eskola, Phys. Rev. C **83**, 034901 (2011), arXiv:1007.0368.
33. Z. Qiu, C. Shen, and U. W. Heinz, Phys. Lett. B **707**, 151 (2012), arXiv:1110.3033.
34. B. Schenke, S. Jeon, and C. Gale, Phys. Rev. C **85**, 024901 (2012), arXiv:1109.6289.
35. S. S. Gubser and A. Yarom, Nucl. Phys. B **846**, 469 (2011), arXiv:1012.1314.
36. P. Staig and E. Shuryak, Phys. Rev. C **84**, 034908 (2011), arXiv:1008.3139.
37. S. Floerchinger and U. A. Wiedemann, JHEP **1111**, 100 (2011), arXiv:1108.5535.
38. A. G. Doroshkevich, P. Naselsky, O. Verkhodanov, et al., IJMP **14**, 275 (2005).
39. P. A. R. Ade, et al. (The PLANCK Collaboration), Astron. Astrophys. **536**, 2P (2011).
40. J. Y. Ollitrault, Phys. Rev. D **46**, 229 (1992).
41. S. A. Voloshin, A. M. Postkanzer, and R. Snellings, in *Relativistic Heavy Ion Physics, Landolt-Bornstein* (Springer Verlag, Berlin, 2010), Vol.1, 5.
42. X. -N. Wang and M. Gyulassy, Phys. Rev. D **44**, 3501 (1991).
43. T. Sjostrand, S. Mrenna, and P. Skands, JHEP **05**, 026 (2006).
44. T. Sjostrand, Comput. Phys. Commun. **39**, 347407 (1986).
45. R. J. Glauber, *Lectures in Theoretical Physics*, Ed. by W.E. Brittin, L.G. Dunham, (New York: Interscience, 1959).
46. A. Bialas, M. Bleszynski, and W. Czyz, Nucl. Phys. B **111**, 461 (1976).
47. S. Voloshin and Y. Zhang, Z. Phys. C **70**, 655 (1996).
48. C. L. Bennet, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser **192**, 17 (2011), arXiv:1001.4758v2.
49. D. Hanson, A. Lewis, Phys. Rev. D **80**, 063004 (2009).

ТЕКУЩИЙ СТАТУС БАЗЫ ДАННЫХ CATS*

О. В. Верходанов[1], С. А. Трушкин[1], Х. Андернах[2], В. Н. Чрененков[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Отделение астрономии университета Гуанахуато, Мексика

Мы описываем текущий статус CATS публично доступной базы данных (web-сервер `http://cats.sao.ru`), позволяющей проводить поиск в сотнях каталогов астрономических объектов, излучающих в широком диапазоне электромагнитного спектра. Акцент сделан в основном на источниках радиоконтинуума, наблюдаемого на частотах от 30 до 15000 МГц. Во вторую очередь представлены такие объекты, как радиоизлучающие и активные звезды, планетарные туманности, HII-области, остатки сверхновых (SNR), пульсары, ближайшие галактики, активные ядра галактик (AGN) и квазары. CATS также включает каталоги крупнейших внегалактических обзоров, таких как NVSS, FIRST, WENSS, VLSS, TXS, GB6, SUMSS. IRAS, 2MASS, SDSS, ROSAT, PGC, MCG и др. В 2004г. CATS содержала $\sim 10^9$ записей более чем из 400 каталогов радио-, ИК-, оптического и рентгеновского диапазонов, включая большинство каталогов РАТАН-600. CATS продолжает расширяться и пополняться как новыми опубликованными каталогами, так и более старыми, которые впервые переведены в электронную форму. Описаны принципы организации базы данных астрофизических каталогов и основные функции CATS.

Ключевые слова: астрономические базы данных: каталоги — радиоастрономия: радиоисточники

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени уже опубликован гигантский объем астрофизический информации, которая получена из наблюдений больших и малых областей неба. Обычно эта информация включает координаты наблюдаемых объектов и их физические характеристики в различных диапазонах, записываемые в форме каталогов источников. Фактически каждый новый крупномасштабных наблюдательный эксперимент дает новый каталог объектов. Современная астрофизика оперирует параметрами источников, полученными в различных спектральных диапазонах длин волн с целью детального изучения физических свойств и процессов излучения этих объектов. Возможность использования различных каталогов значительно упрощает эту задачу.

За последние десятилетия было сделано несколько различных попыток объединения большого числа астрономических каталогов и организации доступа к ним единообразным путем. Эти попытки можно грубо классифицировать по двум категориям: базы данных объектов и браузер каталогов. Пример первых — это NED ([1, 2]), Simbad ([3, 4]) и LEDA ([5]). Примеры вторых — это Vizier ([6]) и AstroBrowser ([7], `http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ab/`).

Потребность в оперативном доступе к информации, возникающая при наблюдениях на радиотелескопе РАТАН-600 и исследовании радиоисточников, а также неполнота представления каталогов радиоисточников в существующих на то время базах данных побудили авторов этой работы создать (1994-1995 гг.) систему поддержки астрофизических каталогов CATS *Astrophysical* **CAT***alogues* **S***upport System*. Следуя радиоастрономическим нуждам, архитектуре операционной системы, а также потребностям астрономического сообщества, рассмотренным в обзорах [8–10], мы выбрали более предпочтительный для нас путь разработки базы данных CATS как браузера каталогов, а не как базы данных объектов. Это позволило нам достигнуть лучшей полноты в числе записей, то есть более полного покрытия измерениями радиоисточников всего радиочастотного окна. Таким образом, мы сознательно отложили предоставление возможности кросс-идентификации всех каталогов, предусмотренное в базах данных NED,

*Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН, 2005. 58. С. 118

SIMBAD или LEDA, на более поздний этап. В этом плане CATS является идеально приемлемой для опытного исследователя, который ищет наибольшее число доступных данных, но желает и умеет при этом правильно проводить кросс-идентификацию. Его усилия будут вознаграждены лучше полнотой данных, найденных с помощью CATS, чем с помощью других существующих баз данных.

Первые шаги создания CATS описаны в [11–15], а также в [16]. CATS позволяет работать с каталогами записанными в ASCII-формате и в виде FITS Binary table, а также работать с континуальными радиоспектрами и вычислять спектральные индексы по данным различных радиокаталогов. Описываемая база данных расположена на сервере `cats.sao.ru` Специальной астрофизической обсерватории РАН, работает по OS Linux Fedora Core 2, Dual Opteron 244.

2. РЕАЛИЗАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ

База данных состоит из каталогов, их описаний и соответствующих программ, работающих под OS Unix. Программы разработаны на алгоритмическом языке “C” и собраны с помощью C-компилятора проекта GN. Тексты программ являются открытыми для пользователей при условии, что они будут применяться для некоммерческих целей. На рис. 1 показана схема базы данных CATS.

Новые каталоги могут быть добавлены в систему в соответствии со следующими правилами:

1) Каждый новый каталог объектов должен располагаться в директории UNIX с тем же именем, что и астрономический каталог объектов.
2) В этой же директории должно содержаться и описание каталога.
3) Программа (или командные файлы) для локальной работы с каталогом объектов также находятся в этой директории.
4) Краткие характеристики, имена программ и файл описания астрофизического каталога содержатся в базе данных описаний каталогов ‘cats_descr’.

База данных описаний каталогов ‘cats_descr’ содержит следующую информацию: имя каталога, совпадающее с именем директории UNIX, тип каталога (радио, оптические, смешанные и пр.), частота или диапазон длин волн, минимальные потоки и величины, диапазоны экваториальных и галактических координат, имена локальных программ для функций ‘select’ и ‘match’ (см. ниже соответствующий раздел), имя файла с описанием каталога, число записей в каталоге, размер диаграммы направленности радиотелескопа или угловое разрешение, калибровочный параметр (если имеется) для перевода плотностей потока в согласованную шкалу потоков, а также ссылка на соответствующую публикацию. Параметры из файла описаний используются также и в программах, которые обрабатывают входные данные для ускорения поиска. Например, заданные пользователем пределы координат и плотностей потока оповещают работающие программы о соответствующих зонах поиска и таким образом экономят время вычислений, если заданный каталог выпадает из требуемого диапазона. Если для заданного поля информация отсутствует, символ ‘n’ возвращается в соответствующую колонку и рассматривается как ‘пустое поле’ или ‘неизвестное значение’. Этот символ является приемлемым для программ, работающих с базой данных.

Нижний уровень управления системой CATS включает несколько базовых утилит:

- ‘c_sel’ выбирает объекты с параметрами из заданного диапазона.
- ‘c_match’ ищет объекты, попадающие внутрь координатного бокса ошибок.
- ‘cats_divide’ работает с каталогами, отсортированными по прямому восхождению, и выдает индекс номера записи, соответствующий реальному прямому восхождению.
- ‘epoch’ вычисляет эпоху и стандартную эпоху. Эпоха вычисляется, если задано значение, отличное от 1-Янв-2000 или 1-Янв-1950[1], в противном случае вычисляется стандартная эпоха. Каталог хранится в исходной эпохе, как он был подготовлен, и координаты объектов пересчитываются на эту эпоху.
- ‘cats_base’ управляет базой данных описаний ‘cats_descr’ и выдает входные параметры для программ ‘c_sel’ и ‘c_match’.

Для каталогов, записанных в формате FITS Binary table (например, каталог NVSS или SDSS), созданы особые программы типа ‘select’ и ‘match’.

Чтобы организовать доступ локального пользователя CATS из какой-либо директории ОС, работающие программы, обслуживающие основные задачи CATS, размещены в общедоступной и опрашиваемой директории OS UNIX. Управляющие процедуры ‘cats_sel’ и ‘cats_match’, организованные как командные файлы языка *shell*, накрывают областью действия все программы нижнего уровня и обеспечивают интерфейс между CATS и локальным пользователем, а также запросами, сделанными через HTTP или e-mail. Описанные метод хранения каталогов облегчает развитие базы данных, а пополнение новыми данными и дает возможность

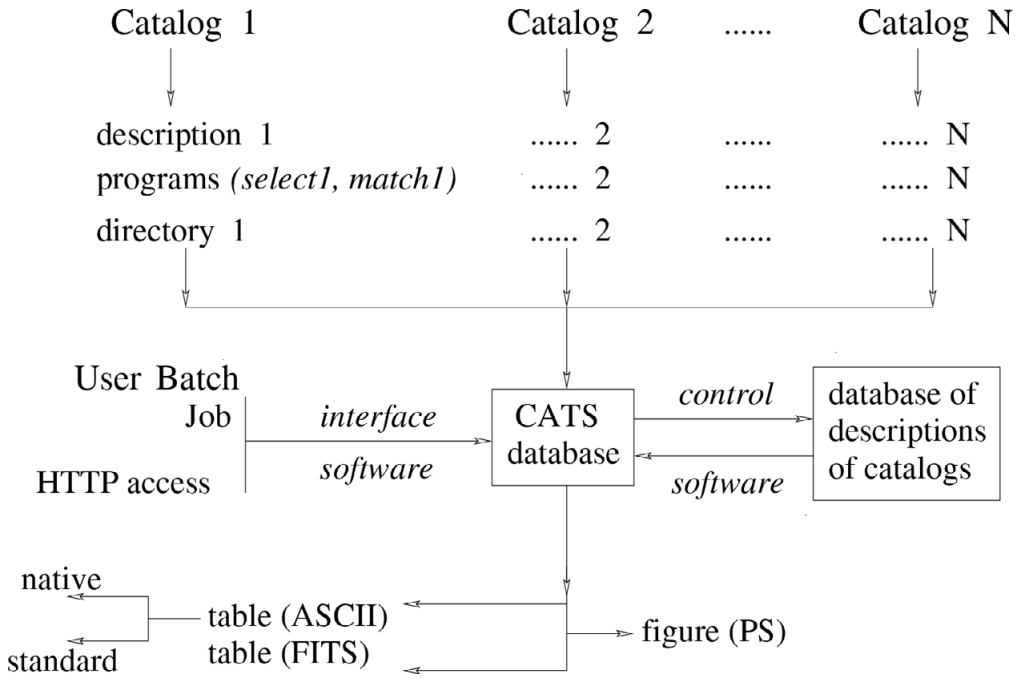


Рис. 1. Основные элементы структуры базы данных и их взаимодействие: программы и описания объединяются в соответствующих директориях ОС. Информация о директориях и именах программ содержится в базе данных описаний 'cats_descr'. База данных CATS запрашивает требуемую информацию из репозитория 'cats_descr'. Пользовательские запросы выборки и идентификации могут быть обработаны в фоновом (batch) режиме или с помощью HTTP-доступа. Выводимые таблицы оформляются в "исходном" или "стандартном" форматах (см. текст).

настраивать поддерживающие программы.

CATS имеет свою собственную индексирующую процедуру 'cats_divide' для координат объектов каталоге. Программы определяют, с какой записи начинать проводить поиск во входном каталоге по индексу, полученному из отсортированного по прямому восхождению списка. Это позволяет использовать поисковые функции жесткого диска. Во избежание проблем поиска в пределах нескольких градусов в околополюсной зоне при пересчете из одно эпохи в другую мы обрабатываем в этих зонах все записи, чтобы найти искомый источник. Сейчас рассматривается индексация списков CATS по прямому восхождению.

3. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ

К настоящему моменту в CATS реализованы следующие функции:

1) Выборка объектов из одного или нескольких каталогов по основным параметрам: экваториальные или галактические координаты, плотности потоков, спектральные индексы, частоты, имена и (для ряда каталогов) типы объектов. Параметры, общие для всех каталогов (координаты и плотности потока), используются в открытом доступе.
2) Поиск отождествления объектов (выбирается из одного или нескольких каталогов) по координатам, попадающим в кружок, эллипс или бокс ошибок.
3) Кросс-идентификация различных каталогов. В настоящее время эта процедура доступна только для локальных пользователей. Она перенаправляет вывод результата выборки в данной зоне из одного каталога на вход процедуры отождествления с другим каталогом.
4) Получение краткого описания каждого каталога, распечатка полного списка каталогов в искомой зоне неба (для локального пользователя).
5) Построение радиоспектров выбранных источников. Это возможно сделать для мно-

гочастотных каталогов либо для каталогов, полученных в результате кросс-идентификаций, выполненных с помощью CTAS для радиокаталогов на различных частотах. Спектр может быть построен даже индивидуальным пользователем для результата выборки по частотам и плотностям потока конкретного источника (`http://cats.sao.ru/~satr/SP/spectrum.html`). Эта функция реализована в двух процедурах. Первая — на Java-скрипте для стандартизованного формата выходных данных CATS для одиночных объектов, доступна через web-страницу. Вторая реализована в локальной системе обработки данных FADPS для списков объектов.

Результат выборки объектов представляет собой файл данных, отсортированных в соответствии с различными характеристиками (прямое восхождение (по умолчанию), склонение или частота). Этот файл может быть выведен на экран или послан пользователю в следующих форматах:

1) "Исходный" (оригинальный) формат каталога (т.е. расположение колонок в соответствии с опубликованным форматом); для пользователя может выводиться заголовок с кратким описанием колонок в дополнение к строчкам с источниками.
2) Стандартный выходной формат. Этот формат сделан общим для всех каталогов и используется в дальнейшем для объединения данных, построения спектров и статистического анализа. Стандартный заголовок FITS Table может быть добавлен к выводимой таблице.

Результат выборки затем может быть использован для последующего изучения спектров радиоисточников или статистических свойств объектов в гибкой системе обработки данных РАТАН-600 FADPS ([17]) или, например, для селекции далеких объектов в комбинации с оценками красного смещения и возраста галактик с помощью системы "Эволюция радиогалактик" ([18]).

4. ДОСТУП К CATS

Различные моды доступа организованы в соответствии с запросами пользователей и целями CATS, согласно современным тенденциям развития астрономического программного обеспечения. Разработаны три главные моды on-line доступа к данным CTAS:

1) **Диалоговая мода** (неграфическая) сохранятся до сих пор. Несколько командных файлов, созданных на языке *shell* OS UNIX ([11]), позволяют работать с поддерживающими CATS программами с использованием протоколов TCP/IP и NFS в локальной сети.
2) **Гипертекстовый доступ** (`http://cats.sao.ru`) позволяет пользователю работать с базой данных CATS из Интернета через HTTP-протокол. Он дает возможность выполнять описанные операции через web-страницу.
3) **ftp-доступ** (`ftp://cats.sao.ru`) позволяет пользователю получать как описания каталогов CATS, так и сами каталоги. Ниже приведен пример FTP-доступа к CATS анонимного пользователя и копирования каталога WISH:

```
anonymous@ftp://cats.sao.ru
ftp> bin
ftp> cd WISH
ftp> get wish11.cat
ftp> bye
```

Имена всех каталогов хранятся в файле описаний 'cats_descr' (`ftp://cats.sao.ru/cats_descr`).
4) **e-mail-доступ** позволяет пользователю посылать фоновые (batch) запросы в CATS. Можно послать электронное письмо с запросом отождествления списка или выборки по нескольким параметрам. e-mail-запрос будет прочитан автоматически и передан на выполнение командным файлам CATS. Результат автоматически будет послан назад пользователю по электронной почте.

4.1. Процедуры 'select' и 'match'

Две главные процедуры выборки данных работают на различных уровнях управления CATS. Это процедуры 'select' (выборка по параметрам) и 'match' (поиск соответствующего объекта из каталога). Они обеспечивают первые три основные функции, описанные выше, и реализованы на различных уровнях доступа. Как уже говорилось выше, две процедуры нижнего уровня 'c_sel' и 'c_match' выбирают информацию в соответствии с пользовательским запросом и передают ее командным файлам верхнего уровня 'cats_sel' и 'cats_match'.

Использование этих двух процедур делает возможных кросс-идентификацию каталогов, когда вывод результата работы функции 'select' при выборке всего каталога подается на вход функции 'match' второго каталога или списка каталогов.

4.2. Доступ по e-mail

Чтобы сэкономить реальное время пользователя и избежать задержки при обмене данными в режиме on-line, мы предоставляем возможность посылки batch-задания в форме электронного письма.

Запросы по e-mail могут иметь несколько форматов (для получения правил оформления запросов можно послать пустое письмо по адресу cats@sao.ru, поле 'subject' необязательно). Ниже показаны 2 примера оформления e-mail запросов к CATS ('subject' не указан).

- Задача выборки:
  mail -s cats@sao.ru

```
cats select
ra min=10:30 max=10:40:00
dec > 10' < 12' 30"
flux > 0.5mJy
catalogs r equinox=1950
cats end
```

- Задача подборки пары:
  mail -s cats@sao.ru

```
cats match
catalogs NVSS,FIRST
window box x=30" y=10'
sources:
s1 02:02:00    +31:23:16    1950
s2 02:23:10     34:03:00    1950
s3 21:26:33.9  -18:34:33.0  1950
cats end
```

Эти примеры показывают, как используются ключевые слова в batch-запросах (см. результаты обработки этих запросов в табл. 1 и 2). Запрос должен начинаться строкой `cats start` и завершаться строкой `cats end`. Первый пример показывает, как производить поиск внутри заданных пределов координат с использованием операторов (`min, max`) или ($<$, $>$) для прямого восхождения (`ra`) и склонения (`dec`). Выражение с ключевыми словами `'catalogs r'` устанавливает тип каталогов, используемых для выборки. Здесь `'r'` означает все радиокаталоги. Вместо `'r'` можно выбрать `'o'` — для оптических каталогов, `'x'` — для рентгеновских, `'ir'` — для инфракрасных, или можно просто использовать список имен каталогов, разделенных запятой (например, `'catalogs NVSS,FIRST,WISH'`)[1]. Ключевое слово `epoch` устанавливает эпоху входных координат. `'Flux'` устанавливает пределы задания плотности потока.

Второй пример e-mail-задания — процедура кросс-идентификации. Здесь используются дополнительные ключи `'window box x=30"y=10"`, где `'box'` — тип окна отождествления (другие возможные `'circle'` и `'ellipse'`), `'x'` и `'y'` — размеры соответственно по горизонтальным и вертикальным направлениям осей координат. Заметим, что `x` и `y` — это половинные длины сторон бокса ошибок при заданном параметре `'box'`, для ключевого слова `'circle'` — это радиус, а для ключевого слова `'ellipse'` — малая и большая полуоси эллиса. В настоящий момент позиционных угол (PA) эллипса ошибок пока не может быть задан и предполагается PA $= 0°$(т.е. большая полуось располагается по направлению Север-Юг). Ключевое слово `'sources:'` показывает, что следующие за ним записи, разделенные символом новой строки, являются координатами источников для процедуры отождествления. Каждая запись содержит имя объекта, его экваториальные координаты (R.A. и Dec.) и соответсвующую эпоху.

Ключевые слова в batch-запросе могут быть разделены пробелом, табуляцией или символом новой строки.

Полную информацию о ключевых словах можно получить, послав пустое электронное письмо по адресу `cats@sao.ru` (поле 'subject' в письме не требуется).

Результаты выполнения приведенных примеров запросов показаны в табл. 1 и 2.

5. ОСНОВНЫЕ КАТАЛОГИ

Основным источником каталогов CATS (по числе списков) является коллекция одного из авторов работы — Х. Андернаха ([8, 10]), который приложил большие усилия к восстановлению более старых списков источников, недоступных прежде в электронной форме, используя сканер и распознающее текст программное обеспечение. Эта коллекция каталогов пополнялась несколькими путями: добавлялись личные авторские копии, препринты astro-ph, таблицы из электронных журналов и архива каталогов CDS, а также осуществлялся ручной набор данных оригинального каталога. Около 70-ти каталогов были набраны и/или скорректированы вручную С. Трушкиным в САО РАН. Крупнейшие каталоги (такие, например, как NVSS, FIRST, SDSS и др.) были скопированы прямо с web-сайтов их авторов.

CATS является в основном радиоастрономической базой данных. Все основные каталоги, включенные в CATS, представлены в табл. 3 и 4 (являющихся обновлением из табл. 1 работы [10]).

[1]Полный список каталогов CATS может быть получен по ссылке `http://cats.sao.ru/doc/CATS_list.html`

Таблица 1. Пример вывода после выполнения запроса ‘select’. В колонки, соответственно, занесены имя каталога, имя источника, прямое восхождение (часы, минуты и секунды времена) объекта, ошибка RA в секундах времени (если имеется, иначе ‘n’), склонение (град ‘n’), частота (МГц), плотность потока (Ян), ошибка плотности потока (Ян), эпоха (‘J’ означает стандартную эпоху ‘J2000.0’, ‘B’ — стандартную эпоху ‘B1950.0’). Заметим, что в данном примере имена построены по координатам на эпоху J2000, а вывод запрошен на эпоху B1950.0 и, таким образом, дает RA и Dec, отличные от тех, что используются при построении имен на J2000.0.

```
# TASK: select
#    default input epoch: B1950.0
#    default output epoch: B1950.0
#    RA limits:    10:30:00.000 10:40:00.120
#    Dec limits:   00:10:00.001 00:12:29.999
#    GLon limits:  0 360
#    GLat limits:  -90 90
#    Flux limits: 0.0005Jy 1000000Jy
#---------------------------------------
# cat       name            RA          eRA      Dec        eDec  freq    Flux(Jy)     eFl equi.
#-------------------------------------------------------------------------------------------------
FIRST J103242.4-00331  10 30 08.668       n  +00 11 56.29      n  1400    0.01933  1.38e-04  B
NVSS  J103242-000332   10 30 08.7     0.054  +00 11 55.16   0.89  1400     0.0207     .0005  B
NVSS  J103343-000415   10 31 09.468   0.358  +00 11 14.17  12.24  1400     0.0040     .0006  B
NVSS  J103352-000433   10 31 18.72    0.281  +00 10 56.91   4.23  1400     0.0034     .0005  B
FIRST J103413.2-000432 10 31 39.430       n  +00 10 58.37      n  1400     0.0215  1.47e-04  B
FIRST J103413.2-000442 10 31 39.465       n  +00 10 48.12      n  1400    0.00735  1.46e-04  B
FIRST J103413.2-000453 10 31 39.502       n  +00 10 36.85      n  1400 9.9000e-04  1.46e-04  B
NVSS  J103413-000436   10 31 39.507   0.042  +00 10 54.34   0.73  1400     0.0317     .0005  B
FIRST J103748.6-000515 10 35 14.872       n  +00 10 20.65      n  1400    0.01031  1.48e-04  B
FIRST J103749.3-000522 10 35 15.577       n  +00 10 14.02      n  1400     0.0038  1.48e-04  B
NVSS  J103749-000521   10 35 15.601   0.052  +00 10 14.49   0.81  1400     0.0320     .0014  B
FIRST J103750.1-000525 10 35 16.372       n  +00 10 10.34      n  1400    0.01009  1.48e-04  B
FIRST J103846.6-000316 10 36 12.838       n  +00 12 21.62      n  1400    0.00132  1.38e-04  B
NVSS  J103749-000521   10 35 15.601   0.052  +00 10 14.49   0.81  1400     0.0320     .0014  B
FIRST J103750.1-000525 10 35 16.372       n  +00 10 10.34      n  1400    0.01009  1.48e-04  B
FIRST J103846.6-000316 10 36 12.838       n  +00 12 21.62      n  1400    0.00132  1.38e-04  B
NVSS  J103950-000324   10 37 16.805   0.598  +00 12 14.43   5.87  1400     0.0038     .0011  B
NVSS  J104008-000354   10 37 35.191   0.077  +00 11 45.81   1.27  1400     0.0134     .0005  B
FIRST J104008.9-000353 10 37 35.219       n  +00 11 45.97      n  1400    0.01254  1.47e-04  B
FIRST J104220.5-000409 10 39 46.783       n  +00 11 33.46      n  1400    0.00103  1.41e-04  B
#-------------------------------------------------------------------------
#The catalogue identifications listed are related to the following references:
#-------------------------------------------------------------------------
# FIRST   : 1997ApJ...475..479White+ FIRST survey catalogue at 1.4GHz
# NVSS    : 1998AJ....115.1693Condon+ 1996: NVSS survey catalog
```

Таблица 2. Пример вывода после выполнения запроса ‘select’. Первые 14 колонок соответствуют тем, что приведены в табл. 1. В других колонках, соответственно, даны расстояние от центра поиска (в секундах дуги), позиционных угол (в градусах от направления Север-Юг) радиуса-вектора, соединяющего центр поиска с обнаруженным объектом.

```
# TASK: match
# Search box 30 x 600 arcsec
# default input  epoch: J2000.0
# default output epoch: J2000.0

#----------------------------------------
# cat   name              RA        eRA      Dec       eDec freq Flux(Jy) eFl equi.dist," pa,^
#-------------------------------------------------------------------------------------------
#OBJECT: s1 02:02:00 +31:23:16 1950
WENSS WNB0202.5+3124 02 05 29.585     n +31 39 07.7      n  325  0.077  .0036  J  453.9  282
NVSS  J020529+313912 02 05 29.585 0.071 +31 39 12.15  0.98 1400 0.0170  .0005  J  456.7  282
#@-----------------------------------
#OBJECT: s2 02:23:10 34:03:00 1950
NVSS  J022526-341006 02 25 26.717 0.374 +34 10 06.63  3.85 1400 0.0037  .0005  J  664.4  125
NVSS  J022529+342450 02 25 29.186 0.412 +34 24 50.47   5.6 1400 0.0030  .0007  J  716.3   46
WENSS WNB0223.1+3408 02 26 10.154     n +34 21 30.7      n  325  3.678  .0045  J  301.8    1
GB6   J0226+3421     02 26 10.2     0.5 +34 21 25       8 4850  1.628   .145  J  296.1    1
NVSS  J022610+342130 02 26 10.337 0.036 +34 21 30.31  0.56 1400  2.8949 .0005  J  301.4    0
NVSS  J022649+340740 02 26 49.391 0.349 +34 07 40.85   4.2 1400  0.0034 .0007  J  715.4  222
#@---------------------------------------
#OBJECT: s3 21:26:33.9  -18:34:33.0  1950
NVSS  J212840-183008 21 28 40.07  0.272 -18 30 08.45  6.54 1400  0.0039 .0006  J  788.5  228
NVSS  J212840-181420 21 28 40.26  0.306 -18 14 20.93  3.08 1400  0.0048 .0005  J  722.6  306
NVSS  J212840-182926 21 28 40.26  0.537 -18 29 26.22  6.54 1400  0.0034 .0006  J    759  230
NVSS  J212841-181322 21 28 41.531 0.299 -18 13 22.25  5.09 1400  0.0049 .0006  J  744.6  310
NVSS  J212855-181737 21 28 55.425 0.035 -18 17 37.7   0.78 1400  0.1092 .0040  J  433.5  301
NVSS  J212859-181253 21 28 59.241 0.038 -18 12 53.21  0.65 1400  0.0462 .0018  J    600  328
NVSS  J212921-182122 21 29 21.414 0.032 -18 21 22.99  0.56 1400  1.4124 .0005  J    0.3  337
NVSS  J212945-182052 21 29 45.696 0.112 -18 20 52.35  1.61 1400  0.0089 .0005  J  346.9   85
NVSS  J212950-181500 21 29 50.726 0.387 -18 15 00.03  5.15 1400  0.0032 .0005  J  566.6   47
NVSS  J212952-182910 21 29 52.722 0.045 -18 29 10.27  0.7  1400  0.0372 .0015  J  645.2  136
#@---------------------------------------
#The catalogue identifications listed are related to the following references:
#-----------------------------------------------------------------
# GB6     : 1996ApJS..103..427Gragory+ The GB6 catalog;;
# NVSS    : 1998AJ....115.1693Condon+ 1996: NVSS survey catalog (updated! - v.40, Jul-02);
# WENSS   : 1997A&AS..124..259Rengelink+ The WEsterbork Northern Sky Survey (WENSS).
```

Таблица 3. Основные радиоастрономические каталоги базы данных CATS.

Част. (МГц)	Имя	Год публ.	RA(h) или l(d)	Decl(°) или b(d)	Полу-ширина (дуг.мин)	S_{min} (мЯн)	Число объектов
10-25	UTR-2	78-95	0-24	>-13	25..60	10000	1754
38	8C	90/95	0-24	>+60	4.5	1000	5859
74	VLSS	2004	0-24	>-30	1.3	350	32521
80	CUL1	73	0-24	-48,+35	3.7	2000	999
80	CUL2	75	0-24	-48,+35	3.7	2000	1748
82	IPS	87	0-24	-10,+83	27 × 350	500	1789
151	6CI	85	0-24	<+80	4.5	200	1761
151	6CII	88	8.5-17.5	+30,+51	4.5	200	8278
151	6CIII	90	5.5-18.3	+48,+68	4.5	200	8749
151	6CIV	91	0-24	+67,+82	4.5	200	5421
151	6CVa	93	1.6-6.2	+48,+68	4.5	300	2229
151	6CVb	93	17.3-20.4	+48,+68	4.5	300	1229
151	6CIV	93	22.6-9.1	+30,+51	4.5	300	6752
151	7CI	90	(10.5+41)	(6.5+45)	1.2	80	4723
151	7CII	95	15-19	+54,+76	1.2	100	2702
151	7CIII	96	9-16	+20,+35	1.2	150	5526
160	CUL3	77	0-24	-48,+35	1.9	1200	2045
178	4C	65	0-24	-7,+80	15 × 7.5	2000	4844
232	MIYUN	96	0-24	+30,+90	3.8	100	34426
325	WENSS	98	0-24	+30,+90	0.9	18	229420
327	WSRT	91	5 fields	(+40,+72)	1.0	3	4157
352	WISH	2002	0-24	-25,-9	0.9	18	90357
365	TXS	96	0-24	-35.5,+71.5	.1	250	66841
408	MRC	81/91	0-24	-85,+18.5	3	700	12141
408	B2	70-73	0-24	+24,+40	3 × 10	250	9929
408	B3	85	0-24	+37,+47	3 × 5	100	13354
608	WSRT	91	sev.fields	(40,72)	0.5	3	1693
611	NAIC	75	22-13	-3,+19	12.6	350	3122
843	SUMSS	99	0-24	<-30	0.72	6	178975
1400	GB	72	7-16	+46,+52	10 × 11	90	1086
1400	GB2	78	7-17	+32,+40	10 × 11	90	2022
1400	WB92	92	0-24	-5,+82	1011	150	31524
1400	NVSS	98	0-24	-40,+90	0.9	2.0	1810668
1400	FIRST	98	7.3,17.4	22.2,57.6	0.1	1.0	811117

Таблица 3. (продолжение)

Част. (МГц)	Имя	Год публ.	RA(h) или l(d)	Decl(°) или b(d)	Полу-ширина (дуг.мин)	S_{min} (мЯн)	Число объектов
		98	21.3,3.3	-11.5,+1.6			
1400	PDF	98	1.1-1.3	-46,-45	0.1-0.2	0.1	1079
1500	VLANEP	94	17.4,18.5	63.6,70.4	0.25	0.5	2436
2700	PKS	(90)	0-24	-90,+27	8	50	8264
3900	Z	89	0-24	0,+14	1.2×52	50	8503
3900	RC	91-93	0-24	4.5,5.5	1.2×52	4	1189
3900	Z2	95	0-24	$0, +14$	1.2×52	40	2943
4850	MG1-4	86-91	var.	0,+39	3.5	50	24180
4850	87GB	91	0-24	0,+75	3.5	25	54579
4850	GB6	96	0-24	0,+75	3.5	18	75162
4850	PMNM	94	0-24	-88,-37	4.9	25	15045
4850	PMN-S	94	0-24	-87.5,-37	4.2	20	23277
4850	PMN-T	94	0-24	-29,-9.5	4.2	42	13363
4850	PMN-E	95	0-24	-9.5,+10	4.2	42	11774
4850	PMN-Z	96	0-24	-37,-29	4.2	70	2400
31	NEK	88	$350<l<250$	$\|b\|<2.5$	13×11	4000	703
151	7C(G)	98	$80<l<180$	$\|b\|<5.5$	1.2	100	6262
327	WSRTGP	96	$43<l<91$	$\|b\|<1.6$	1.0	10	3984
1400	GPSR	90	$20<l<120$	$\|b\|<0.8$	0.08	25	1992
1408	RRF	90	$357<l<95.5$	$\|b\|<4.0$	9.4	98	884
1420	RRF	98	$95.5<l<240$	$-4<b<5$	9.4	80	1830
1400	GPSR	92	$350<l<40$	$\|b\|<1.8$	0.08	25	1457
2700	F3R	90	$357<l<240$	$\|b\|<5$	4.3	40	6483
4875	ADP79	79	$357<l<60$	$\|b\|<1$	2.6	120	1186
5000	GT	86	$40<l<220$	$\|b\|<2$	2.8	70	1274
5000	GPSR	94	$350<l<40$	$\|b\|<0.4$	0.07	3	1272
5000	GPSR	79	$190<l<40$	$\|b\|<2$	4.1	260	915

Обозначения каталогов, содержащихся в CATS, и соответствующие ссылки даны в Приложении.

CATS также содержит наблюдательные и комбинированные каталоги остатков сверхновых в нашей Галактике (например, [19,20]), вторичные таблицы объектов, отобранных по спектральному индексу ([21–23]), переменности или свойствам активных галактических ядер (AGN) ([24, 25]). Кроме того, база данных включает каталоги источников, полученные путем кросс-идентификации каталогов внутри CATS (IRAS-TXS: [26,27]; UTR_ID: [28,29]; WMAP: [30]).

Таблица 4. Некоторые каталоги CATS других диапазонов длин волн.

λ	PGG	Публ.	RA	Dec.	Номер
opt	PGC	89	0-24	-90,+90	73197
opt	MCG	75	0-24	-33.5,+90	31886
opt	MSL	85	0-24	-90,+90	181603
opt	SDSS DR2	2004	several		Gals: 216906
			fields		QSOs:22033
ir	IRASPSC	87	0-24	-90,+90	245889
ir	IRASESC	89	0-24	$\|b\| > 10$	235935
ir	IRASSSC	89	0-24	-90,+90	43886
ir	2MASS	2000	0-24	-90,+90	470992970
Xray	ROSAT	95	0-24	-90,+90	74301
mix	QSO HB2	93	0-24	-84,+86	7315
mix	VERON+11	93	0-24	-83,+85	48921

6. ПРИМЕРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПИЧНЫХ ЗАДАЧ

- Выделение выборки радиоисточников с крутыми спектрами из каталога FIRST.

Чтобы решить эту проблему, можно использовать каталоги FIRST (1400 МГц) и Texas (365 МГц) в заданной площадке неба. Каталоги FIRST и Texas имеют пределы по плотности потока порядка 1 и 150 мЯн соответственно. Кросс-идентификация объектов в некоторой зоне неба, которую оба каталога перекрывают, выделит источники с искомыми свойствами. Таким образом, мы готовим 2 запроса: (1) выбрать все объекты из заданной площадки в каталоге FIRST с помощью функции 'select', (2) используя список источников FIRST, полученных в запросе (1), мы делаем кросс-идентификацию с данными Техасского каталога с помощью функции 'match'. Результирующий список может быть использован для завершения построения выборки с требуемыми параметрами в заданном участке неба.

- Отождествление объектов с оптическими каталогами, содержащимися в CATS.

Для решения задачи можно войти на web-страницу, содержащую список оптических каталогов, и ввести свой список объектов. Или, используя другой способ, можно выбрать ключевые слова 'catalogs o' в запросе по e-mail, ввести список интересующих объектов и послать запрос.

7. РЕЗЮМЕ

CATS представляет простой и удобный доступ к астрофизическим данным и дополняет данные, доступные из других источников, особенно плотности потоков, измеренные при наблюдениях в непрерывном радиоспектре. В этом аспекте CATS является крупнейшей существующей базой данных. Работы с этой базой данных позволяет астрономам проводить поиск пекулярных объектов и исследовать физические процессы в источниках космического излучения.

До октября 2004г. мы зарегистрировали свыше 28000 запросов для процедур 'select' и 'match'. Наиболее популярными каталогами для копирования с помощью FTP за последние пять лет были QSO (Хьюит и Бербидж) (20 раз), PGS (19 раз) и NVSS (18 раз). CATS обрабатывает ежедневно до 1000 HTTP запросов информации по описанию каталогов.

CATS продолжает расширяться и сейчас содержит более 4000 каталогов различных диапазонов длин волн, включая все каталоги PATAN-600. К настоящему моменту база данных занимает около 60 Gb дискового пространства.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Обозначения каталогов приведены в табл. 5.

Таблица 5. Обозначения каталогов.

UTR-2	[31–36]	RC	[88, 89]
8C	[37]	Z2	[90]
VLSS	[38]	MG1-4	[91–94]
CUL1,2,3	[39]	87GB	[95]
IPS	[40]	GB6	[96]
6C	[37, 41–46]	PMN	[97, 98]
7C	[47–53]	NEK	[99]
4C	[54]	7C(G)	[100]
MIYUN	[55]	WSRTGP	[67]
WENSS	[56]	GPSR	[101–104]
WSRT	[57–67]	RRF	[105]
WISH	[68]	F3R	[106]
TXS	[69]	ADP79	[107]
MRC	[70]	GT	[108]
B2	[71]	PGC	[109]
B3	[72]	MCG	[110]
NAIC	[73, 74]	MSL	[111–114]
SUMSS	[75]	SDSS DR2	[115](список QSO), [116]
GB	[76–78]	IRASPSC	[117]: IRAS Point Source Catalog
WB92	[79]	IRASFSC	[117]: IRAS Faint Source Catalog
NVSS	[80]	IRASSSC	[117]: IRAS Serendipitous Survey Catalog
FIRST	[81]	2MASS	[118]
PDF	[83, 87]	ROSAT	[119]
VLANEP	[84]	QSO HB	[120]
PKS	[85, 86]	VERON+11	[121]
Z	[87]		

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарный Александру Копылову и Григорию Царевскому за тестирование процедур CATS и каталогов и за предложение ряда улучшений. Также авторы благодарят Н.Ф. Войханскую за полезные замечания при прочтении данной статьи. Работа была поддержана гранами РФФИ №96-07-89075, 02-07-90038.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Helou, B. F. Madore, M. D. Bicay, in *Windows on Galazies, Proceedings on the 6th Workshop of the Advanced School of Astronomy of the Ettore Majorana Centre, Erice, May 21-23, 1989, Dordrecht: Kluwer, 1990*, Ed. by G. Fabbiano, J. S. Gallagher, and A. Renzini (Astrophysics and Space Science Library, 1990), **160**, p. 109.
2. J. M. Mazzarella, B. F. Madore, J. Bennet, et al., in *Astronomical Data Analysis II. Proceedings of the SPIE*, Ed. by J.-L. Starck and F. D. Murtagh (2002), **4847**, 254.
3. D. Egret, Bull. Inf. CDS **24**, 109 (1983).
4. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **143**, 9 (2000), astro-ph/0002110.
5. G. Paturel, H. Andernach, L. Bottinelli, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **124**, 109 (1997).

6. F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout, Astron. Astrophys. **143**, 23 (2000).
7. HEASARC, The HEASARC Online Service. Available database. High Energy Astrophysics Science Archive Research Center. Greenbelt, MD 20771. USA (1992).
8. H. Andernach, Bull. Inf. CDS **38**, 69 (1990).
9. H. Andernach, Bull. Inf. CDS **45**, 35 (1994), astro-ph/9411027.
10. H. Andernach, in *Internet Resources for Professional Astronomy, Lecture Notes of a course given at IX Canary Islands Winter School of Astrophysics, "Astrophysics with Large Database in the Internet Age, Nov. 1997*, Ed. by M. Kindger, I. Pérex-Fournon, and F. Sánchez (Cambridge Univ. Press, ISBN 0 521 66308 3, 1999), p. 67, astro-ph/9807346.
11. O. V. Verkhodanov and S. A. Trushkin, Report No 228 SAO RAS, 1 (Library SAO, 1994).
12. O. V. Verkhodanov and S. A. Trushkin, Preprint No 106 SAO RAS, 66 (Nizhnij Arkhys, 1995).
13. O. V. Verkhodanov and S. A. Trushkin, in *Book of the XXVI Radio Astronomical Conference* (St.Petersburg, IAA RAS, 1995), p. 252.
14. O. V. Verhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, in *Astronomical Data Analysis Software and System VI*, Ed. by G. Hunt and H. E.Payne (ASP Conf. Ser, 1997) **125**, 322.
15. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, V. N. Chernenkov, and H. Andernach, Baltic Astronomy, **9**, 604 (2000).
16. S. A. Trushkin, O. V. Verkhodanov, V. N. Chernenkov, and H. Andernach, Baltic Astronomy, **9**, 608 (2000).
17. O. V. Verkhodanov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne. (ASP Conf. Ser., 1997), **125**, 46.
18. O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, et al., Astron. Astrophys. Trans., **19**, 662 (2000), astro-ph/9912359.
19. С. А. Трушкин, В. В. Витковский, и Н. А. Нижельский, Астрофиз. исслед. (Изв. САО) **25**, 81 (1987).
20. S. A. Trushkin, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **41**, 64 (1996).
21. K. C. Chambers, G. K. Miley, W. J. M. van Breugel, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **106**, 247 (1996).
22. H. J. A. Röttgering, M. Lacy, G. K. Miley, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **108**, 79 (1994).
23. C. De Breuck, W. van Breugel, H. J. A. Röttgering, and G. Miley, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **143**, 303 (2000).
24. Yu. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Yu. A. Kovalev, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **139**, 545 (1999).
25. Yu. A. Kovalev, Yu. Y. Kovalev, and N. A. Nizhelsky, Publ. Astron. Soc. Jpn. **52**, 1027 (2000).
26. S. A. Trushkin and O. V. Verkhodanov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **39**, 150 (1995).
27. O. V. Verkhodanov and S. A. Trushkin, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **50**, 115 (2000).
28. O. V. Verkhodanov, H. Andernach, and N. V. Verkhodanova, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **49**, 53 (2000), astro-ph/0008431.
29. O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, and H. Andernach, Astron. Rep. **47**, 110 (2003).
30. S. A. Trushkin, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **55**, 90 (2004), astro-ph/0307205.
31. S. Ya. Braude, A. V. Megn, S. L. Rashkovski, et al., Astrophys. Space Sci. **54**, 37 (1978).
32. S. Ya. Braude, A. V. Megn, K. P. Sokkolov, et al., Astrophys. Space Sci. **64**, 73 (1979).
33. S. Ya. Braude, A. P. Miroshnichenko, K. P. Sokolov, and N. K. Sharykin, Astrophys. Space Sci. **74**, 409 (1981).
34. S. Ya. Braude, N. K. Sharykin, K. P. Sokolov, and S. M. Zakharenko, Astrophys. Space Sci. **111**, 1 (1985).
35. S. Ya. Braude, K. P. Sokolov, and S. M. Zakharenko, Astrophys. Space Sci. **213**, 1 (1994).
36. S. Ya. Braude, S. L. Rashkovsky, K. M. Sidorchuk, et al., Astrophys. Space Sci. **280**, 235 (2002).
37. S. E. G. Hales, E. M. Waldram, N. Rees and P. J. Warner, Mon. Not. R. Astron. Soc. **274**, 447 (1995).
38. W. M. Lane, A. S. Cohen, R. A. Perley. et al., NRAO Newsletter 100, p. 15 (2004).
39. O. B. Slee, Aust. J. Phys. **48**, 143 (1995).
40. A. Purvis, S. J. Tappin, W. G. Rees, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **229**, 589 (1987).
41. J. E. Baldwin, R. C. Boysen, S. E. G. Hales, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **217**, 717 (1985).
42. S. E. G. Hales, J. E. Baldwin, and P. J. Warner, Mon. Not. R. Astron. Soc. **234**, 919 (1988).
43. S. E. G. Hales, C. R. Masson, P. J. Warner, and J. E. Baldwin, Mon. Not. R. Astron. Soc. **246**, 256 (1990).
44. S. E. G. Hales, C. J. Mayer, P. J. Warner, and J. E. Baldwin, Mon. Not. R. Astron. Soc. **251**, 46 (1991).
45. S. E. G. Hales, C. R. Masson, P. J. Warner, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **262**, 105 (1993).
46. S. E. G. Hales, J. E. Baldwin, and P. J. Warner, Mon. Not. R. Astron. Soc. **263**, 25 (1993).

47. M. M. McGilchrist and J. M. Riley, Mon. Not. R. Astron. Soc. **246**, 110 (1990).
48. A. E. Visser, J. M. Riley, H. J. A. Röttgering, and E. M. Waldram, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **110**, 419 (1995).
49. M. Lacy, J. M. Riley, E. M. Waldram, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **276**, 614 (1995).
50. E. M. Waldram, J. A. Yates, J. M. Riley, and P. J. Warner, Mon. Not. R. Astron. Soc. **282**, 779 (1996).
51. D. M. Pooley, E. M. Waldram, and J. M. Riley, Mon. Not. R. Astron. Soc. **298**, 637 (1998).
52. J. M. W. Riley, E. M. Waldram, and J. M. Riley, Mon. Not. R. Astron. Soc. **306**, 31 (1999).
53. J. M. Riley, S. Rawlings, R. G. McMahon, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **307**, 293 (1999).
54. J. F. R. Gower, P. F. Scott, and D. Wills, Mem. R. Astron. Soc. **71**, 49 (1967).
55. X. Zhang, Y. Zheng, H. Chen, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **121**, 59 (1997).
56. R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **124**, 259 (1997).
57. E. A. Valentijn, W. J. Jaffe, G. C. Perola, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **28**, 333 (1997).
58. W. M. Goss, U. J. Schwartz, S. G. Siddesh, and K. W. Weiler, Astron. Astrophys. **61**, 93 (1977).
59. W. M. Goss and D. Morris, J. Astrophys. Astron. **1**, 189 (1980).
60. J. G. A. Wouterloot and E. Dekker, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **36**, 323 (1979).
61. H. J. Habing, W. M. Goss, and A. Winnberg, Astron. Astrophys. **108**, 412 (1982).
62. R. Isaacman, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **43**, 405 (1981).
63. H. E. Matthews and T. A. T. Spoelstra, Astron. Astrophys. **126**, 433 (1983).
64. M. J. A. Oort and R. A. Windhorst, Astron. Astrophys. **145**, 405 (1985).
65. M. H. Wieringa, Ph.D Thesis, Rijksuniversiteit Leiden (1991).
66. J. Roland, R. J. Hanisch, and G. Pelletier, Astron. Astrophys. **231**, 327 (1990).
67. A. R. Taylor, W. M. Goss, P. H. Coleman, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **107**, 239 (1996).
68. C. De Breuck, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., Astron. Astrophys. **394**, 59 (2002), astro-ph/0208054.
69. J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozyan, et al., Astron. J. **111**, 1945 (1996).
70. M. I. Large, L. E. Cram, and A. M. Burgess, Molonglo Reference Catalogue of Radio Sources, The Observatory, **111**, 72 (1991).
71. G. Colla, C. Fanti, A. Ficarra, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **1**, 281 (1970).
72. A. Ficarra, G. Grueff, and G. Tomassetti, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **59**, 255 (1985).
73. J. M. Durdin, D. Pleticha, J. J. Condon, et al., National Astronomy and Ionospheric Center Report, **45**, 1 (1975).
74. C. R. Lawrence, C. L. Bennett, J. N. Hewitt, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **61**, 105 (1986).
75. D. C.-J. Bock, M. I. Large, and E. M. Sadler, Astron. J. **117**, 1578 (1999).
76. J. Maslowski, Acta Astron. **22**, 227 (1972).
77. J. Machalski, Acta Astron. **28**, 367 (1978).
78. S. Rys and J. Machalski, Acta Astron. **37**, 163 (1987).
79. R. L. White and R. H. Becker, Astrophys. J., Suppl. Ser. **79**, 331 (1992).
80. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
81. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg, Astrophys. J. **475**, 479 (1997).
82. A. M. Hopkins, The Phoenix Deep Survey at 1.4 GHz Ph.D. thesis (Univ. Sudney, 1998).
83. A. M. Hopkins, B. Mobasher, L. Cram, and M. Rowan-Robinson, Mon. Not. R. Astron. Soc. **296**, 839 (1998).
84. R. I. Kollgaard, W. Brinkmann, M. Mc. Chester, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **93**, 145 (1994).
85. A. Wright and R. Otrupcek, Parkes Catalogue of Radio Sources, Australia Telescope National Facility (1990).
86. R. Otrupcek and A. Wright, Publ. Astron. Soc. Aust. **9**, 170 (1991).
87. В. Р. Амирханян, А. Г. Горшков, М. Г. Ларионов, Зеленчукский обзор радиоисточников между склонениями 0-14°, МГУ, Москва (1989).
88. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **87**, 1 (1991).
89. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **96**, 583 (1992).
90. M. G. Larionov, Soobshch. SAO, **68**, 14 (1991).
91. C. Bennett, B. Burke, L. Hewitt, et al. Astrophys. J., Suppl. Ser. **61**, 1 (1986).
92. G. I. Langston, M. B. Heflin, S. R. Conner, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **72**, 621 (1990).
93. M. Griffith, G. Langston, M. Heflin, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **74**, 129 (1990).
94. M. Griffith, M. Heflin, S. Conner, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **75**, 801 (1991).
95. P. C. Gregory and J. J. Condon, Astrophys. J., Suppl. Ser. **75**, 1011 (1991).
96. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, Astrophys. J., Suppl. Ser. **103**, 427 (1996).

97. P. C. Gregory, J. D. Vavasour, W. K. Scott, and J. J. Condon, Astrophys. J., Suppl. Ser. **90**, 173 (1994).
98. A. E. Wright, M. R. Griffith, A. J. Hunt, Astrophys. J., Suppl. Ser. **103**, 145 (1996).
99. N. E. Kassim, Astrophys. J., Suppl. Ser. **68**, 715 (1988).
100. S. J. Vessey and D. A. Green, Mon. Not. R. Astron. Soc. **294**, 607 (1998).
101. R. H. Becker, R. L. White, D. J. Helfand, and S. Zoonematkermani, Astrophys. J., Suppl. Ser. **91**, 347 (1994).
102. R. W. Garwood, R. A. Perley, J. M. Dickey, and M. A, Murray, **96**, 1655 (1988).
103. D. J. Helfand, S. Zoonematkermani, R. H. Becker, and R. L. White, Astrophys. J., Suppl. Ser. **80**, 211 (1992).
104. S. Zoonematkermani, D. J. Helfand, R. H. Becker, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **74**, 181 (1990).
105. W. Reich, P. Reich, E. Fürst, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **83**, 539 (1990).
106. E. Fürst, W. Reich, P. Reich, and K. Reif, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **85**, 805 (1990).
107. W. J. Altenhoff, D. Downes, T. Pauls, and J. Schraml, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **35**, 23 (1979).
108. P. C. Gregory and A. R. Taylor, Astron. J. **92**, 371 (1986).
109. G. Paturel, P. Fouque, L. Bottinelli, and L. Gouguenheim, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **80**, 299 (1989).
110. Kogoshvili, Merged Catalogue of Galaxies, Bull. Abastumani Astr. Obs. 46. 133; IAU Coll. 64, Riedel D. Publ. Co., 273; Bull. Inf. CDS **25**, 63.
111. R. S. Dixon, Astrophys. J., Suppl. Ser. **20**, 1 (1970).
112. R. S. Dixon and G. Sonneborn, *A Master List of Nonstellar Optical Astronomical Objects* (Ohio State University Press, 1980).
113. R. S. Dixon, Master List of Radio Sources, version 43 (с правками Андернаха, 1989, и более поздними обновлениями) (1981).
114. H. Andernach, Bull. Inf. CDS **37**, 139 (1989).
115. D. P. Schneider, SDSS Collaboration, American Astron. Soc. **198**, 7801 (2001), The SDSS Quasar Survey, `http://www.sdss.org`.
116. K. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy. M. A. Agueros, et al. (SDSS collaboration), Astron. J. **128**, 502 (2004).
117. C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., IRAS Catalogs and Atlases, Version 2. Explanatory Supplement Authors: NASA Ref. Publ., 1990 (1988).
118. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. Van Dyk, et al., Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release (2002), `http://www.ipac.caltech.edu/2mass`.
119. N. E. White, P. Giommi, and L. Angelini, The WGACAT version of ROSAT sources. VizieR Online Data Catalog: XI/31. Originally published in: Laboratory for High Energy Astrophysics (LHEA/NASA), Greenbelt (2000).
120. A. Hewitt and G. Burbidge, Astrophys. J., Suppl. Ser. **87**, 451 (1993).
121. M.-P. Véron-Cetty, P. Véron, Astron. Astrophys. **412**, 399 (2003).

ПАКЕТ АНАЛИЗА ДАННЫХ GLESP ДЛЯ КАРТ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛНОЙ СФЕРЕ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В РАМКАХ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ FADPS*

О. В. Верходанов[1], А. Г. Дорошкевич[2], П. Д. Насельский[3,4], Д. И. Новиков[5], В. И. Турчанинов[6], И. Д. Новиков[2,4,7], П. Р. Кристенсен[4], Л.-И. Чианг[4]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Астрокосмический центр ФИАН, Профсоюзная 84/32, Москва
[3]Ростовский государственный университет, Зорге 5, Ростов-на-Дону, 344090
[4]Институт им. Нильса Бора, Блегдамсвай 17, DK-2100 Копенгаген, Дания
[5]Империал колледж, Лондон, Великобритания
[6]Институт прикладной математики им. Келдыша РАН, 125047, Москва
[7]Обсерватория Копенгагенского университета, DK-2100, Дания

Разработана новая схема пикселизации GLESP (Gauss-LEgendre Sky Pixelization) для постоения карт реликтового излучения всего неба. Схема основана на вычислении интегралов в коэффициентах сферических гармоник методом гауссовых квадратур в нулых полиномов Лежандре и позволяет получать строгое ортогональное разложение карты на сферические гармоники. Разработаны соответствующие программы и проведено сравнение с другими методами. Пакет программ GLESP создан в соответствии с базовыми принципами построения гибкой системы обработки данных FADPS. Описываются основные процедуры и структура пакета.

Ключевые слова: космология, космическое микроволновое излучение, наблюдения, анализ данных

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс анализа данных космического микроволнового излучения (CMB: cosmic microwave background) включает несколько шагов:

1) регистрация данных в формате временных рядов,
2) пикселизация,
3) преобразование карты — сферические гармоники,
4) разделение компонент,
5) анализ статистики сигнала,
6) вычисление спектра $C(\ell)$ — мощности сигнала в зависимости от номера гармоники (мультиполя),
7) оценка космологических параметров.

В данной работе мы рассмотрим шаги (2), (3) и (6).

Начиная с космического эксперимента COBE, использующего так называемую квадрилатерализованную небесную кубическую проекцию (Quadrilateralized Sky Cube Projection, см. детали [1–3]), проблема пикселизации неба в задачах исследования реликтового излучения (РИ) вызывает большой интерес. Были предложены, как минимум, три метода пикселизации небесной сферы для карт CMB: пикселизация по гранями икосаэдра ([4]), пикселизация OGLOO ([5]) и HEALPix[1] по методу [6] (включая последнюю модификацию в 2003). Рассмотрим два важных вопроса, уже упомянутых в [4]: a) какой метод является оптимальным для выбора положений центров пикселов, форм и размеров, чтобы получить (наилучшим образом) компактное однородное покрытие неба пикселами с равными площадями, b) какой лучший путь вычисления интегралов сверток карт суммированием пикселов.

Все упомянутые выше схемы пикселизации были посвящены решению первой задачи с наибольшей возможной точностью, а ответ на второй вопрос обычно следовал уже после выбора схемы пикселизации.

В этой работе мы сосредоточим внимание на задачах обработки данных на сфере и затем определим схему пикселизации. Напомним, что пиксе-

*Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН, 2005. 58. С. 40

[1]http://www.eso.org/science/healpix/

лизация данных CMB на сфере является только частью основной проблемы, которая заключается в определении коэффициентов сферических гармоник при разложении сигнала как для анизотропии, так и для поляризации. Эти коэффициенты, которые мы обозначаем a_{lm}, используются в последующих шагах анализа измеряемого сигнала и, в частности, при определении спектра мощности $C(\ell)$ для анизотропии и поляризации (см. обзор [7]), а в ряде методов — для разделения компонент ([8, 9]) и анализа статистики фаз ([7, 10–13]).

Здесь мы предлагаем особый метод вычисления коэффициентов a_{lm}. Он основывается на так называемой квадратеру Гаусса и описывается во втором разделе. Для этой схемы пикселизации положение центров пикселов вдоль полярного угла (координата θ) соответствует так называемым нулям квадратуры Гаусса-Лежандра и, как будет показано ниже, этот метод существенно увеличивает точность вычислений.

Таким образом, метод вычисления коэффициентов a_{lm} диктует выбор метода пикселизации. Мы называем наш метод GLESP (Gauss-Legendre Sky Pixelization: пикселизация небо по Гауссу-Лежандру [14–16]). Для реализации подхода GLESP было создано соответствующее программное обеспечение, объединенное в одноименный пакет, который позволяет исследовать данные CMB, включая определение спектров мощности анизотропии и поляризации, C_ℓ, функционалы Минковского и другие статистики.

Эта работа посвящена описанию основной идеи метода GLESP, оценки точности различных шагов и финальных результатов, описанию пакета GLESP и его тестированию. Мы не обсуждаем в данной работе проблему интегрирования данных из временных рядов внутри пиксела ограниченного размера. Простейшая схема интегрирования по площади пиксела эквивалентна взвешиванию по отношению к центру пиксела. Пакет GLESP может делать это тем же методом, что и HEALPix или IGLOO.

Кроме того, здесь мы описываем основные процедуры пакеты и их взаимодействие. Пакет реализован с использованием принципов гибкой системы обработки данных (FADPS: flexible data processing system), действующей на радиотелескопе РАТАН-600 ([17, 18]).

2. ОСНОВНЫЕ ИДЕИ И БАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Стандартное разложение вариаций температуры на небе $\Delta T(\theta,\phi)$ на сферические гармоники записывается следующим образом:

$$\Delta T(\theta,\phi) = \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi), \qquad (1)$$

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

где $P_\ell^m(x)$ — присоединенные полиномы Лежандра. Для непрерывной функции $\Delta T(x,\phi)$ коэффициенты разложения $a_{\ell m}$ выражаются как

$$a_{\ell m} = \int_{-1}^{1} dx \int_0^{2\pi} \Delta T(x,\phi) Y^*_{\ell m}(x,\phi) d\phi, \qquad (3)$$

где $Y^*_{\ell m}$ обозначает комплексное сопряжение $Y_{\ell m}$. Для вычисления интеграла (3) мы будем использовать квадратуру Гаусса — метод, предложенный Гауссом еще в 1814 г. и развитый позднее Кристоффелем в 1877 г. Так как интеграл по x в уравнении (3) представляет собой интеграл по полиному x, мы можем использовать следующее равенство ([19]):

$$\int_{-1}^{1} \Delta T(x,\phi) Y^*_{\ell m}(x,\phi) dx = \sum_{j=1}^{N} w_j \Delta T(x_j,\phi) Y^*_{lm}(x_j,\phi), \qquad (4)$$

где w_j — собственная взвешивающая функция квадратуры Гаусса. Здесь взвешивающая функция $w_j = w(x_j)$, а также $\Delta T(x_j,\phi) Y^*_{\ell m}(x_j,\phi)$ вычисляются в точках x_j, которые являются сеткой корней полиномов Лежандра:

$$P_N(x_j) = 0, \qquad (5)$$

где N — максимальный ранг рассматриваемого полинома. Хорошо известно, что уравнение (5) имеет N нулей в интервале $-1 \le x \le 1$. Для метода Гаусса-Лежандра взвешивающие коэффициенты в уравнении (4) равны ([19]):

$$w_j = \frac{2}{1-x_j^2}[P'_N(x_j)]^{-2}, \qquad (6)$$

где знак $'$ обозначает производную. Они могут быть вычислены вместе с набором x_j с помощью процедуры "*gauleg*" [19].

Трапецеидальные пикселы 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 $-1 \le x \le 1$ покрывается

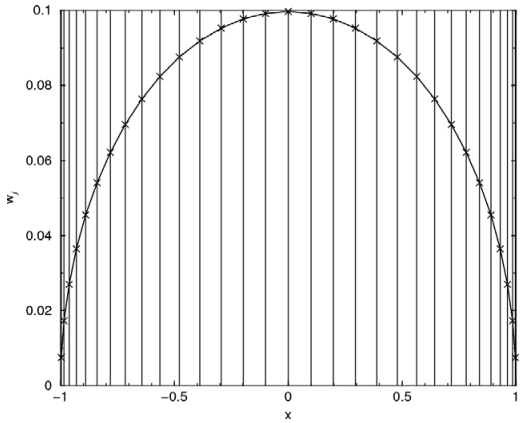


Рис. 1. Взвешивающие коэффициенты Гаусса-Лежандра (w_j) в зависимости от нулей полиномов Лежандра ($x_j = \cos\theta_j$), являющихся центрами колец, используемых в GLESP (для случая $N = 31$). Положения нулей отмечены вертикальными линиями.

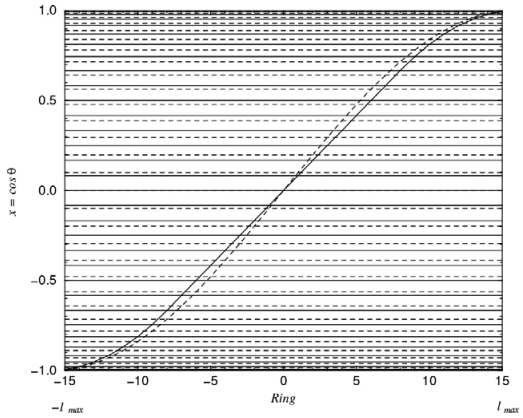


Рис. 2. Положение центров колец ($x_j = \cos\theta_j$) в зависимости от номера кольца для двух схем пикселизации. HEALPix показан сплошной линией, GLESP — штриховой. Рисунок демонстрирует случай когда $N = 31$.

кольцами пикселов (число колец N, см. детали в разделе 3). Угловое разрешение, достигаемое при измерении данных CMB, определяет верхней предел суммирования в уравнении (1), $\ell \le \ell_{\max}$. Чтобы избежать ограничений Найквста, мы используем число колец пикселов, равное $N \le 2\ell_{\max}$. Чтобы сделать пикселы в экваториальном кольце (вдоль координаты ϕ), $\mathrm{N}_\phi^{\max}$ в этом направлении выбирается $N_\phi^{\max} \approx 2N$. Число пикселов по другим кольцам, N_ϕ^j, должно определяться из условия организации размеров пикселов равными размерам экваториальных с такой точностью, с какой это возможно.

На рис. 1 показаны весовые коэффициенты w_j и положение центров пикселов для случая $N = 31$. На рис. 2 сравниваются особенности пикселизационных схем, используемых в HEALPix и GLESP (см. раздел 4). На рис. 3 сравнивается форма пикселов и их распределение на сфере в эллиптической проекции для HEALPix и GLESP.

В (1) коэффициенты $a_{\ell m}$ являются комплексными, в то время как ΔT — вещественные. В пакете GLESP, построенном исходя из определения (1), мы используем следующее представление ΔT:

$$\Delta T(\theta,\phi) = \sum_{\ell=2}^{\ell_{\max}} a_{\ell 0} Y_{\ell 0}(\theta,\phi) + \\ = \sum_{\ell=2}^{\ell_{\max}} \sum_{m=1}^{\ell} (a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi) + a_{l,-m} Y_{\ell,-m}(\theta,\phi)), \quad (7)$$

где

$$Y_{l,-m}(\theta,\phi) = (-1)^m Y^*_{l,m}(\theta,\phi),\ a_{\ell m} = (-1)^m a^*_{l,-m}. \quad (8)$$

Таким образом,

$$\Delta T(\theta,\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{\ell=2}^{\ell_{\max}} Re(a_{\ell,0}) P_\ell^0(\cos\theta) + \\ + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{\ell=2}^{\ell_{\max}} \sum_{m=1}^{l} \sqrt{\frac{2\ell+1}{2} \frac{(\ell-m)!}{(\ell+m)!}} P_\ell^m(\cos\theta) \times \\ \times [Re(a_{\ell m}) \cos(m\phi) - Im(a_{\ell m}) \sin(m\phi)], \quad (9)$$

где $P_\ell^m(\cos\theta)$ являются хорошо известными присоединенными полиномами Лежандра (см., например, [20]). В пакете GLESP мы используем нормализованные присоединенные полиномы Лежандра f_ℓ^m:

$$f_\ell^m(x) = \sqrt{\frac{2\ell+1}{2} \frac{(\ell-m)!}{(\ell+m)!}} P_\ell^m(x), \quad (10)$$

где $x = \cos\theta$, а θ — полярный угол. Эти полиномы $f_\ell^m(x)$ могут быть рассчитаны с использованием двух хорошо известных соотношений. Первое из них дает $f_\ell^m(x)$ для заданного m и всех $\ell > m$:

$$f_\ell^m(x) = x \sqrt{\frac{4\ell^2-1}{\ell^2-m^2}} f_{\ell-1}^m - \\ - \sqrt{\frac{2\ell+1}{2\ell-3} \frac{(\ell-1)^2-m^2}{\ell^2-m^2}} f_{\ell-2}^m. \quad (11)$$

Это соотношение стартует с

$$f_m^m(x) = \frac{(-1)^m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{(2m+1)!!}{(2m-1)!!}} (1-x^2)^{m/2},$$

$$f_{m+1}^m = x\sqrt{2m+3} f_m^m.$$

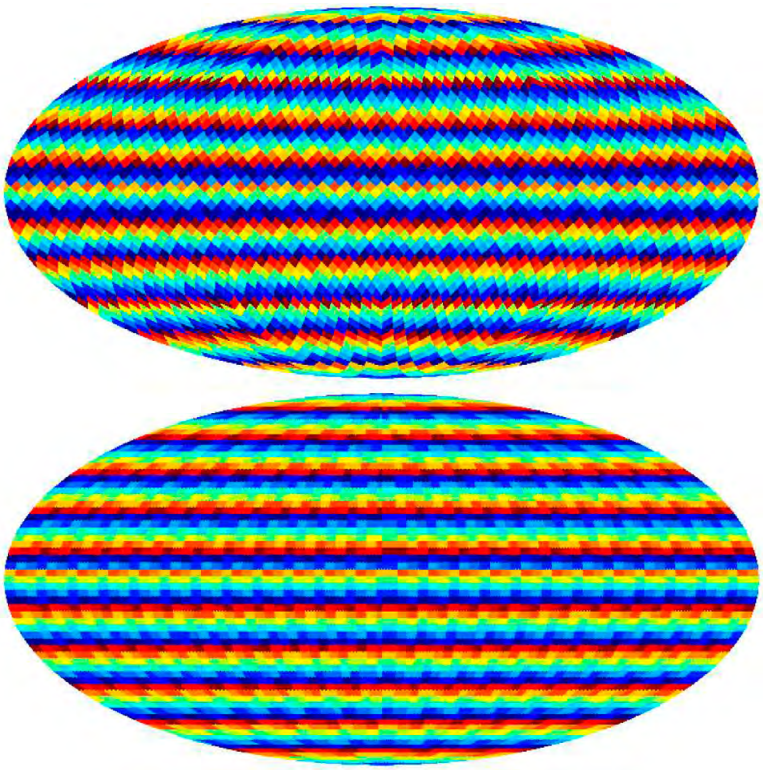


Рис. 3. Схематическое представление двух типов пикселизации на сфере: HEALPix (вверху) и GLESP (внизу). Различные цвета пикселов использованы для выделения их формы.

Второе рекуррентное соотношение дает $f_\ell^m(x)$ для заданного ℓ и всех $m \le l$:

$$\sqrt{(\ell-m-1)(\ell+m+2)}f_\ell^{m+2}(x)+ \\ +\frac{2x(m+1)}{\sqrt{1-x^2}}f_\ell^{m+1}(x)+ \\ =\sqrt{(\ell-m)(\ell+m_1)}f_\ell^m(x)=0. \quad (12)$$

Это соотношение стартует с тех же $f_\ell^\ell(x)$ и $f_\ell^0(x)$, которые должны находиться с помощью (11).

Как уже обсуждалось в [19], первое рекуррентное соотношение (11) является формально нестабильным, если число итераций возрастает до бесконечности. К сожалению, нет теоретических рекомендаций, какая максимальная итерация можем использоваться в квазистабильной области. Однако это соотношение может быть использовано, когда мы заинтересованы в так называемом *доминантном* решении [19], которое является приближенно стабильным. Второе соотношение (12) является стабильным для всех ℓ и m.

3. СВОЙСТВА GLESP

Следуя предыдущим рассуждениям, мы определяем новую схему пикселизации GLESP следующими пунктами:

- В полярном направлении $x = \cos\theta$ мы задаем x_j,j = 1,2,..,N как сеть корней уравнения (5).
- Каждый корень x_j определяет положение кольца с N_ϕ^j центрами пикселов с ϕ координатами ϕ_i.
- Все пикселы имеют почти равные площади.
- Каждый пиксел имеет вес w_j (см. (6)).

Наши вычисления, реализованные для пикселизационной схемы GLESP, сделаны при следующих условиях.

- Границы всех пикселов проходят вдоль координатных линий θ и ϕ. Таким образом с большой точностью пикселы трапецеидальные.
- Число пикселов вдоль азимутального направления ϕ зависит от номера кольца. В кольце их число программа позволяет выбирать произвольно. Число пикселов зависит от $\ell_{\max}$, при-

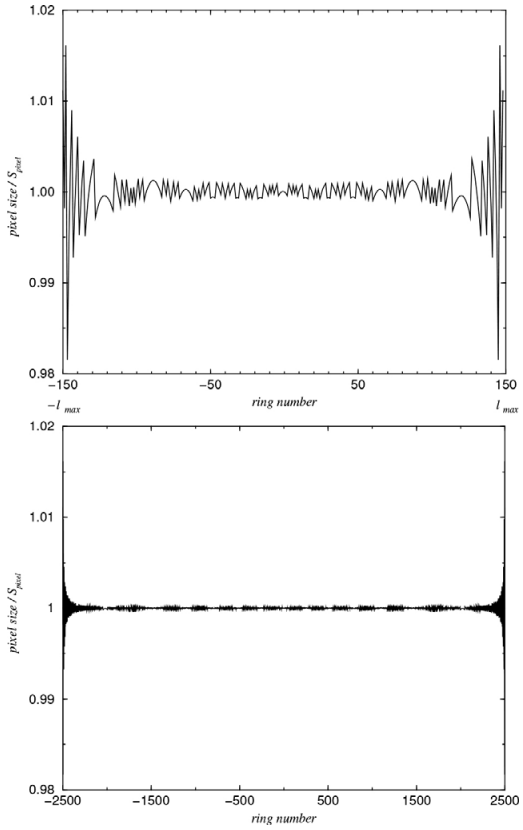


Рис. 4. Отношение размер пиксела/площадь пиксела на экваторе в зависимости от номера кольца в GLESP для числа колец $N = 300$ и $N = 5000$ соответственно.

нятого для обработки данных РИ.

- Чтобы удовлетворить теореме Найквиста, число колец вдоль оси $x = \cos(\theta)$ должно быть $N \geq 2\ell_{\max} + 1$.
- Чтобы сделать экваториальные пикселы приблизительно квадратными, число пикселов вдоль азимутально оси $\phi \mathrm{N}_\phi^{\max} = \mathrm{int}(2\pi\theta_{\mathrm{k}}+0.5)$, где $k = \mathrm{int}(\mathrm{N}+1)/2$, а $d\theta_k = 0.5(\theta_{k+1} - \theta_{k-1})$.
- Номинальный размер каждого пиксела определяется как $S_{\mathrm{pixel}} = d\theta_k \times d\phi$, где $d\theta_k$ и $d\phi = 2\pi/N_\phi^{\mathrm{mx}}$ являются размерами пиксела в экваториальном кольце.
- Число пикселов N_ϕ^j в j-кольце при $x = x_j$ вычисляется как $N_\phi^j = \mathrm{int}(2\pi\sqrt{1-\mathrm{x_j^2}}/\mathrm{S_{pixel}}+0.5)$.
- Полярные пикселы — треугольные.
- Так как число N_ϕ^j отличается от 2^k, где k — целое, для вычисления быстрого преобразования Фурье вдоль азимутального направления мы используем код FFTW ([21]). Этот код позволяет применять не только подход 2^n, но так-

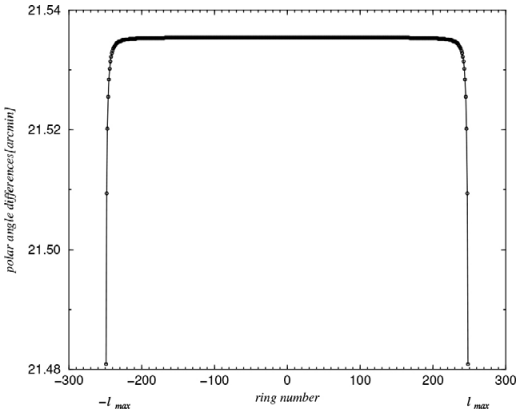


Рис. 5. Размер пиксела вдоль полярного угла ($\ell_{\max} = 250$).

же и другие числа основание, и обеспечивает даже большую скорость вычислений.

По этой схеме размеры пикселов одинаковы в пределах каждого кольца и максимальное различие между пикселами различных колец составляет $\sim 1.5\%$ вблизи полюсов (рис. 4). Увеличение разрешения уменьшает абсолютную ошибку разности площадей, потому что неэквивалентность полярных и экваториальных пикселов пропорциональна N^{-2}.

На рис. 5 показана схема пикселизации для карт с высоким разрешением (например, $\ell_{\max} > 500$), дающую почти равную ширину по $d\theta$ для большинства колец.

GLESP не является иерархической структурой, но проблемы выборки пикселов, ближайших к заданному положению, элементарно решаются на уровне программного обеспечения. Несмотря на то, что GLESP близок к схеме пикселизации IGLOO по азимутальному подходу, между ними имеется большая разница, связанная с выбором шагов расположения пикселов по полярному углу θ. Поэтому мы не можем объединить эти две схемы пикселизации. Схема IGLOO, примененная к дискретам широты GLESP, даст слишком различные размеры пикселов. Пикселы не будут ни равно расположенными по высоте, ни однородными по площади, как того требует IGLOO.

4. ФУНКЦИЯ ОКНА GLESP ПИКСЕЛА

Для применения схемы GLESP мы должны учесть влияние размеры, формы и расположения пиксела на сфере на сигнал в пикселе и его вклад в спектр мощности $C(\ell)$. Температура в пикселе

дается как ([5,6]):

$$\Delta T_p = \int\limits_{\Delta\Omega_p} W_p(\theta,\phi)\Delta T(\theta,\phi)d\Omega, \qquad (13)$$

где $W_p(\theta,\phi)$ — функция окна для p-ого пиксела с площадью $\Delta\Omega_p$. Для функции окна $W_p(\theta,\phi) = 1$ внутри пиксела и $W_p(\theta,\phi) = 0$ снаружи ([6]) из уравнений (1) и (13):

$$\Delta T_p = \sum_{\ell,m} a_{\ell m} W_p(\ell,m),$$

где

$$W_p(\ell,m) = \int W_p(\theta,\phi)Y_{\ell,\phi}d\Omega$$

и

$$W_p(\theta,\phi) = \sum_{\ell,m} W_p(\ell,m)Y^*(\theta,\phi). \qquad (14)$$

Соответствующая корреляционная функция ([5]) для пикселизированного сигнала

$$\langle \Delta T_p \Delta T_q \rangle = \sum_{l,m} C(\ell)W_p(\ell,m)W_q^*(\ell,m). \qquad (15)$$

4.1. Точность оценки функции окна

Дискретность пикселизированных карты определяет свойства сигнала и ограничивает точность, достигаемую в любой пикселизационной схеме. Чтобы оценить эту точность, мы можем использовать разложение ([5]):

$$\Delta T^{\rm map}(\theta,\phi) = \sum_p S_p \Delta T_p W_p(\theta,\phi) = \\ = \sum_{\ell,m} a_{\ell m}^{\rm map} Y_{\ell m}(\theta,\phi), \quad (16)$$

$$a_{\ell m}^{\rm map} = \int d\Omega \Delta T^{\rm map}(\theta,\phi)Y_{\ell m}^*(\theta,\phi) = \\ = \sum_p S_p \Delta T_p W_p^*(\ell,m), \quad (17)$$

где S_p — площадь p-ого пиксела. Эти соотношения обобщают уравнение (3), учитывая свойства функции окна. Схема GLESP использует свойства интегрирования Гаусса-Лежандра в полярном направлении, в то время как азимутальная пикселизация для каждого кольца подобна схеме IGLOO, и мы получаем (см. (4)):

$$W_p(\ell,m) = \frac{w_p}{\sqrt{2\pi}\Delta x_p} \exp\left(\frac{im\pi}{N_\phi^p}\right) \frac{\sin(\pi m/N_\phi^p)}{(\pi m/N_\phi^p)} \times \\ \times \int_{x_p-0.5\Delta x_p}^{x_p+0.5\Delta x_p} f_\ell^m(x)dx, \quad (18)$$

где $\Delta x_p = (x_{p+1} - x_{p-1})/2$ с x_p — p-ым узлом по Гауссу-Лежандру, а N_ϕ^p — число пикселов в азимутальном направлении. Этот интеграл может быть переписан как:

$$\int_{x_p-0.5\Delta x_p}^{x_p+0.5\Delta x_p} f_\ell^m(x)dx \simeq \\ \simeq \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1+(-1)^k}{(k+1)!} f_\ell^{(k)^m}(x_p) \left(\frac{\Delta x_p}{2}\right)^{k+1}, \quad (19)$$

где $f_\ell^{(k)^m}(x_p)$ обозначает k-ую производную в $x = x_p$. Тогда для $\Delta x_p \ll 1$ получаем разложение (18):

$$W_p^{(2)}(\ell,m) = W_p^{(0)}(\ell,m)\left(1 + \frac{f_\ell^{(2)m}(\Delta x_p)^2}{24 f_\ell^m}\right), \quad (20)$$

где $W_p^{(0)}(\ell,m) \simeq$

$$\simeq \frac{w_p}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{im\pi}{N_\phi^p}\right) \frac{\sin(\pi m/N_\phi^p)}{(\pi m/N_\phi^p)} f_\ell^m(x_p), \quad (21)$$

и $W_p^0(\ell,m)$ не зависят от Δx_p. Точность этой оценки

$$\frac{\delta W_p(\ell,m)}{W_p(\ell,m)} = \frac{W_p^{(2)}(\ell,m) - W_p^{(0)}(\ell,m)}{W_p^{(0)}(\ell,m)} \simeq \\ \simeq \left|\frac{(f'')_\ell^m(\Delta x_p)^2}{24 f_\ell^m}\right|. \quad (22)$$

В соответствии с последней модификацией HEALPix точность воспроизводства функции окна пиксела порядка 10^{-3}. Чтобы получить такую же точность для $W_p(\ell,m)$, нам необходимо иметь

$$\Delta x_p \le 0.15 \left|\frac{f_\ell^m}{(f'')_\ell^m}\right|^{\frac{1}{2}}\Bigg|_{x=x_p}. \qquad (23)$$

Используя приближенную связь между функциями Лежандра и Бесселя для больших ℓ ([20]) $f_\ell^m \propto J_m(\ell x)$ получаем:

$$\Delta x_p \le 0.15 x_p/\sqrt{m(m+1)}, \qquad (24)$$

и для $\Delta x_p \sim \pi/N$ мы имеем из (24)

$$\frac{\delta_p(\ell,m)}{W_p(\ell,m)} \ge 10^{-2} \cdot \left(\frac{\ell_{\rm max}}{N}\right)^2. \qquad (25)$$

Например, для $N = 2\ell_{\rm max}$ получаем $\delta W_p(\ell,m)/W_p(\ell,m) \simeq 2.3\cdot 10^{-3}$, что является совершенно разумной точностью для $\ell_{\rm max} \sim 3000-6000$.

5. СТРУКТУРА ПАКЕТА GLESP

Пакет организован и развивается на двух уровнях. Первый, объединяющий функции Фортрана F77 и C, подпрограммы и процедуры-связки между разными языками, состоит из главных процедур: *'signal'*, которая обращает значения $a_{\ell m}$ в карту на сфере; *'alm'*, которая вычисляет $a_{\ell m}$ по данным карты; *'cl2alm'*, которая моделирует $a_{\ell m}$-коэффициенты для заданного набора $C_{\ell]}$; и *'alm2cl'*, которая вычисляет C_ℓ для $a_{\ell m}$. Процедура тестирования кода, управления параметрами, анализа на гауссовость (в том числе и тест Колмогорова-Смирнова) коэффициентов $a_{\ell m}$ и однородность распределения фаз, а также другие, тоже включены в пакет. Работа этих процедур основана на другом блоке подпрограмм, вычисляющих пикселизацию по Гауссу-Лежандру для заданного разрешения, пересчета угла на небе в номер соответствующего пиксела и обратно.

Второй уровень пакета содержит программы, реализующие процедуры первого уровня. В добавление к сказанному, имеются еще процедуры, вычисляющие аналитические функции — шаблоны, генерирующие карты со сферическими функциями, такими, как, например, Y_{20}, Y_{21} и Y_{22}. Имеются также программы сравнения наборов $a_{\ell m}$ коэффициентов, конвертирования карты GLESP в формат HEALPix и и обратно.

На рис. 6 демонстрируется организация пакета GLESP. Круг определяет зону влияния GLESP, основанную на библиотеке пикселизации. Она может включать несколько процедур и действующих программ. Основная программа второго уровня *'cl_ map'*, показанная как большой прямоугольник, взаимодействуйте с процедурами первого уровня. Эти процедуры показаны маленькими прямоугольниками и вызывают внешние библиотеки преобразования Фурье и вычисления полиномов Лежандра. Пакет читает и записывает данные как в виде ASCII-таблиц, так и в виде FITS-формата. Более 15-ти программ пакета GLESP работают в зоне GLESP.

К настоящему моменту в пакете также реализованы процедуры параллельных вычислений. Процедуры динамической визуализации с использованием библиотеки OPEN GL развиваются в Институте астрономии в Кембридже.

5.1. Базовые принципы организации пакета GLESP

Пакет реализован в соответствии с идеологией системы обработки FADPS ([17,18,22]). Он удовлетворяет следующим принципам:

- Каждая программа разрабатывалась таким образом, чтобы ее можно было легко подключить к другим модулям пакета. Она работает как с заданным файлом, так и со стандартным вводом/выводом.
- Каждая программа может работать отдельно от пакета.
- Каждая программа имеет доступ с командной строки и управляется внешними параметрами. Кроме того, она может работать в диалоговом режиме и в ряде случаев управляться также файлом настройки.
- Формат вывода результирующих данных организован стандартным путем и оформляется в виде FITS- или F-форматов ([23]) или ASCII-таблиц, доступных для других пакетов.
- Пакет программ может взаимодействовать (вводить и выводить данные) с другими процедурами FADPS и базой данных CATS.

5.2. Основные операции

В пакете GLESP имеется четыре группы операций с данными:

- Операции с картами:
  1) Разложение карты по сферическим гармоникам $a_{\ell m}$ (*cl2map*).
  2) Сглаживание карты гауссовой диаграммой направленности (*cl2map*).
  3) Нахождение суммы/разности/среднего нескольких карт (*difmap*).
  4) Скалярное умножение/деление (*difmap*).
  5) Вращение карты (*difmap*).
  6) Преобразование координатной сетки из галактических координат в экваториальные с соответствующим вращением карты (*difmap*).
  7) Обрезание карты по заданным температурным пределам (*mapcut*).
  8) Выделение области на карте с занулением значений внутри/снаружи зоны (*mapcut*).
  9) Вырезание сечений из карты (*mapcut*).
  10) Подготовка стандартных шаблонов карт (*mappat*).
  11) Перевод карты, заданной в ASCII-кодах в FITS (*mappat*).
  12) Чтение таблицы точечных источников и наложение их на карту (*mappat*).
  13) Распечатка значений в пикселах карты в ASCII-формате (*mapcut*).
  14) Поиск минимального/максимального значения в пикселе (*difmap*).
  15) Простейший статистический анализ карты (*difmap*).

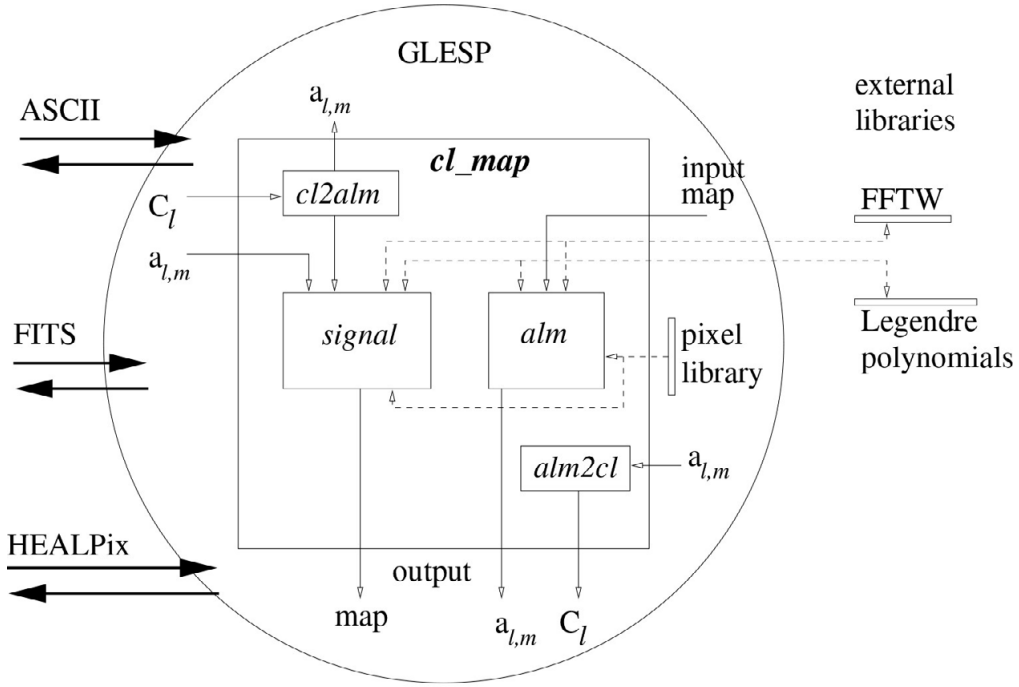


Рис. 6. Структура пакета GLESP.

16) Поиск коэффициента корреляции двух карт (*difmap*).
17) Оценка размера пиксела карты (*ntot*).
18) Построение изображений карт (*f2fig*).

- Операции над коэффициентами $a_{\ell m}$:
  1) Синтез карты по данным $a_{\ell m}$ (*cl2map*).
  2) Поиск сумм/разностей (*difalm*).
  3) Скалярное умножение/деление (*difalm*).
  4) Векторное умножение/деление (*difalm*).
  5) Добавление фазы во все гармоники (*difalm*).
  6) Вырезание заданной моды из гармоник (*difalm*).
  7) Расчет спектра мощности C_ℓ (*alm2dl*).
  8) Расчет фаз гармоник (*alm2dl*).
  9) Выборка гармоник с заданной фазой (*alm2dl*).
  10) Сравнение двух наборов коэффициентов $a_{\ell m}$ (*checkalm*).
  11) Вычисление $a_{\ell m}$ для производных карт по обеим координатам (*dalm*).
- Операции со спектром мощности C_ℓ:
  1) Вычисление спектра мощности C_ℓ (*alm2dl*).
  2) Моделирование карты для заданного C_ℓ (*cl2map*).
  3) Моделирование коэффициентов $a_{\ell m}$ для заданного C_ℓ (*createalm*).
- Операции с фазами гармоник $\phi_{\ell m}$ и амплитудами $|a_{\ell m}|$:
  1) Вычисление фаз $\phi_{\ell m}$ (*alm2dl*).
  2) Вычисление амплитуд $|a_{\ell m}|$ (*alm2dl*).
  3) Моделирование $a_{\ell m}$ по фазам (*createalm*).
  4) Выбор гармоник с данной фазой (*alm2dl*).
  5) Добавление заданной фазы ко всем гармоникам (*difalm*).

5.3. Основные программы

Сейчас реализованы следующие процедуры, организованные как отдельные программы, работающие в частотно-пространственной или пиксельной области:

- *alm2dl* вычисляет спектры и фазы по $a_{\ell m}$-коэффициентам.
- *checkalm* сравнивает различные наборы $a_{\ell m}$.
- *cmap* конвертирует карты из HEALPix формата в GLESP.
- *cl2map* обращает карту в $a_{\ell m}$-коэффициенты и $a_{\ell m}$-коэффициенты в карту, моделирует карту по заданному C_ℓ-спектру.
- *createalm* создает $a_{\ell m}$-коэффициенты по фазам, амплитудам и/или C_ℓ-спектру.
- *dalm* вычисляет первую и вторую производные карт по $a_{\ell m}$-коэффициентам.

- *difalm* производит арифметические действия над наборами $a_{\ell m}$.
- *difmap* производит арифметические действия над картами, а также делает координатные преобразования
- *f2fig* строит цветные изображения карт в формате GIF.
- *f2map* преобразует карту GLESP в формат HEALPix.
- *fitstof* преобразует формат записи $a_{\ell m}$-коэффициентов из FITS в F.
- *ftofits* преобразует формат записи $a_{\ell m}$-коэффициентов из F в FITS.
- *mapcut* обрезает амплитуды и вырезает координаты на карте GLESP, строит одномерные и двумерные сечения для моделирования наблюдений на РАТАН-600 для исследования РИ ([24]).
- *mappat* создает стандартные образцы карт, читает ASCII-данные для построения карт, читает положения точечных источников из ASCII-файлов, содержащих вывод базы данных CATS ([22]).
- *psep* производит фазовый анализ и разделение компонент по двум наборам $a_{\ell m}$ ([9]).

5.4. Формат данных

Данные GLESP представлены в двух форматах, описывающих $a_{\ell m}$-коэффициенты и карты.

Данные с $a_{\ell m}$-коэффициентами содержат индекс, описывающий номера ℓ и m-мод, соответственно, в том же формате, что и HEALPix, и вещественную и мнимую части $a_{\ell m}$. Эти три параметры описаны по правилам записей с тремя полями как Binary Table для F-формата ([23]).

Данные карт описываются тремя полями как Binary Table в F-формате, содержащими вектор положений $x_i = \cos\theta$, вектор значений числа пикселов в каждом кольце N_{ϕ_i}, а также массив температур в каждом пикселе, записываемый от Северного полюса.

6. ТЕСТИРОВАНИЕ И ТОЧНОСТЬ КОДА GLESP

Три теста позволяют нам проверить код. Первый из них заключается в рассмотрении аналитических карт

$$Y_{2,0} = \sqrt{\frac{5}{16\pi}}(3x^2 - 1),$$

$$Y_{2,1} = -\sqrt{\frac{15}{8\pi}}x\sqrt{1-x^2}\cos\phi,$$

$$Y_{2,-1} = -\sqrt{\frac{15}{8\pi}}x\sqrt{1-x^2}\sin\phi,$$

$$Y_{2,2} = \sqrt{\frac{15}{32\pi}}(1-x^2)\cos(2\phi),$$

$$Y_{2,-2} = -\sqrt{\frac{15}{32\pi}}(1-x^2)\sin(2\phi,)$$

по которым вычисляются величины коэффициентов $a_{\ell m}$. Программы дают значения теоретических величин $a_{\ell m}$ с точностью лучше 10^{-7}.

Второй тест воспроизводит аналитическую карту $\Delta T(x,\phi) = Y_{\ell m}(x,\phi)$ для заданных $a_{\ell m}$. Оба эти теста проверяют точность вычисления карт и сферических гармоник независимо.

Третий тест заключается в вычислении $a_{\ell m}$ после построения карты $\Delta T(x,\phi)$ по входным коэффициентам, а также наоборот. Этот тест позволяет проверить ортогональность. Если преобразование основано на действительно ортогональных функциях, то оно должно возвращать те же значения $a_{\ell m}$-коэффициентов или пикселов в картах, что и исходные величины.

Точность кода можно оценить введением набора $a_{\ell m=1}$ и восстановлением его после обращения. Этот текст показал, что, используя соотношение (11), мы можем воспроизвести введенные $a_{\ell m}$ с точностью $\sim 10^{-7}$, ограниченной только точностью представления плавающего числа. Для соотношения (12) точность составляет $\sim 10^{-5}$.

На рис. 7 сравнены точность вычисления C_ℓ с использованием пакетов HEALPix и GLESP[2].

Необходимо отметить, что, в отличие от кода HEALPix, методика GLESP не требует итерационного подхода при вычислении $a_{\ell m}$-коэффициентов в точности также же, как и в HEALPix, которое используется для оценки спектра мощности:

$$C(\ell) = \frac{1}{2\ell+1}\left[|a_{\ell 0}|^2 + 2\sum_{m=1}^{\ell}|a_{\ell m}|^2\right]. \qquad (26)$$

7. РЕПИКСЕЛИЗАЦИЯ

Чтобы преобразовать карту с распределенным сигналом из одной сетки пикселов в другую (например, из HEALPix в GLESP), мы должны использовать один из двух методов:

1) рассчитать коэффициенты $a_{\ell m}$, после чего восстановить новую карту;

[2]Провел вычисления и построил рисунок Владислав Столяров, Институт астрономии, Кембридж

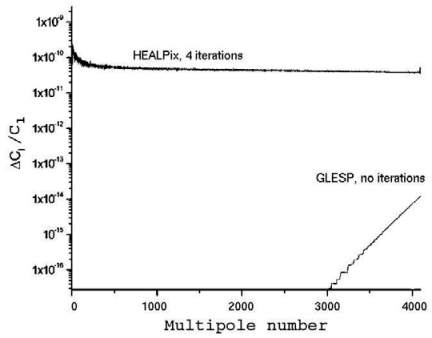


Рис. 7. Сравнение точности вычислений в пакетах HEALPix версии 1.20 (4 итерации) и в GLESP (вычисляется без итераций). Количество пикселов приблизительно одинаковое ($\sim 6 \times 10^7$), а время вычисления пропорционально числе итераций.

2) использовать процедуры репикселизации для текущего распределения яркости.

Любая процедура репикселизации приведет к потере информации и внесет новые ошибки и неувязки. Пакет GLESP дает возможность для репикселизации карт с использованием двух различных методов в области $\Delta T(\theta,\phi)$: первый заключается в осреднении входящих величин в соответствующем пикселе, второй связан со сплайновой интерполяцией внутри сетки пикселов.

В первом методе мы рассматриваем входящие пикселы, которые попадают в наш новый пиксел с величинами $\Delta T(\theta_i,\phi_i)$ с дальнейшим осреднением с помощью весовой функции. Реализованная весовая функция — простое осреднение с равными весами. Этот метод является широко распространенным при присвоении заданных значений пикселу в соответствующим номером.

Во втором методе репикселизации мы используем интерполяцию сплайнами. Если у нас есть карта $\Delta T(\theta_i,\phi_i)$, записанная в узлах, отличных от сетки Гаусса-Лежандра, то мы можем репикселизировать ее в нашу новую сетку $\Delta T(\theta'_i,\phi'_i)$, используя приблизительно равное число пикселов и стандартную интерполяционную схему, основанную на кубических сплайнах. Этот подход достаточно быстрый, так как сплайн рассчитывается один раз для одного вектора табулированных данных (например, в одном кольце), а величины интерполируемой функции для любого входного аргумента получаются единственным вызовом отдельной процедуры (см. подпрограммы *'spline'* для расчета вторых производных интерполируемых функций и *'splint'* для получения интерполированной величины кубическим сплайном в книге [19]).

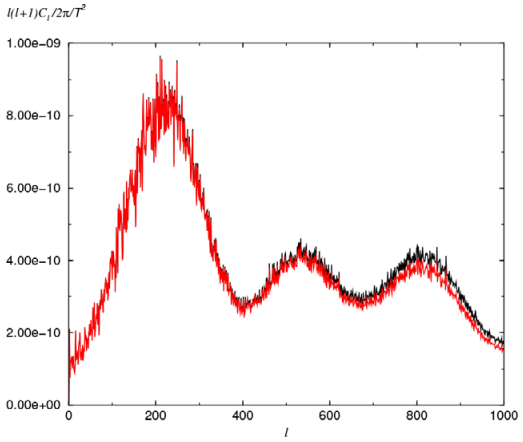


Рис. 8. Спектры мощности, рассчитанные для исходной карты HEALPix (верхняя кривая) с $\ell_{\max} = 1000, N_{\rm side} = 1024$, размером пиксела $= 11.8026\square'$, и числом пикселов $N_{\rm tot} = 12582912$, и для результирующей репикселизированной карты GLESP (нижняя кривая) с ближайшим возможных размером пиксела $= 11.8038\square', N_{\rm tot} = 12581579$. Отклонения спектра мощности на высоких ℓ показывают отношение функций окон для HEALPix и GLESP.

Наша сплайновая интерполяция состоит из трех шагов:

1) построение сетки равноотстоящих узлов по оси ϕ для всех полярных углов;
2) изменение сетки по оси $x = \cos(\theta)$ в соответствии с узлами сетки GLESP;
3) вычисление соответствующих узлов по ости ϕ для колец GLESP, проходящих через x-точки.

Рис. 8 демонстрирует отклонение точности спектра мощности в случае репикселизации из карты HEALPix в карту GLESP с одинаковым разрешением. Как видно из рисунка, для диапазона $\ell \le \ell_{\max}/2$ репикселизация воспроизводит корректно все свойства спектра мощности. Для $\ell \ge \ell_{\max}/2$ должны быть проведены дополнительные исследования, чтобы учесть функцию окна пиксела. Эти исследования продолжаются.

8. РЕЗЮМЕ

Мы предлагаем новую схему GLESP для пикселизации неба, основанную на нулях квадратуры Гаусса-Лежандра. Она дает строгое разложение по ортогональным функциям и позволяет получать точность вычисления коэффициентов $a_{\ell m}$ лучше

10^{-7} без применения итерации. Мы реализовали два подхода вычисления полиномов Лежандра, используя $L-$ и M-методы расчетных схем.

Среди основных преимуществ нашей схемы выделим:

- высокую точность вычисления $a_{\ell m}$,
- высокую скорость вычисления из-за безытерационного подхода,
- оптимальный выбор разрешения для заданного размера диаграммы, который означает оптимальное число пикселов и размер пиксела.

Соответствующие программы были разработаны на алгоритмических языках Фортран77 и C для процедур анализа данных CMS на небесной сфере.

Вычисление коэффициентов $a_{\ell m}$ является основной целью данного пакета. Они используются при разделении компонент и тестов на негауссовость ([9–11]). GLESP ориентирован на быстрое и точное вычисление $a_{\ell m}$ для заданного разрешения. Используя точно рассчитанные коэффициенты $a_{\ell m}$, можно воспроизвести любую схему пикселизации для заданных центров пикселов: GLESP, HEALPix, IGLOO или икосаэдрную.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа была частично финансирована Датским фондом научных исследований (Danmark Grundforskningsfond) через его поддержку открытия Центра теоретической астрофизики. Авторы благодарны Владиславу Столярову за тестирование возможности параллельных вычислений и динамическую визуализацию с помощью библиотеки OPEN GL для нулевой версии GLESP. ОВВ благодарит РФФИ за частичную поддержку данной работы грантом № 02-07-90038. Некоторые результаты данной работы были получены с помощью пакета HEALPix [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. K. Chan and E. M. O'Neil, Feasibility study of a quadrilateralized spherical cube Earth data base, EPRF Technical Report, (Computer Sciences Corp. 1976).
2. E. M, O'Neil and R. E. Laubscher, Extended studies of a quadrilateralized spherical cube Earth data base, EPRF Technical Report, (Computer Sciences Corp. 1976).
3. E. W. Creisen and M. Calabretta, Bull. Amer. Astron. Soc. **182**, 09.01 (1993).
4. M. Tegmark, Astrophys. J. **470**, L81 (1996).
5. R. G. Crittenden and N. G. Turok, Exactly Azimuthal Pixelization of the Sky, Report-no: DAMTP-1998-78 (1998), astro-ph/9806374.
6. K. M. Górski, E. Hivon, and B. D. Wandlet, in *Evolution of Large-Scale Structure: from Recombination to Garching* (1999), `http://www.eso.org/science/healpix`.
7. E. Hivon, K. M. Górski, C. B. Netterfield, et al., Astrophys. J. **567**, 2 (2002).
8. V. Stolyarov, M. P. Hobson, M. A. J. Ashdown, and A. N. Lasenby, Mon. Not. R. Astron. Soc. **336**, 97 (2002).
9. P. D. Naselsky, O. V. Verhodanov, L.-Y. Chiang, and I. D. Novikov, Astrophys. J. (submitted (2003), astro-ph/0310235.
10. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verhodanov, and M. J. Way, Astrophys. J. **590**, L65 (2003), astro-ph/0303643.
11. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verhodanov, Astrophys. J. **599**, L53 (2003), astro-ph/0310542.
12. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
13. P. Coles, P. Dineen, J. Earl, and D. Wright, Mon. Not. R. Astron. Soc. **350**, 989 (2004), astro-ph/0310252.
14. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, No. 7 (2003), astro-ph/0305537.
15. O. V. Verhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., in *Book of Abstrexts, Danish Phys. Soc. Ann. Meeting, 2003, Hotel Nyborg Strand, June 12-13* (HCOe Tryk, Kobenhavn, 2003), AA30P.
16. О. В. Верходанов, А. Г. Дорошкевич, П. Д. Насельский, и др. *Труды Астрон. инст. им. Штернберга, LXXV, Тез. Всероссийской астрон. конф. ВАК-2004, Горизонты вселенной* (МГУ, ISSN 0371-6769, 2004), 184.
17. O. V. Verhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Astrofiz. Issled. (Izv. SAO) **36**, 132 (1993).
18. O. V. Verhodanov, in *Astronomical Data Analysis Software and System VI*, Ed. by G. Hunt and H. E.Payne (ASP Conf. Ser, 1997) **125**, 46.
19. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in FROTRAN*, 2nd ed. (Cambridge University Press, 1992).
20. I. S. Gradsteyn and I. M. Ryzhik, *Tables of Intergrals, Series and Products*, 6 ed. (Academic Press, 2000).

21. M. Frigo and S. G. Johnson, The Fastest Fourier Transform in the West, Technical Report MIT-LCS-TR-728 (1997).
22. O. V. Verhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, in *Astronomical Data Analysis Software and System VI*, Ed. by G. Hunt and H. E.Payne (ASP Conf. Ser, 1997) **125**, 322.
23. O. V. Verhodanov and V. K. Kononov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **53**, 119 (2002).
24. Yu. N. Parijskij, in *Current Topics in Astrofundamental Physics: the Cosmic Microwave Background. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, held December 5-16, 1999, in Erice, Etta Majorana Centre, Italy*, Ed. by Norma G. Sanchez (Kluwer Academic Publishers, P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, ISBN 0-7923-6855-X, 2001), p. 319.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ Ω_Λ И H_0 ПО ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ РАДИОГАЛАКТИК*

О. В. Верходанов[1], Ю. Н. Парийский[1], А. А. Старобинский[2]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Москва

По фотометрическим данным наблюдений эллиптических галактик, среди которых есть как радиогалактики, так и радиоспокойные объекты, проведено исследование зависимости красное спещение — возраст звездной системы (dz/dt). С помощью этой зависимости оцениваются космологические параметры $H(z)$ и Ω_Λ. Возраст звездных систем определяется в рамках эволюционных моделей синтетических спектров PEGASE и GISSEL по фотометрическим данным. Данный подход является модельно независимым хронометрированием объектов ранней Вселенной. Описывается построение объединенной выборки, содержащей 220 объектов из разных популяций эллиптических галактик, для которых проведен аналих верхней границы возраста формирования звездных систем. По эти данным оценены границы определения космопологических параметров H_0 и Λ-члена: $H_0 = 72 \pm 10, \Omega_\Lambda = 0.8 \pm 0.1$ в модели GISSEL и $H_0 = 53 \pm 10, \Omega_\Lambda = 0.8 \pm 0.1$ в модели PEGASE.

Ключевые слова: фотометрия радиогалактик, космологические параметры

1. ВВЕДЕНИЕ

Существенным моментом при определении космологических параметров является независимость методики от ставших уже классическими методов, таких как глубокие трехмерные обзоры галактик и скоплений, наблюдения сверхновых Ia типа (см. [1]) или реликтового излучения (например, [2]).

Один из независимых методов основывается на датировках, связанных с возрастом галактик (например, [3]). Первые попытки оценить Ω_Λ с использованием возраста звездных систем делались несколько лет назад (см., например, [4]). Новый подход был предложен в [5]. Он основан на датировках, связанных с вариациями возраста галактик, определяемого спектроскопическим методом. Таким способом можно построить независимую хронологическую шкалу, применимую для ранних этапов эволюции Вселенной. Этот подход основывается на измерениях разностей возрастов Δt двух пассивно эволюционирующих галактик, которые формируются в одно время, но разделены небольшим интервалом Δz. Тогда можно определить конечную разность $\Delta z/\Delta t \approx dz/dt$. По предлагаемой Хименесом и Лоубом методике все отобранные галактики должны иметь схожие металличности и низкие темпы звездообразования (т.е. красные цвета), а средний возраст системы должен значительно превышать разность возрастов галактик Δt. Применяя такой дифференциальный метод, Хименес и Лоуб [5] предлагают напрямую изменять $H(z)$ и $w_Q(z)$ на основе первых и вторых производных $(\delta z/\delta t)$ и $(\Delta^2 z/\Delta^2 t)$:

$$H(z) = -\frac{1}{(1+z)}\frac{dz}{dt}, \tag{1}$$

$$H_0^{-2}\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{[H_0^{-1}(dz/dt)]^2}{(1+z)}\left[\frac{5}{2} + \frac{3}{2}w_q(z)\right] - \frac{3}{2}\Omega_m(0)(1+z)^4 w_Q(z). \tag{2}$$

Предлагая этот дифференциальный метод, авторы отмечают, что необходимо как увеличить выборку галактик, так и улучшить отношение сигнал/шум.

Мы использовали метод, подобный методу [5], но с другим типом датировки возраста, а именно используя датировку по фотометрическим данным и выбор оптимального соответствия наблюдаемым потокам распределения энергии в спектре (SED), зависящего от возраста. Такая методика, ставшая уже стандартной, хотя и может дать ошибку возраста до 2 гигалет, работает достаточно устойчиво для чистой выборки эллиптических галактик (см., например, [6]).

*Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН, 2005. 58. С. 5

Методы с использованием цветовых и спектральных возрастов галактик основаны на хронометрировании темпов расширения Вселенной по физическим процессам, не относящимся к космологии: по темпам ядерных реакций в звездных, значения о которых для стандартных звезд типа Солнца достаточно точны и в последние десятилетия получили многочисленные прямые и косвенные подтверждения, включая самые последние достижения акустической томографии недр Солнца. Поэтому предлагаемый способ хронометрирования эволюции Вселенной напоминает методы хронометрирования на Земле по данным радиоактивного распада и в любом случае является независимым от других.

Отметим, что гигантские эллиптические галактики с высокой радиосветимостью и со старым звездным населением являются наиболее подходящими объектами для оценки возраста звездных систем. Современные модели предсказывают достаточно быстрое формирование (в течение 1 миллиарда лет) таких систем уже на $z \sim 4$ [7], что позволяет применить фотометрические методы для их исследования. Эффективность селекции таких галактик, начиная с умеренных красных смещений ($z > 0.5$), с помощью радиоастрономических методов подтверждена несколькими группами исследователей ([8]). Комбинированная диаграмма Хаббла "$K - z$" для радиогалактик и галактик поля ([9, 10]) показывает, что радиогалактики имеют наибольшую светимость на любом красном смещении из интервала $0 < z < 5.2$ ([11]). Кроме того, радиогалактики имеют сформировавшиеся сверхмассивные черные дыры, масса которых обычно пропорциональна массе звездного балджа ($M_{\rm BH} \sim 0.006 M_{\rm buldge}$, [12]), и этот факт является дополнительным свидетельством присутствия сформировавшегося звездного населения. Формирование радиогалактик на красных смещениях $z \sim 3 - 5$ дает уже сформировавшиеся звездные популяции на $z \sim 2 - 4$ и ΛCDM-моделях. Таким образом, отбирая далекие радиогалактики, мы достаточно эффективно находим гигантские эллиптические галактики, которые можно использовать для оценки возраста ([4, 13, 14]).

Данная работа описывает подходы, методы и результаты получения оценок космологических параметров по выборкам эллиптических галактик. Сначала мы обсудим проблемы, связанные с использованием эволюционных синтетических моделей спектров галактик, потом приведем результаты первых попыток коррекции стандартной космологической модели с холодной темной материей (SCDM) при помощи возрастных оценок родительских галактик, ответственных за возникновение мощных радиогалактик на больших красных смещениях, по данным эксперимента "Большое трио" [4, 15–20] и других авторов [6]. Далее мы дадим сводку попыток оценки зависимости возраста галактик от их красного смещения по текущим эволюционным моделям звездного населения эллиптических галактик для более широкого интервала красных смещений, включая близкие, с $z < 1$, объекты. Затем мы обсудим попытку использования данных многоцветной фотометрии галактик, составляющих население большого числа скоплений галактик.

2. ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ДАТИРОВКА

2.1. Эволюционные модели спектров

В конце 80-х – начале 90-х годов были сделаны попытки использовать цветовые характеристики радиогалактик для оценки красных смещений и возраста звездных систем родительских галактик. Были предложены многочисленные эволюционные модели, которые приводили к сильно отличающимся результатам при сравнении с наблюдательными данными ([15, 21–24]). В последние годы широкое распространение получили модели PEGASE: Project de'Etude des Calaxies par Senthese Evolutive ([25]) и GISSEL'98: Galaxy Isochrone Synthesis Spectral Evolution Library ([26, 27]), в которых устранены недостатки предыдущих моделей.

В эксперименте "Большое Трио" [15] мы также пытались применить эти методы для далеких объектов RC-каталога с крутыми спектрами, для которых нами были измерены звездные величины в четырех фильтрах (BVRI). Использовалась процедура сглаживания, позволяющая промоделировать и предсказать поток в данном фильтре на заданном SED с учетом кривой пропускания этого фильтра, а также с учетом эффекта влияния красного смещения. Эти изменения в методике позволили сделать результаты более надежными по сравнению с предыдущей работой.

Предварительно в [6] мы исследовали применимость новых моделей к популяции далеких ($z > 1$) радиогалактик с известными красными смещениями, для которых нам удалось найти в литературе более или менее надежные данные многоцветной фотометрии в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах не менее, чем в трех фильтрах. В частности, показано, что можно оценивать красные смещения с точностью до 25-30% при $1 < z < 4$, имея измеренные звездные величины более чем в 3-х фильтрах. А если имеется, по крайней мере, одна оценка блеска в инфракрасной области, то достаточно использовать измерения в 3-х филь-

трах. Оценки проводились для двух эволюционных моделей.

В качестве одной из моделей SED (Spectral Energy Distribution) использовалась эволюционная модель PEGASE [25] для галактик хаббловской последовательности как со звездообразованием, так и эволюционирующих пассивно. Одно из основных достоинств этой модели состоит в расширении к ближнему инфракрасному (NIR) диапазону атласа синтетических спектров Рока-Волмеранжа и Гуидердони [28] с пересмотренной звездной библиотекой, включающей параметры холодных звезд. Модель охватывает диапазон от 220Å до 5 микрон. Алгоритм модели, согласно авторам, позволяет отслеживать быстрые эволюционные фазы, такие как фазы красного сверхгиганта или AGB в ближнем IR-диапазоне. Мы использовали из этой модели широкий набор кривых SED в диапазоне возрастов от 7×10^6 лет до 19×10^9 лет для массивных эллиптических галактик.

Мы использовали расчеты для эллиптических галактик из библиотеки синтетических спектров модели GISSEL'98 ([27]), построенной с помощью эволюционных моделей из [26,29]. Библиотека синтетических спектров эллиптических галактик построена с учетом следующих параметров звездообразования: простого звездного населения (SSP — simple stellat population), продолжительности процесса вспышечного звездообразования — 1 млрд. лет, затухание вспышечной активности звездообразования идет по экспоненциальному закону. В модели использовалась солнечная металличность. Начальная функция масс (IMF) с верхним пределом 125 солнечных масс взята из работы [30]. Как показано в работе [27], на точности определения красных смещений выбор IMF не сказывается. Модельные треки рассчитаны в диапазоне длин волн от 200 до 95800Å. Для наших расчетов мы использовали диапазон, заданный пределом красных смещений от 0 до 6.

Используемые наборы эволюционных моделей доступны на сервере `http://sed.sao.ru` ([31]).

2.2. Процедура оценки возраста и красного смещения

Перед использованием модельных кривых мы провели сглаживание их фильтрами, применяя следующий алгоритм [20]:

$$S_{ik} = \frac{\sum\limits_{j=0}^{n} s_{i-n/2+j} f_{jk}(z)}{\sum\limits_{j=0}^{n} f_{jk}(z)}, \qquad (3)$$

где s_i—исходная модельная кривая SED, S_{ik} — сглаженная k-ым фильтром модельная кривая SED, $f_k(z)$ — кривая пропускания k-го фильтра, "сжатая" в $(1+z)$ раз при "движении" вдоль оси длин волн кривой SED, $j = 1,n$ — номер пиксела в кривой пропускания фильтра. Из сформированных таким образом k кривых SED мы построили двумерный массив (λ, фильтр) сглаженных синтетических звездных спектров для дальнейших вычислений.

Оценка возрастов и красных смещений радиогалактик проводилась методом выбора на кривых SED оптимального положения фотометрических величин, полученных в различных фильтрах при наблюдениях радиогалактик. Мы использовали уже рассчитанные и заданные в виде таблиц кривые SED для разных возрастов. Алгоритм выбора оптимального положения точек на кривой состоял ([32]) в вариации положения точек вдоль осей длин волн и интенсивности кривых SED. При этом определялось такое положение, при котором сумма квадратов отклонений точек от соответствующих сглаженных кривых минимально, т.е. фактически вычислялся минимум χ^2:

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^{N_{\rm filters}} \left(\frac{F_{{\rm obs},k} - p \cdot {\rm SED_k(z)}}{\sigma_k} \right)^2, \qquad (4)$$

где $F_{{\rm obs},k}$ — наблюдаемая звездная величина в k-ом фильтре, ${\rm SED}_k(z)$ — модельная звездная величина для заданного спектрального распределения в k-ом фильтре на заданном z, p — свободный коэффициент, σ_k — ошибка измерения. Красное смещение определялось по сдвигу положения наблюдаемых величин при наилучшем расположении их на кривых SED относительно положения "rest frame" (положения при $z = 0$). Из общего набора кривых для разных возрастов мы выбирали такие, на которых сумма квадратов невязок для данных наблюдений радиогалактик получалась минимальной.

Правильность оценки возраста (и красного смещения) мы проверяли двумя способами. В первом случае использовались модельные данные, полученные при сглаживании фильтрами разных кривых SED для разного возраста. В результате этой процедуры моделировались наблюдения с ПЗС-матрицей для 5-ти фильтров, и запускался механизм прогонки. Были выбраны точки, соответствующие фильтрам VIJHK, на красном смещении $z = 0.539$ и нефиксированных красным смещением. Из результата прогонки можно сделать вывод: и возраст и красное смещение определяются уверенно, но возможно попадание на соседнюю кривую возраста, что дает точность 200 млн. лет, и при нефиксированном z на результат оказывает влияние дискретизация по длине волны λ в кривых SED (ошибка z до 6%).

Во втором случае для исследования возможностей метода определения красных смещений и возрастов звездного населения родительских галактик по данным многоцветной фотометрии мы отобрали около 40 далеких радиогалактик с известными красными смещениями, для которых в литературе приведены звездные величины не менее чем в трех фильтрах [6,33]. Сначала по собранным фотометрическим данных с использованием моделей PEGASE и GISSEL'98 были определены только возрасты звездного населения родительских галактик при фиксированном известном красном смещении, после чего был осуществлен поиск оптимальной модели кривой SED одновременно для красного смещения и возраста звездного населения, а затем сравнение полученных значений. Таким методом мы оценивали как возраст галактики, так и красное смещение в рамках заданных моделей (см. [6, 34]). Из общих соображений ясно, что надежность результата при больших красных смещениях существенно зависит от наличия инфракрасных данных (вплоть до K-диапазона), т.к. при подгонке мы перекрываем область быстрого изменения спектра (скачок) перед оптическим диапазоном SED и тем самым можем уверенно, с хорошо выделяющимся максимумом на кривой правдоподобия, определять положение наших данных. Действительно, при проверке надежности процедуры с помощью имеющихся измерений при сохранении только 3-х точек, одна из которых находится в K-диапазоне, мы получаем тот же результат на кривой зависимости невязок, что и для 4-х или 5-ти точек. Если же не использовать инфракрасный диапазон, то результат получается более неопределенным. Однако, как показано в работе [6], вариант близкого расположения 4-х фильтров, как в нашем случае BVRI-фотометрии, дал в контрольной выборке из 6-ти объектов хороший результат, совпадающий с результатом, полученным при использовании всех фильтров, включая инфракрасный диапазон.

3. ВЫБОРКА ОБЪЕКТОВ

Следует сказать, что выбор эллиптических галактик в качестве объектов для нашего исследования не случаен. Их можно рассматривать как наиболее оптимальные объекты среди звездных систем, имеющие достаточно однородное звездное население. Хотя такие объекты тоже имеют (умеренные) градиенты металличности [35], моделирование показало [5], что изменение вклада металличностей приводит к неопределенности оценок возраста в пределах 0.1 гигалет, что лежит внутри диапазона неопределенности подобных оценок.

В данном исследовании также использованы радиогалактики, которые, как правило, отождествляются с гигантскими эллиптическими галактиками (gE) и являются хорошими "фонарями" и представителями далеких звездных систем. Стандартная точка зрения последних десятилетий — мощные радиогалактики связаны со старыми крупными звездными системами типа gE, имеющими красный цвет. Опыт использования шаровых скоплений в нашей Галактике для оценки возраста Вселенной подсказывает, что поиск самых старых звездных систем на больших красных смещениях может быть полезным для хронометрирования темпов расширения Вселенной на любых расстояниях, на которых еще существовали мощные радиогалактики. Как показали исследования многих групп, включая проект "Большое Трио" ([18,36,37]), мощные радиогалактики появились на красных смещениях $z \approx 5$. Весь интервал $0 < z$,5 потенциально может быть исследован уже сегодня, так как чувствительно радио- и оптических телескопов достаточна для изучения этих мощных радио- и оптических объектов. При этом, в отличие от квазаров, излучение звездного населения можно легко отделить от излучения газовой компоненты.

Заметим, однако, что в случае радиогалактик возникают неопределенности при фотометрическом определении возраста из-за различных факторов (см., например, [38]), таких как ионизация и ли просвечивание синхротронного излучения от ядра, взаимодействие облаков и джета и т.п. Кроме того, галактики на ранних стадиях могли быть взаимодействующими, что изменяет звездное население. Тем не менее, радиогалактики остаются пока единственным простым средством изучения эллиптических галактик на больших красных смещениях.

3.1. Данные по радиогалактикам из каталога "Холод"

Данная выборка радиогалактик типа FR II, обнаруженных в обзоре "Холод", проведенном на РАТАН-600 [39, 40], создана с привлечением данных многоцветной фотометрии для оценки цветовых красных смещений и возрастов звездных систем родительских галактик ([15,20]). Позднее для 20-ти объектов были проведены спектральные наблюдения на БТА с прибором SCORPIO ([41]), которые подтвердили с высокой точностью (коэффициент корреляции 0.92) фотометрические оценки.

В программе "Большое Трио" были измерены BVRI-цвета около 60-ти радиогалактик и обнаружено, что хотя их цветовой возраст имеет большую дисперсию, можно достаточно уверенно сказать,

что верхняя граница возраста является функцией красного смещения (чем больше z, тем меньше максимальный возраст). На малых и очень больших красных смещениях галактик это не противоречит SCDM-модели без космологический постоянной Λ, но в интервале $0.7 < z < 2$ имеются объекты с цветовым возрастом больше возраста Вселенной на соответствующем красном смещении. Это расхождение, как известно (см., например, [42]), устраняется в ΛCDM-моделях. Действительно, возраст такой Вселенной не отличается от возраста в SCDM-модели ни на очень малых, ни на очень больших красных смещениях, что видно из формул, приведенных в упомянутой работе.

Однако в интервале красных смещений $z = 1 - 2$ различие может достигать 1-2 млрд. лет, что уже близко к возможностям эксперимента. Простая теория с $\Lambda \neq 0$ для пространственно плоской изотропной космологической модели дает зависимость положения максимума отклонений от SCDM-модели на оси красных смещений от величины космологической постоянной. Первые попытки оценки значения космологической постоянной по данных программы "Большое Трио" были сделаны в 1999 г. [4]. В связи с неуверенностью в количественных оценках возраста галактик по измеренному красному смещению было найдено число галактик, возраст которых формально превышает возраст Вселенной в SCDM-модели с $\Lambda = 0$ и построена гистограмма распределения количества этих галактик относительно z (рис. 1).

По положению максимума была оценена доля "темной энергии" (Ω_Λ), которая оказалась близкой к величине, полученной по сверхновым типа Ia: $1\Omega_\Lambda = 0.8 - 0.6$ (рис. 2).

Этот успех стимулировал наши дальнейшие шаги в использовании возрастных характеристик звездного населения. На рис. 3 приведены все данные по радиогалактикам с крутыми спектрами, собранные группой "Большое Трио" в 2001 г. Видно, что присутствуют объекты с большими z, а на $z < 2$ дисперсия возрастов велика. Но чем больше красное смещение, тем меньше возраст самого старого объекта, как и следовало ожидать, во всех эволюционных моделях Вселенной. Выбрав популяцию объектов, возраст которых меньше возраста Вселенной в ΛCDM-модели не более, чем на 2 млрд. лет, получим зависимость $z(t)$, подобную изображенной на рис. 4. Зависимость такого типа уже может служить основой для оценки $R(t)$.

3.2. Данные по исследованным радиогалактикам с $z > 1$

Как говорилось выше, для проверки методики и оценки красных смещений и возраста звездных систем мы построили выборку радиогалактик FRII с красными смещениями вплоть до $z = 3.80$ ([6,33]) по данным, полученным другими авторами.

Необходимо отметить, что литературные фотометрические данные очень неоднородны. Они получена не только разными авторами, но и на различных инструментах, с разными фильтрами. Измерения для одного и того же объекта не всегда проводились в одинаковых апертурах и т.д. Поэтому после окончательной селекции из 300 радиогалактик первичной выборки осталось только 42. Большая часть объектов осталась за пределами выборки, потому что они имеют свойства квазаров, что сильно затрудняет использование процедуры SED для стандартных эллиптических галактик. Полученное медианное значение возраста для данной выборки — 5 гигалет для модели GISSEL и 9 гигалет для модели PEGASE.

3.3. Скопления галактик

Подвыборка эллиптических галактик из скоплений, предложенная в [44], является наиболее представительной из исследуемой группы объектов (табл. 1). Для ее построения мы использовали данные из работы [43], содержащей выборку галактик из 45-скоплений галактик на красных смещениях $0.1 < z < 1.3$. Для всех объектов имеются фотометрические данные из оптического и близкого инфракрасного диапазона. В среднем для каждой галактики приводятся звездные величины в полосах BIJHK. Мы отобрали по показателям цвета по 5-11 объектов — типичных эллиптических галактик из 25-ти скоплений.

4. ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ

В основе нашего подхода лежит анализ функции $t(z)$, построенной как

$$t(z) = \int_z^\infty \frac{d\bar{z}}{(1+\bar{z})H(\bar{z})} \qquad (5)$$

по данным возрастов радиогалактик в зависимости от красного смещения. В качестве функции $H(z)$ мы использовали выражение

$$H^2 = H_0^2[\Omega_m(1+z)^3 + A + B(1+z) + C(1+z)^2], \quad (6)$$

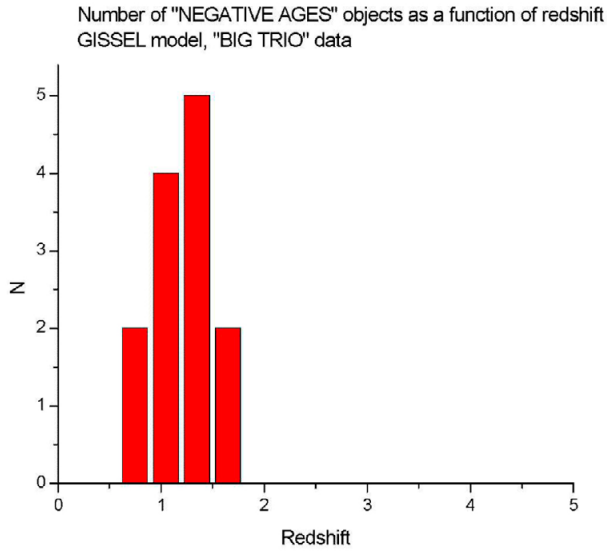


Рис. 1. Гистограмма распределения галактик от z с формальным возрастом больше возраста Вселенной.

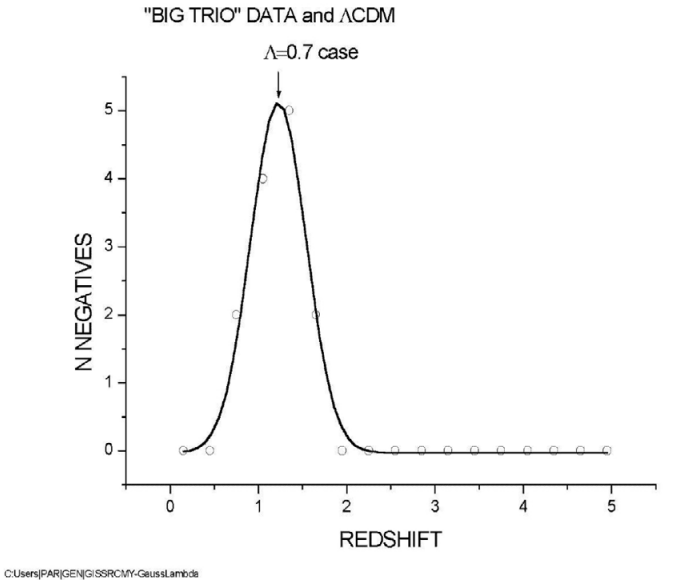


Рис. 2. Оценки Ω_Λ по объектам проекта "Большое Трио".

где $A + B + C = 1 - \Omega_m$.

Подгонка функции $t(z)$ под анализируемые данные проводилась с помощью вариации четырех параметров (H_o, Ω_m, A, B). Для аппроксимации данных мы разбивали весь набор красных смещений на равные интервалы с шагом Δz и в каждом из интервалов использовали максимальное значение возраста. По сумме квадратов невязок строилась четырехпараметрически функция правдоподобия. При значениях параметров $B = C = 0$, т.е. при использовании упрощенной модели функции $H(z)$, определяемой только двумя параметрами (H_0, Ω_m), и $A = 1 - \Omega_m = \Omega_\Lambda$, имеются устойчивые решения для обеих моделей эволюции

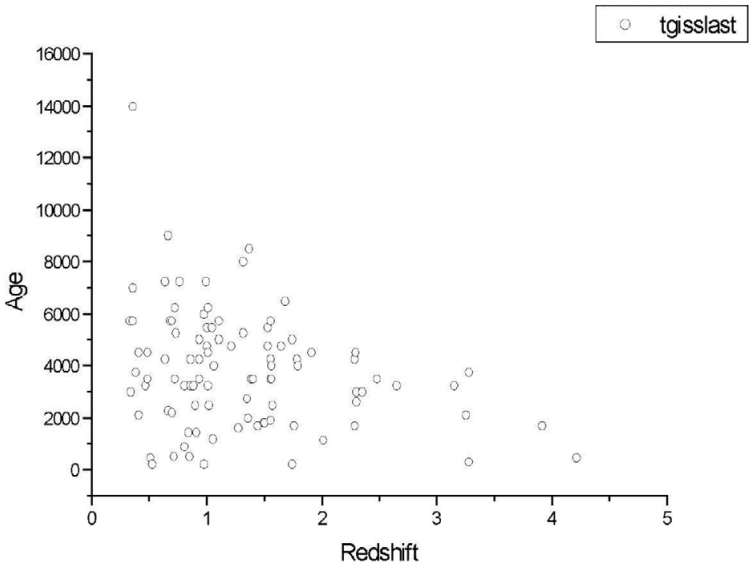


Рис. 3. Зависимость $t(z)$ для радиогалактик с большим z и крутыми радиоспектрами, взятых из различных опубликованных работ. Видно, что на $z < 2$ дисперсия возрастов велика.

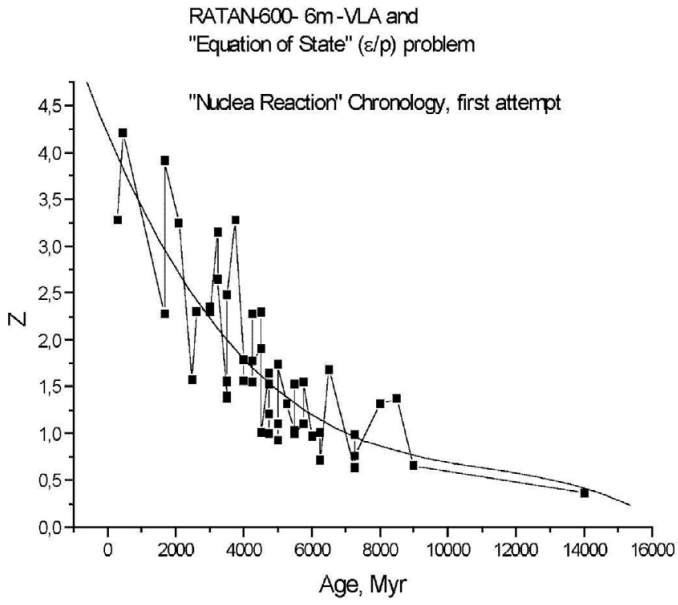


Рис. 4. Зависимость $z(t)$ для объектов с $t_{\text{starform}} - t_{\text{Univer}} \leq 2$млрд. лет.

Таблица 1. Отобранные эллиптические галактики — члены скоплений. Приведены: галактические координаты и названия скоплений, номера выбранных галактик в данном скоплении согласно [43], красные смещения, использовавшиеся фильтры, $K_{\rm lim}$.

RA+Dec(2000)	Имя	ID-номер галактики	z	Фильтры	$K_{\rm lim}$
001631.2+791649	3C 6.1	14,18,33,34,43	0.840	KJIR	19.8
001833.5+162515	C1 0016+16	8,9,15,17,22,27,35,40,42	0.545	KHJIV	19.1
002354.5+042313	GHO 0021+0406	9,12,15,24,29	0.832	HJIR	20.0
002635.7+170945	C1 0024+16	3,4,5,8,9,10,16,26,33	0.391	KHJRg	18.8
004910.9-244043	Vidal 14	6,11,14,17,23,31,40,43	0.520	KJIV	18.0
005657.1-274030	J1888.16CL	7,17,23,45	0.560	KHJIV	19.2
011018.5+314719	3C 34	7,8,13,21,23,34,40	0.689	KHJiV	19.1
030619.1+171849	GHO 0303+1706	6,7,13,18,22,24,34,40	0.418	KHJRg	18.8
032001.4+153200	GHO 0317+1521	3,8,9,13,14,23,24	0.583	KJIV	19.2
041246.6-655055	F1557.19TC	20,25,30,37,39	0.510	KHJIV	19.1
045410.9-030057	MS 0451.6-0306	3,11,12,19,25,31,33,40	0.5399	KHJiV	19.2
073924.3+702315	3C 184	3,4,8,12,15	0.996	KJI	20.3
084835.9+445337	RDCS 0848+4453	4,6,9,11,13,15	1.273	KHJIR	20.5
085809.9+275052	3C 210	3,6,13,15,16,17	1.169	KJI	20.5
093239.6+790632	3C 220.1	5,8,12,16,17,19,24,25	0.620	KHJIV	19.5
105659.5-033736	MS 1054.5-032	4,7,9,13,14,22,23,25,26,30	0.828	KHJiR	20.3
114022.2+660813	MS 1137.5+6625	3,8,10,11,12,15,16,17,20,21,24	0.782	KHJiR	20.0
132448.9+301138	GHO 1322+3027	2,5,8,10,17,18,20	0.751	KHJiR	20.3
141120.5+521210	3C 295	9,18,24,27,28,31,32,34,35,37	0.461	KHJiV	18.8
151100.0+075150	3C 313	6,12,13,21,33	0.461	KJiV	18.5
160312.2+424525	GHO 1601+4253	4,6,17,18,19,22,43	0.539	KHJiV	19.2
160424.5+430440	GHO 1603+4313	5,15,17,36,40	0.895	KHJiR	20.3
160436.0+432106	GHO 1604+4329	7,10,20,21,28,30,32	0.920	KHJiR	20.1
205621.2-043753	MS 2053.7-0449	35,39,51,89	0.582	KJIV	19.2
220403.9+031248	GHO 2201+0258	10,11,13,14,17,25,29,35,38	0.640	KJIV	19.3

звездного населения. Результаты подгонки параметров приведены в табл. 2, в который даны параметры аппроксимационных кривых для интервалов $\Delta z = 0.2$ и 0.3 для обеих моделей звездного населения и на рис. 5.

4.1. Влияние ошибок на оценки параметров

Подобный метод определения параметров является достаточно устойчивым к входным параметрам и систематическим эффектам. Как показало

Таблица 2. Двухпараметрическая подгонка космологических параметров по формулам 5 и 6 (когда $B = C = 0.0$) для аппроксимационных кривых в интервалах $\Delta z = 0.2$ и 0.3 для обеих моделей звездного населения.

модель SED	Δz	Ω_m	Ω_Λ	H_0	ε [Млет]
GISSEL	0.2	0.2	0.8	77.7	1695
GISSEL	0.3	0.2	0.8	71.5	1367
PEGASE	0.2	0.2	0.8	65.4	4101
PEGASE	0.3	0.2	0.8	53.0	2748

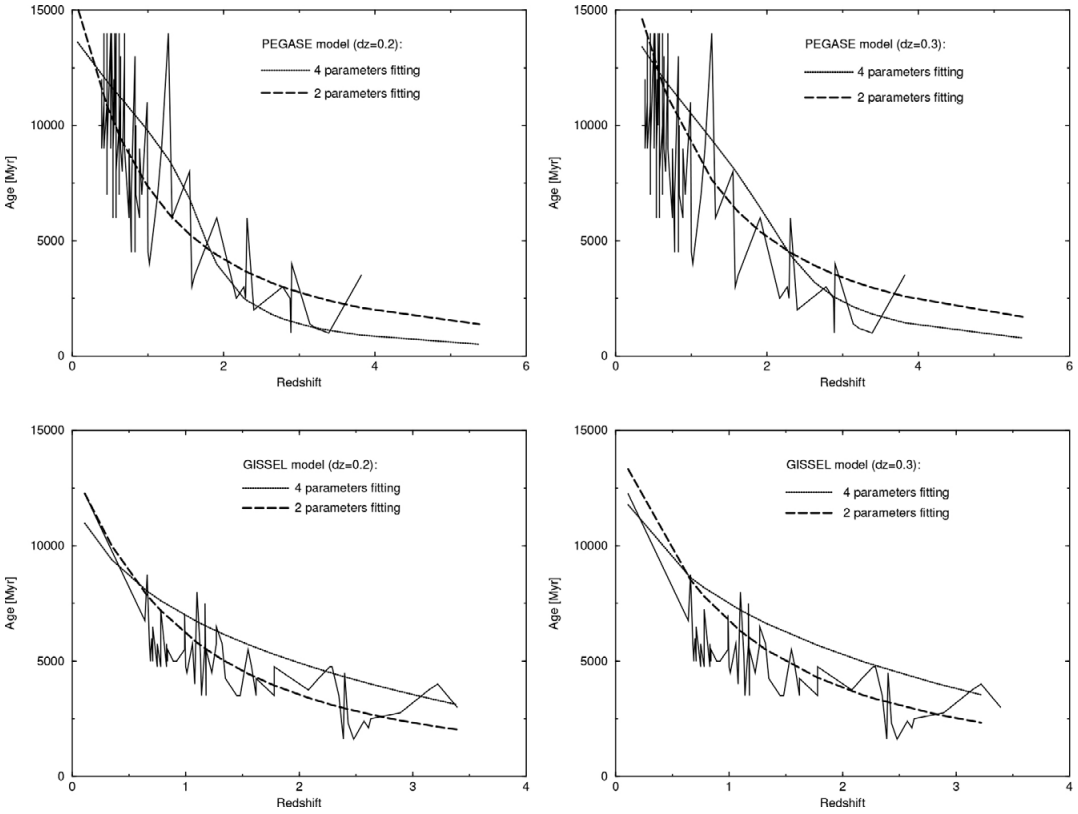


Рис. 5. Зависимость $t(z)$ для моделей, приведенных в табл. 2. Верхний ряд — оценка для модели PEGASE, нижний ряд — модели GISSEL. Слева — дискретизация $\Delta z = 0.2$, справа — дискретизация $\Delta z = 0.3$. Кривые построены для параметризации (5,6) по максимумам возрастов галактик в заданных интервалах красных смещений.

моделирование, изменение начальной металличности приводит к изменению возраста на 0.1 гигалет ([5]). Изменение начальной функции масс также практически не меняет модели SED ([27]).

Ошибка определения возраста, которая может быть связана с неправильной классификацией типа галактики, а следовательно, и выбором SED, в данном случае играет в пользу описываемого подхода. Модели SED, соответствующие эллиптическим галактикам, дают самое старое звездной население среди всех спектров. Таким образом, если в галактике встречаются области звездообразования, дающие вклад в фотометрические данные, то выбор оптимальной модели смещается в сторону более молодого звездного населения, и галактика выпадает из нашей выборки, т.к. для построения $t(z)$ используются максимальные значения.

Для проверки влияния полноты выборки на результат мы использовали метод будстропа, заключающийся в размножении исходной выборки и построении новой с помощью случайного выбора объектов. Коэффициент размножения выборки брался равным 100, и для каждого интервала dz случайным образом выбиралось количество объектов, равное исходному. Таким образом, было проведено 50 испытаний, и в каждом случае оценивались значения параметров. В результате были получено дисперсии оценок $H_0 = 72 \pm 7$ для модели GISSEL и $H_0 = 53 \pm 6$ для модели PEGASE в интервале $dz = 0.3$. Значения Ω_Λ при этом остается неизменным, что объясняется влиянием объектов на умеренных красных смещениях $z = 0.3-1.0$, имеющих сравнительно небольшой разброс возрастов.

Влиянием внутреннего самопоглощения в галактике ([45]) мы пренебрегали из-за неоднозначности решений для малого количества используемых входных параметров (число фильтров) и необходимости определять большое число неизвестных параметров.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам работы подтверждается то, во-первых, что мы живем в эволюционирующей Вселенной, во-вторых, что отличие от стандартной релятивистской плоской модели ΛCDM находится в пределах погрешностей метода. Для оценки квинтэссенции $w_Q(z)$ точности пока не хватает.

Для объединенных данных из разных популяций эллиптических галактик, в том числе и для радиогалактик, проведен анализ верхней границы возраста формирования звездных систем. По этим данным оценены границы определения космологических параметров H_0 и Λ-члена, как $H_0 = 72 \pm 10$, и $\Omega_\Lambda 0.8 \pm 0.1$ в модели GISSEL и $H + 0 = 53 \pm 10$, и $\Omega_\Lambda \pm 0.1$ в модели PEGASE. Отметим, что модели GISSEL имеют меньшую дисперсию возрастов для каждого интервала dz, т.е. более устойчивый результат и, возможно, как следствие, более надежное определение космологических параметров.

Говоря о применяемой методике, следует заметить, что одно из основных проблем является использование наблюдений радиогалактик, у которых наряду со стандартной эволюцией звезд на фотометрические измерения могу влиять и другие факторы. Тем не менее, уже появляются новые модели (например, PEGASE2: [46]), позволяющие учитывать некоторые из этих факторов.

Заметим также, что:

1) использование возрастных характеристик галактик для независимых оценок космологических параметров, в принципе, нам кажется перспективным. Пример — оценка величины Λ-члена, которую можно улучшать, расширяя объем выборки и применяя более рафинированные модели;
2) первые пробы более глубокого использования данных "возраст — красное смещение" дали оценки, близкие к наиболее точным измерениям параметров по данным спутника WMAP [47];
3) предварительная селекция кандидатов должна проводиться различными путями, так как ни один из известных нам не является идеальным. Относительно мощное радиоизлучение (отношение радиосветимости к оптической) указывает на то, что мы имеем дело с гигантской галактикой со сверхмассивной черной дырой в центре, на формирование которой требуется время. К сожалению, пока не общепринятой теории их формирования. Предложение использовать объекты в хорошо изученных скоплениях кажется также привлекательным [44], т.к. именно по скоплениям получены данные для $R(t)$ на малых красных смещениях. Осталось непонятным модельное различие для скоплений, которое не меньше, чем для радиогалактик. Использование верхних значений возраста в выборках на различных красных смещениях кажется оправданным. Даже один самый старый объект в выборке является решающих в оценке нижнего предела возраста Вселенной на данном красном смещении, подобно тому, как единственная старая звезда в Галактике (или самое старое шаровое скопление) определяет минимальный возраст Вселенной сегодня. Самой сложной проблемой, на наш взгляд, является проблема теории эволюции распределения энергии в спектре галактик, и здесь пока имеются значительные разночтения.

БЛАГОДАРНОСТИ

ОВВ выражает благодарность РФФИ за частичную поддержку работы грантом № 02-7-90038, ЮНП — за поддержку грантами программ "Интеграция", "Астрономия" и РФФИ. Особая благодарность А.И. Копылову за многочисленные критические замечания и предложение использовать новые данные по цветовым характеристикам эллиптических галактик в скоплениях. АС был частично поддержан грантами РФФИ 02-02-16817 и 00-15-96699, а также научной программной РАН "Астрономия".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Leibundgut, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **39**, 67 (2001).
2. G. Efstathiou, S. Moody, J. A. Peacock, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **330**, 29 (2002).
3. Saini Tarun Deep, Raychaudhury Somak, Sahni Varun, and A. A. Starobinsky, Phys. Rev. Lett. **85**, 1162 (2002).
4. Yu. N. Parijskij, in *Current Topics in Astrofundamental Physics: the Cosmic Microwave Background*, Proc. NATO Advanced Study Inst., Ed. by Norma G. Sanchez (Kluwer Acad. Publish, 2001), p.219.
5. R. Jimenez and A. Loeb, Astrophys. J. **573**, 37 (2002), astro-ph/0106145.
6. O. V. Verhodanov, A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **48**, 41 (1999), astro-ph/9910559.
7. A. Pipino and F. Matteucci, Mon. Not. R. Astron. Soc. **347**, 968 (2004).
8. M. Pedani, New Astron. **8**, 805 (2003).

9. M. J. Jarvis, S. Rawlings, S. Eales, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **326**, 1585 (2001).
10. C. De Breuck, W. van Breugel, S. A. Stanford, et al., Astron. J. **123**, 637 (2002).
11. M. Reuland, W. van Breugel, H. Röttgering, et al., Astrophys. J. **592**, 755 (2003).
12. J. Magorrian, S. Tremaine, D. Richstone, et al., Astron. J. **115**, 2285 (2004).
13. O. V. Verhodanov and Yu. N. Parijskij, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **55**, 66 (2003).
14. А. А. Старобинский, Ю. Н. Парийский, и О. В. Верходанов, *Труды Астрон. инст. им. Штернберга, LXXV, Тез. Всероссийской астрон. конф. ВАК-2004, Горизонты вселенной* (МГУ, ISSN 0371-6769), 198.
15. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).
16. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Astron. Astrophys. Trans. **19**, 297 (2000).
17. Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, A. I. Kopylov, et al., Pis'ma Astron. Zh. **26**, 493 (2000).
18. N. S. Soboleva, W. M. Goss, O. V. Verhodanov, et al., Pis'ma Astron. Zh. **26**, 723 (2000).
19. А. И. Копылов, Уи. М. Госс, Ю. Н. Парийский, и др., Астрон. ж. **72**, 613 (1995).
20. O. V. Verhodanov, Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **52**, 5 (2002), astro-ph/0203522.
21. N. Arimoro and Y. Yoshii, Astron. Astrophys. **179**, 23 (1997).
22. K. Chambers and S. Charlot, Astrophys. J., Lett. **348**, L1 (1990).
23. S. Lilly, Mon. Not. R. Astron. Soc. **229**, 573 (1987).
24. S. Lilly, in *Evolution of the Universe*, Ed. by R. G. Kron (Astron. Soc. Pacific, 1990), p. 344.
25. M. Fioc and B. Rocca-Volmerange, Astron. Astrophys. **326**, 950 (1997).
26. G. Bruzual and S. Charlot, Astrophys. J. **405**, 538 (1993).
27. M. Bolzonella, J.-M. Miralles, and R. Pelló, Astron. Astrophys. **363**, 476 (2000), astro-ph/0003380.
28. B. Rocca-Volmerange and B. Guiderdoni, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **75**, 93 (1988).
29. G. Bruzual and S. Charlot, `anonymous@ftp://gemini.tuc.noao.edu/pub/charlot/bc96` (1996).
30. G. E. Miller and J. M. Scalo, Astron. Astrophys. **41**, 513 (1979).
31. O. V. Verhodanov, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, et al., Astron. Astrophys. Trans. **19**, № 3-4, 662 (2000), astro-ph/9912359, `http://sed.sao.ru`.
32. O. V. Verhodanov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **41**, 149 (1996).
33. O. V. Verhodanov, A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, et al., in *Prospects of Astronomy and Astrophysics For the New Millenniun* (Joint European and National Astronomical Meeting, JENAM'98, 7th Europ. & 65th Ann. Czech Astron. Conf., Prague, 9-12 Sept., 1998), p. 302.
34. O. V. Verhodanov, A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, et al., in *Modern problems of extragalctic astronomy* (Pushino, May 25-29, Pushino Sci. Center, 24, 1998).
35. A. C. S. Friaca and R. J. Terlevich, Mon. Not. R. Astron. Soc. **298**, 399 (1998).
36. S. Rawlings, M. Lacy, K. M. Blundell, et al., Nature **383**, 502 (1996).
37. W. J. M. van Breugel, C. De Breuck, S. A. Stanford, et al., Astrophys. J. **518**, 61 (1999).
38. E. Moy and B. Rocca-Volmerange, Astron. Astrophys. **383**, 46 (2002).
39. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **87**, 1 (1991).
40. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **96**, 583 (1992).
41. В. Л. Афанасьев, С. Н. Додонов, А. В. Моисеев, и др., Препр. №139 (Филиал САО, Санкт-Петербург, 2002)ю
42. Sahni Varun and A. A. Starobinsky, Int. J. Mod. Phys. D **9**, 373 (2000).
43. S. A. Stanford, P. R. Eisenhardt, M. Dickinson, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **142**, 153 (2002), astro-ph/0203498.
44. А. И. Копылов, частное сообщение (2001).
45. V. V. Sokolov, T. A. Fatkhullin, A. J. Castro-Tirado, et al., Astron. Astrophys. **26**, 723 (2000).
46. D. Le Borgne and B. Rocca-Volmerange, Astron. Astrophys. **386**, 446 (2002).
47. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., Astrophys. J. **48**, 175 (2003), astro-ph/0302209.

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИЗКИХ МУЛЬТИПОЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА*

П. Д. Насельский[1], О. В. Верходанов[2], М. Т. Б. Нильсен[1]

[1]Институт Нильса Бора, Копенгаген, Дания
[2]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

В данной статье обсуждается проблема байеса в карте космического микроволнового фонового излучения ILC (Internal Linear Combination) и показывается, что она связана с коэффициентом кросс-корреляции $K(\ell)$ истинного космического микроволнового фона и фоновой компоненты излучения для каждого мультиполя ℓ. Мы приводим анализ кросс-корреляций для квадрупольной и октупольной компонент карт ILC космической миссии WMAP и показываем, что коэффициент корреляции меняется в пределах от 0.52 до 0.60. Проанализировав методом Монте-Карло 10^4 моделей случайного гауссова сигнала космического микроволнового фона, мып оказываем, что функция распределения соответствующего коэффициента кросс-корреляции имеет полиномиальную форму $P(K,\ell) \propto (1K^2)^{\ell 1}$. Мы также показываем, что наиболее вероятное значение коэффициента кросс-корреляции карт ILC и фоновой компонентык вадруполя имеет два экстремума на уровне $K \simeq \pm 0.58$. Мы анализируем проблему дебайесинга в карте ILC космического микроволнового фона и показываем, что восстановление реального байеса является весьма проблематичным из-за космической вариации сигнала. Кроме того, нестабильность процедурыдоп олнительно усугубляется переменностью знака квадруполя и октуполя, из-за этого четные моды гармоник $\ell + m$ восстанавливаются со значительной ошибкой. Эта ошибка проявляется в изменении знака четных мод низких мультиполей на противоположный истинному знаку и приводит к значительным изменениям коэффициента кросс-корреляции карт космического микроволнового фона и фона. Мы показываем также, что для модельных реализаций сигнала космического микроволнового фона, у которых знак квадрупольной компоненты (2, 0) отрицательный (и такой же как у фона), соответствующая вероятность получения положительного знака после применения метода ILC будет около 40%.

Ключевые слова: теоретическая и наблюдательная космология

1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с эксперимента COBE (The Cosmic Background Explorer), и после появления данных WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [1–7] однолетнего, трехлетнего и пятилетнего циклов наблюдений проблеме восстановления низких мультиполей реликтового излучения (Cosmic Microwave Background — CMB) $\ell \leq 10$ (мощность квадруполя, планарность и выравнивание квадруполя и октуполя и т.п.) уделяется много внимания. Множество космологических моделей применяется для объяснения неочевидных особенностей низких мультиполей карты ILC, включающих модель скользящего спектрального индекса первичных адиабатических возмущений [1–5], нетривиальную топологию Вселенной [8, 9], нарушенную масштабную инвариантность (BSI) спектра мощности [10, 11], первичное магнитное поле [12–14], анизотропные космологические модели Бьянки (Bianchi) VIIh [15–19] и т.п.

Проблема низкой мощности квадруполя CMB может иметь отношение и к негауссовости низких мультиполей WMAP, куда также могут входить проблемы планарности и выравнивания квадруполя и октуполя [20–23], корреляции с фоновыми компонентами [4, 24–27], локальные дефекты карт CMB [28] и т.п. Такие особенности требуют дополнительного теоретического объяснения, так как происхождение их все еще остается неясным.

Другой взгляд на проблему низких мультиполей CMB сигнала карты ILC заключается в рассмотрении кросс-корреляции между сигналом CMB и фоновыми компонентами (байес карты ILC [4, 24, 27, 29, 30]), систематических эффектов [31], включающих влияние моды $\ell = 2$ на диполь через далекие боковые лепестки диаграммы направленности [32].

*Астрофизический бюллетель. 2008. 63(3). С. 231

В этой статье мы хотим перепроверить наиболее важный момент в анализе данных современных экспериментов по изучению CMB, относящийся к проблеме разделения сигнала CMB и фоновых компонент методом внутренней линейной комбинации (Internal Linear Combination Method — ILC). Нет необходимости говорить, что разделение сигнала CMB и мешающего фона является основной проблемой для всех экспериментов в области исследования реликтового излучения, включая продолжающуюся миссию WMAP и будущую миссию Planck. Основной формализм метода ILC, с помощью которого можно восстановить сигнал CMB из наборов наблюдательных данных, заключается в комбинировании их с вещественными взвешивающими коэффициентами данных в одну (Linear Combination) карту. Тогда, чтобы найти эти взвешивающие коэффициенты, мы должны минимизировать некоторый функционал, определяемый на многочастотном наборе данных микроволнового фона, содержащих информацию о первичном сигнале CMB. Такой функционал (подробнее см. вариации по Тегмарку и Ифстафиоу [33] (далее как TE)) может быть определен как в пространстве пикселов (как это сделано командой WMAP), так и в пространстве сферических гармоник (Тегмарк и др. [34], далее как TOH), см. также [4,30,35]. Ниже мы будем обсуждать только низкие мультиполи CMB ($\ell \leq 10$) и, в частности, квадруполь, для которого подход ILC в мультипольном пространстве оказывается очень полезным.

Тем не менее, подход ILC в сочетании с методом минимальных вариаций (Minimal Variance Method) (далее как ILCMVM) дает специфическую особенность в получаемом сигнале CMB, известную как байес. Байес напрямую отражает коэффициент кросс-корреляции с фоновыми компонентами и приводит к негауссовости и статистической анизотропии получаемого CMB из-за взаимодействия с фоновыми компонентами. Это происходит из-за того, что MVM исходно разрабатывался для отделения гауссового сигнала, статистические свойства которого полностью определяются вариацией каждой компоненты. В то же время хорошо известно, что MVM не обоснован надлежащим образом, особенно в тех случаях, когда у нас есть только одна, уникальная, реализация случайного процесса, в которой сигнал CMB смешан со значительно негауссовым фоном. Более того, статистика низких мультиполей CMB может рассматриваться как предельно пекулярная, так как у нас нет статистического ансамбля реализаций для ее оценки.

Данная работа посвящена исследованиям байеса карты ILC и ее статистических погрешностей. Мы показываем, что так называемая процедура дебайесинга для карты ILC сигнала CMB содержит в себе потенциальную нестабильность и непредсказуемость для единичной реализации CMB.

Краткая схема статьи: в разделе 2 мы сфокусируем внимание на математическом базисе ILC MVM, в точности таком, каков был предложен в работе [4]. С помощью анализа модели с однородными спектрами фоновых компонент мы показываем, что байес карты ILC и байес спектра мощности будет порядка $K(\ell)$ и $K^2(\ell)$, где $K(\ell)$ — коэффициент истинной кросс-корреляции CMB и фоновых компонент. Следуя работе [26], мы будем называть эту кросс-корреляцию “космической ковариацией”. Из-за статистического происхождения этой корреляции космическая ковариация является неопределенной для каждой единичной реализации сигнала CMB, причем даже для хорошо известных фоновых компонент. В то же время полученный с помощью ILC MVM сигнал ILC CMB и соответствующие фоновые компоненты ILC MVM имеют нулевые кросс-корреляции из-за самого подхода ILC MVM.

В разделе 3 мы исследуем статистические свойства коэффициента кросс-корреляции между случайным гауссовым сигналом CMB и фонами WMAP в полосах K, Ka, Q, V, W. Мы генерируем 10^4 реализаций гауссова сигнала CMB для наиболее подходящей космологической модели ΛCDM по данным WMAP и кросс-коррелируем их с фонами, полученными командой WMAP. Это фоновые компоненты по методу максимальной энтропии (MEM), которые представляют собой сумму синхротронного, свободно-свободного излучений и излучения пыли для каждой частоты. Мы покажем, что функция распределения вероятности для этих кросс-корреляций имеет полиномиальную форму $P(K,\ell) \propto (1-K^2)^{\ell-1}$. После этого мы найдем наиболее вероятные величины коэффициентов $\overline{K}(\ell)$ и $\overline{K}^2(\ell)$. Другими словами, эти коэффициенты определяют наиболее вероятную величину байеса для ILC CMB и для спектра мощности. Учитывая, что карты третьего года — ILC(III) и пятого года — ILC(V) уже исправленыз а байес, как заявила команда WMAP, мы проверили кросс-корреляцию между ILC и фонами WMAP. После дебайесинга эти кросс-корреляции должны показать возможную величину $K(\ell)$ для истинного CMB и для истинного фона. Для полос K–W миссии WMAP соответствующие коэффициенты кросс-корреляции порядка $K \simeq 0.51$. Отметим, что эта величина близка наиболее вероятному значению $\overline{K}(\ell)$ в распределении функции $KP(K, \ell = 2)$.

В разделе 4 мы обсуждаем некоторые особенности квадруполя и октуполя ILC. Как следует из моделирования методом Монте-Карло, проведенного в работе [36] для низких мультиполей $\ell = 2, 3$, знак

мод компонент (2,0), (2,2) и (3,1) изменяется на противоположный для приблизительно 20% выходящих карт CMB. Это значительно меняет морфологию выходящей карты. Мы покажем, что изменение знака имеет место для тех входных квадрупольных данных моделей CMB, для которых знак моды $\ell = 2, m = 0$ противоположен знаку фоновой компоненты. Для гауссова сигнала около 40% реализаций имеют знак $\mathrm{sign}\, c_{2,0} = \mathrm{sign}\, F_{2,0}$, где $c_{2,0}$ и $F_{2,0}$ — компоненты $m = 0$ квадруполя для входных карт CMB и фонов соответственно. Грубо говоря, для 40% этих реализаций восстановление компоненты $\ell = 2, m = 0$ может иметь неправильный знак в моде (2,0). В этом разделе мы дадим аналитическое описание эффекта перемены знака, основанное на свойствах байеса.

Все результаты обобщены в разделе Выводы.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ БАЗИС МЕТОДА ILC MVM

Рассмотрим общий формализм метода ILC в предположении, что у нас есть экспериментальные данные $\Delta T(\theta_p, \phi_p, \nu_i)$ для анизотропии CMB, полученные для некоторой полосы частот ν_1, ν_2.... Здесь θ_p и ϕ_p — стандартные полярный и азимутальный углы сферической координатной системы, а индекс p отмечает соответствующий пиксел. Наблюдаемая температура неба для каждого пиксела p в заданной полосе ν_i — линейная комбинация истинного сигнала CMB — $T_c(p)$ и истинного фона $f_i(p)$. В действительности компоненты фона в различных частотных полосах (большей частью синхротрон, свободно-свободное излучение и пыль) имеют угловые вариации спектральных индексов. Тем не менее, используя различные разъединенные области неба с почти одинаковыми спектрами фонов и низким уровнем пространственных вариаций, мы можем упростить математический аппарат метода ILC [4]. Следуя модели фоновых компонент WMAP, предположим, что для некоторой области неба пространственные вариации излучения фоновых компонент пренебрежимо малы и $f_i(p) = S_i F(p)$, где S_i — частотный спектр, $F(p)$ — пространственное распределение фона для каждой полосы i. Основная идея метода ILC состоит в том, чтобы оценить сигнал CMB, применяя вещественные взвешивающие коэффициенты w_i для каждой области неба с монотонным спектром фона [4]

$$T_{ilc}(p) = \sum_i w_i T_i(p) = T_c(p) + \Gamma F(p), \;\; \sum_i w_i = 1 \tag{1}$$

где $\Gamma = \sum_i w_i S_i$. Коэффициенты w_i могут быть найдены минимизацией вариаций (см. работу [4])

$$\sigma^2_{ilc} = \langle T^2_{ilc}(p)\rangle - \langle T_{ilc}(p)\rangle^2 = \\ = \sigma^2_c + 2\Gamma\sigma_{cF} + \Gamma^2\sigma^2_F. \tag{2}$$

Здесь σ^2_c — вариация истинного CMB, σ^2_F — вариация истинного фона, а $\sigma_{cF} = \langle T_c(p)F(p)\rangle - \langle T_c(p)\rangle(p)\rangle$ — космическая ковариация между истинными CMB и фоном [26].

Угловые скобки в уравнении 2 и далее обозначают усреднение по пикселам, принадлежащим каждой зоне карты с монотонным поведением фоновой компоненты. Минимум вариации σ^2_{ilc} может быть легко найден из уравнения $\frac{d\sigma^2_{ilc}}{dw_i} = 0$, из которого мы получаем [4]

$$T_{ilc}(p) = T_c(p) - \frac{\sigma_{cF}}{\sigma^2_F}F(p), \;\; \sigma^2_{ilc} = \sigma^2_c - \frac{\sigma^2_{cF}}{\sigma^2_F}. \tag{3}$$

Определим коэффициент кросс-корреляции между истинным сигналом CMB и истинной фоновой компонентой в пиксельном пространстве как

$$\kappa = \frac{\sigma_{cF}}{\sigma_c\sigma_F}. \tag{4}$$

Тогда после подстановки уравнения 4 в уравнение 3 мы имеем [26]

$$T_{ilc}(p) = T_c(p) - \kappa\frac{\sigma_c}{\sigma_F}F(p), \;\; \sigma^2_{ilc} = \sigma^2_{ilc}(1-\kappa^2). \tag{5}$$

Как видно из уравнения 5, температура в пикселе $T_{ilc}(p)$ и вариация σ^2_{ilc} получаются с байесом. Разность $T_{ilc}(p) - T_c(p)$ пропорциональна κ и может быть как положительной, так и отрицательной. Для вариации σ^2_{ilc}, байес всегда отрицательный и пропорционален $1-\kappa^2$. Существование такого байеса не удивительно. Смещение вариации ILC и соответствующего спектра мощности обсуждается в [4,26,27,29]. Тем не менее, важно заметить, что байес вариации и спектра мощности определяется космической ковариацией, которая остается неизвестной для каждой единичной реализации сигнала CMB на небе. Это и есть причина, по которой карта не может быть исправлена какими-либо методами из-за статистической погрешности.

Описанный выше подход ILC в пространстве пикселов может быть легко обобщен для пространства мультиполей путем разложения по сферическим гармоникам: $\Delta T(\theta, \phi, \nu_i) \to a^{\nu_i}_{\ell,m}$:

$$\Delta T(\theta, \varphi, \nu_j) = \sum_{\ell=0}^{\infty}\sum_{m=-\ell}^{\ell} |a^{\nu_i}_{\ell,m}| e^{i\phi_{\ell,m}} Y_{\ell m}(\theta, \varphi), \tag{6}$$

Таблица 1. Коэффициенты $K(\ell)$ для фоновых компонет V–W, Ka–V, Ka–W и Q–V, полученных с помощью MEM. Первая колонка показывает номер мультиполя ℓ.

$K(\ell)$	$V-W$	$Ka-V$	$Ka-W$	$Q-V$
2	0.999969	0.999014	0.998761	0.999481
3	0.994699	0.999534	0.995187	0.999770
4	0.996702	0.999497	0.996098	0.999708
5	0.994615	0.998862	0.995825	0.999647
6	0.995481	0.999354	0.993799	0.999563
7	0.993245	0.998620	0.995323	0.999506
8	0.994281	0.999252	0.993458	0.999575
9	0.993532	0.998781	0.994617	0.999571
10	0.994638	0.999068	0.993319	0.999463

где $a_{\ell m}$ и $\phi_{\ell,m}$ — модули и фазы коэффициентов разложения. Прямое преобразование уравнения 5 в мультипольные коэффициенты дает

$$\overline{c}^{ilc}_{\ell,m} = c_{\ell,m} - \kappa \frac{\sigma_c}{\sigma_F} F_{\ell,m}. \qquad (7)$$

Легко показать, что это решение для извлекаемого сигнала ILC $\overline{c}^{ilc}_{\ell,m}$ может быть получено минимизацией вариаций

$$\sigma^2 = \sum_{\ell} \frac{2\ell+1}{4\pi} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |\sum_j w_j a^j_{\ell,m}|^2. \qquad (8)$$

Более того, следуя подходу TOH, мы можем определить ILC CMB в мультипольном пространстве, используя взвешивающие коэффициенты $W_i(\ell) \times \sum_i W_i(\ell) = 1$, и, минимизируя спектр мощности для каждого мультиполя $C(\ell) = \sum_m |W_i(\ell) a^{(i)}_{\ell,m}|^2$. Для модели однородных спектров фоновых компонент этот подход приводит к выражению

$$c^{ilc}_{\ell,m} = c_{\ell,m} - K(\ell) \frac{(\sum_{m=-\ell}^{\ell} |\overline{c}_{\ell,m}|^2)^{\frac{1}{2}}}{\left(\sum_{m=-\ell}^{\ell} |F^{(2)}_{\ell,m}|^2\right)^{\frac{1}{2}}} F^{(2)}_{\ell,m}, \qquad (9)$$

где $K(\ell)$ — коэффициент кросс-корреляции между ILC CMB и фоном для мультиполя ℓ:

$$K(\ell) = \frac{\sum_m \left(c^{ilc}_{\ell,m} F^*_{\ell,m} + (c^{ilc})^*_{\ell,m} F_{\ell,m}\right)}{2\left[\sum_m |c^{ilc}_{\ell,m}|^2 \sum_m |F_{\ell,m}|^2\right]^{\frac{1}{2}}}. \qquad (10)$$

Учитывая уравнения (9) и (10), можно получить

$$C^{ilc}(\ell) = C_c(\ell)[1 - K^2(\ell)]. \qquad (11)$$

Перед дальнейшим анализом рассмотрим применимость модели однородных спектров фоновых компонент, полученных командой WMAP методом MEM в полосах K–W. Для этих фонов (суммы синхротрона, свободно-свободного излучения и излучения пыли в каждой полосе частот) коэффициент кросс-корреляции между ними определяется таким же образом, как в уравнении (10) с подстановкой $F^{(j)}_{\ell,m}, F^{(k)}_{\ell,m}$ для $c^{ilc}_{\ell,m}, F_{\ell,m}$ в уравнение 9.

В таблице 1 мы приводим коэффициенты кросс-корреляции для различных комбинаций фонов, выделенных командой WMAP с помощью MEM. Можно видеть, что соответствующие коэффициенты кросс-корреляции между различными фонами очень близки к единице. Таким образом, модель однородных спектров фоновых компонент является очень хорошо мотивированной. Как следует из уравнений (9) и (11), соответствующий байес коэффициентов ILC $c^{ilc}_{\ell,m}$ пропорционален $K(\ell)$, в то время как байес спектра мощности — порядка $K^2(\ell)$. Так как истинный CMB представляется как случайный (гауссовый) процесс, коэффициент кросс-корреляции $K(\ell)$ также описывается случайным (негауссовым) процессом. Таким образом, для каждой реализации CMB на небе, коэффициент кросс-корреляции $K(\ell)$ остается неопределенным. Заметим, что команда WMAP [27], чтобы скорректировать мощность сигнала CMB, полученного методом ILC, рассматривала $10^2 - 10^4$ реализаций случайного гауссового CMB, создавая статистический ансамбль реализаций. Тем не менее, даже после осреднения реализаций мы не можем предсказать байес одиночной реализации CMB из-за космической ковариации. Более того, как видно из уравнений (9) и (11), осреднение сигнала CMB методом ILC для ансамбля реализаций уменьшает байесовский фактор $\langle K \rangle$ до нуля, в то время как $\langle K^2 \rangle \neq 0$. Таким образом, для ансамбля реализаций коррекция мощности CMB может быть про-

ведена успешно, в то время как коррекция самого сигнала кажется весьма проблематичной.

Еще одна проблема связана со статистическими свойствами истинного сигнала CMB. Хорошо известно, что низкие мультиполи ($\ell \leq 10$) CMB в картах WMAP значительно отклоняются от статистической изотропности и однородности [36,37]. Если этот эффект является проявлением первичной негауссовости CMB, то мы просто не можем скорректировать модель с помощью статистического ансамбля реализаций. Это замечание еще сильнее высвечивает проблему нестабильности восстановления низких мультиполей сигнала CMB.

Не имея возможности дать общее решение упомянутой проблемы, мы могли бы предложить непрямой метод определения байеса в пространстве изображений и спектров, отслеживая коэффициент кросс-корреляции $K(\ell)$ в производных картах сигнала CMB и фоновых компонент, выделенных методом MEM, включая синхротронные карты Хаслама и др. (1982) [38] (далее HA). Эта идея базируется на том факте, что в уравнении (5) кросс-корреляция ILC и фона точно равна нулю. Таким образом, если в результате применения некоторых методов дебайесинга карты ILC мы получим $K \neq 0$, это могло бы быть использовано с разумной точностью для оценки исходного коэффициента космической ковариации κ. В следующем разделе мы обсудим этот подход подробнее.

3. КРОСС-КОРРЕЛЯЦИИ ILC(I) И ILC(III) С ФОНОВЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Как показала команда WMAP [4], коррекция CMB методом ILC может быть проведена с использованием дополнительной информации о фоновых компонентах и 100 реализациях случайного гауссова сигнала CMB, который скрыт в комбинации данных MEM-фона и карт WMAP в полосах K–W. Повторив метод ILC MVM для каждой из этих 100 реализаций, команда WMAP рассмотрела некоторую систематику метода ILC и внесла соответствующую коррекцию в карты ILC(III) и ILC(V).

Важно отметить, как указано в работе [4], что разность между ILC(III) и ILC(I) в основном обусловлена байесом. На рис. 1 мы показываем квадрупольную и октупольную компоненты карт первого и третьего года — ILC(I) и ILC(III) соответственно и разности между ними, чтобы проиллюстрировать коррекцию байеса, проведенную командой WMAP для низких мультиполей сигнала.

Рассмотрим кросс-корреляцию карт ILC(I) и ILC(III) с фоновыми компонентами, выделенными с помощью MEM (являющимися суммой синхротронного, свободно-свободного излучений и излучения пыли). На рис. 2 мы показываем коэффициент кросс-корреляции ILC и фона $K(\ell)$ для мультиполей $\ell = 210$ и для MEM–фона полос K-W данных WMAP[1]. Мы также показываем $K_j(\ell)$ для ILC(I), ILC(III) и синхротронных карт Хаслама и др. [38]. На этом рисунке можно увидеть, что квадруполь ($\ell = 2$) и мультиполь $\ell = 5$ из ILC(III) имеют отрицательную корреляцию ($K \sim 0.5$) с фонами полос Ka–W. Более того, квадруполь ILC(III) имеет $K \sim 0.6$ с данными квадруполя HA.

3.1. Статистические свойства байеса

Чтобы понять свойства кросс-корреляции "ILC(III)—фоновые компоненты", мы провели численный тест, рассмотрев 10000 реализаций случайных гауссовых карт CMB, и, проведя для них кросс-корреляции с такими же моделями фоновых компонент, как на рис. 2 без дебайесинга.

На рис. 3 мы показываем функцию плотности вероятности $P(K_j(\ell))$ в зависимости от $K_j(\ell)$ для мультиполей $\ell = 210$.

Для входного случайного гауссового сигнала CMB форма функций распределения с хорошей точностью описывается функцией

$$P(K,\ell) = A_\ell (1 - K^2)^{\ell - 1}, \qquad (12)$$

где A_ℓ — нормализационная константа. Используя $P(K,\ell)$ для входного сигнала, показанного на рис. 3 (сверху слева), мы нашли первый $\langle K \rangle = 0.00043$ и второй $\langle K^2 \rangle = 0.19934$ моменты для $P(K, \ell = 2)$, что находится в согласии с соответствующим значением $\langle K^2 \rangle = 0.2$ из уравнения (12).

В конце этого раздела представим функцию распределения первого и второго моментов для коэффициентов кросс-корреляции между случайными гауссовыми реализациями сигнала CMB и фоновой компонентой. Эти моменты определяют байес сигнала ILC и спектра мощности. Неудивительно, что первый ($KP(K)$) и второй ($K^2P(K)$) моменты, показанные на рис. 4, имеют два экстремума, которые легко оцениваются из уравнения (12):

$$K_{\pm}^{n,\ell} = \pm \left(\frac{n}{2(\ell - 1) + n} \right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (13)$$

где n — порядок момента $K^n P(K)$, и ℓ — номер мультиполя. Для $\ell = 2$ мы имеем $K^{1,2} = \pm 0.577$

[1] Для ILC(I) мыиспользуем MEM-фоны из данных первого года WMAP.

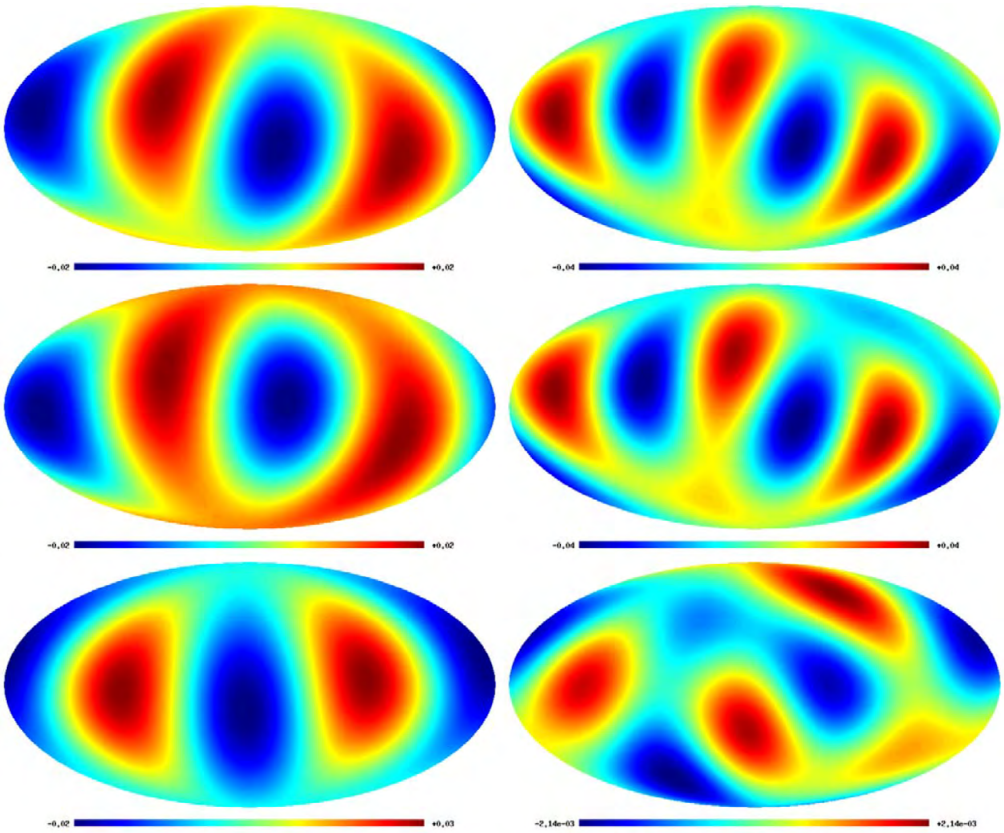


Рис. 1. Квадрупольная компонента карты ILC(I) (верхняя левая), квадрупольная компонента ILC(III) (средняя левая) и разница между ними (нижняя левая). Справа — то же для октуполя карт ILC(I), ILC(III) и их разности.

и $K^{2,2} = \pm 0.707$. Этот результат ясно показывает, что знак коэффициента κ фиксирован, и наиболее вероятные значения K — это $K^{1,2}$, а наиболее вероятные значения K^2 — это $K^{2,2}$. Нижний график на рис. 4 показывает величину моментов $M(n) = \langle K^n P(K, \ell)\rangle$ для ансамбля реализаций случайного гауссового процесса. Для второго момента $n = 2$ форма функции $M(n)$ будет $(2\ell + 1)^1$ в соответствии с оценкой [27] для байеса спектра мощности. Из уравнения (13) можно найти наиболее вероятное значение K^2 для квадрупольной компоненты: $K^2_{\rm prob} = 0.5$. Это говорит о том, что наиболее вероятная величина множителя $1 - K^2_{\rm prob}$ есть 0.5, тогда из уравнения (11) мы получаем $C_c(\ell = 2) = 2C_{ilc}(\ell = 2)$. В то же время наиболее вероятная величина байеса ILC CMB определяется параметром $\kappa = K^{1,2} = \pm 0.577$. Можно видеть, что эта величина близка к коэффициенту корреляции ILC(III) и фона.

4. ПЕКУЛЯРНОСТИ КВАДРУПОЛЯ И ОКТУПОЛЯ

В дополнение к кросс-корреляциям с фоновыми компонентами мы обнаружили еще одну особенность метода ILC, которая может иметь значительное влияние на решение проблемы квадруполя ILC(III) [39]. Мы называем это переменностью знака (флип-эффект) компоненты (2,0) в квадруполе ILC по отношению к знаку квадруполя компоненты (2,0) истинного CMB. Чтобы оценить численно этот эффект, вернемся к уравнениям (9) и (10) для квадрупольной компоненты $\ell = 2$ и рассмотрим моду $(2,m = 0)$:

$$|c^{ilc}_{2,0}|\cos(\xi_{2,0}) = |c_{2,0}|\cos(\eta_{2,0}) - \kappa\left[\frac{\sigma_c}{\sigma_F}\right]^{\frac{1}{2}}|F_{2,0}|\cos(\phi_{2,0}), \quad (14)$$

где $|..|$ обозначает модуль, $\xi_{2,0}$, $\eta_{2,0}$ и $\phi_{2,0}$ — фазы компоненты (2 ,0) квадруполя ILC, ис-

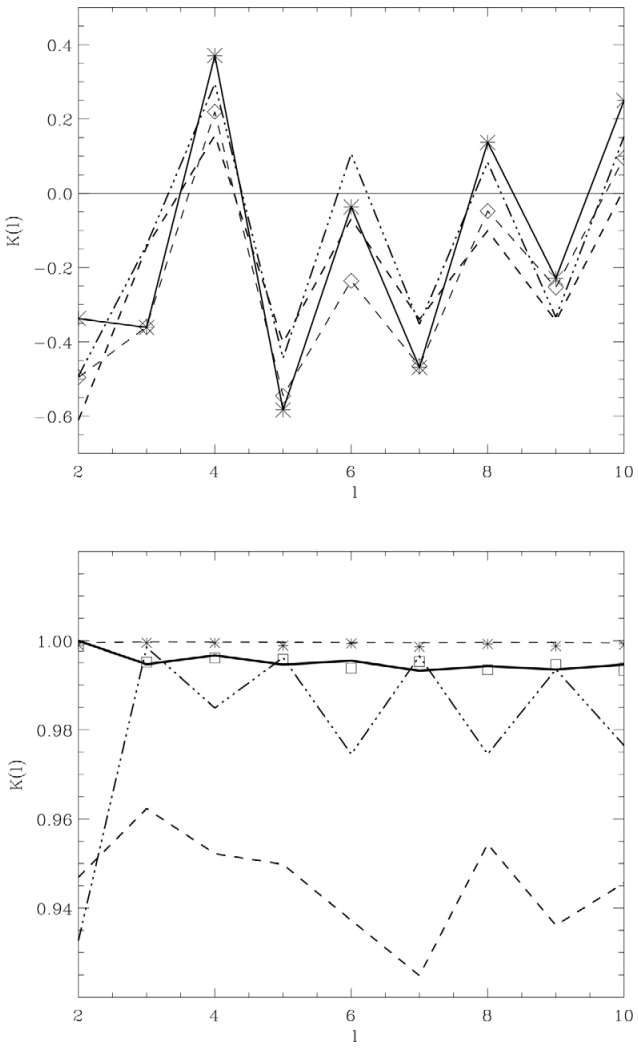


Рис. 2. Вверху — коэффициент кросс-корреляции ILC(I) и ILC(III) с фоновыми компонентами. Штриховая линия—для карты ILC (III) и HA, тройная штрих-пунктирная линия – для ILC(I) и HA, жирная сплошная линия со звездочками — для ILC(I) и V–полосы MEM-фона. Штриховая линия с ромбами — для ILC(III) и V-полосы MEM-фона. Внизу — коэффициенты кросс-корреляции между V и W фонами WMAP (жирная сплошная линия), между V и HA (пунктирная линия) и ILC(I) и ILC(III) (тройная штрихпунктирная линия). Штриховая линия — для полос Q и V, звездочки — для полос Ka–V, квадраты — для фонов Q–V.

тинного квадруполя и фона соответственно. Так как мода $m = 0$ имеет только вещественную часть, эти фазы просто означают знак компоненты (2,0). Для нашего будущего анализа важно заметить, что для всех фоновых компонент в полосах $K - W|F_{2,0}| \gg |F_{2,1}|, |F_{2,2}|$ и $\phi_{2,0} = \pi$. Учитывая уравнение (10), можно легко найти, что

$$\kappa \simeq -\frac{|c_{2,0}||F_{2,0}|\cos(\eta_{2,0})}{\sigma_c \sigma_F}(1-\varepsilon),$$

$$\varepsilon = \frac{2\sum_{m=1}^{2}|c_{2,m}||F_{2,m}|\cos(\eta_{2,m}-\phi_{2,m})}{\cos(\eta_{2,0})|c_{2,0}||F_{2,0}|}. \qquad (15)$$

где $\eta_{2,m}, \phi_{2,m}$ — фазы истинного CMB и фона квадрупольных компонент $m = 1$ и $m = 2$. Таким образом, после подстановки κ из уравнения (15) в уравнение (14) мы получаем формулу (16), с помощью которой рассчитаны данные, приведенные в

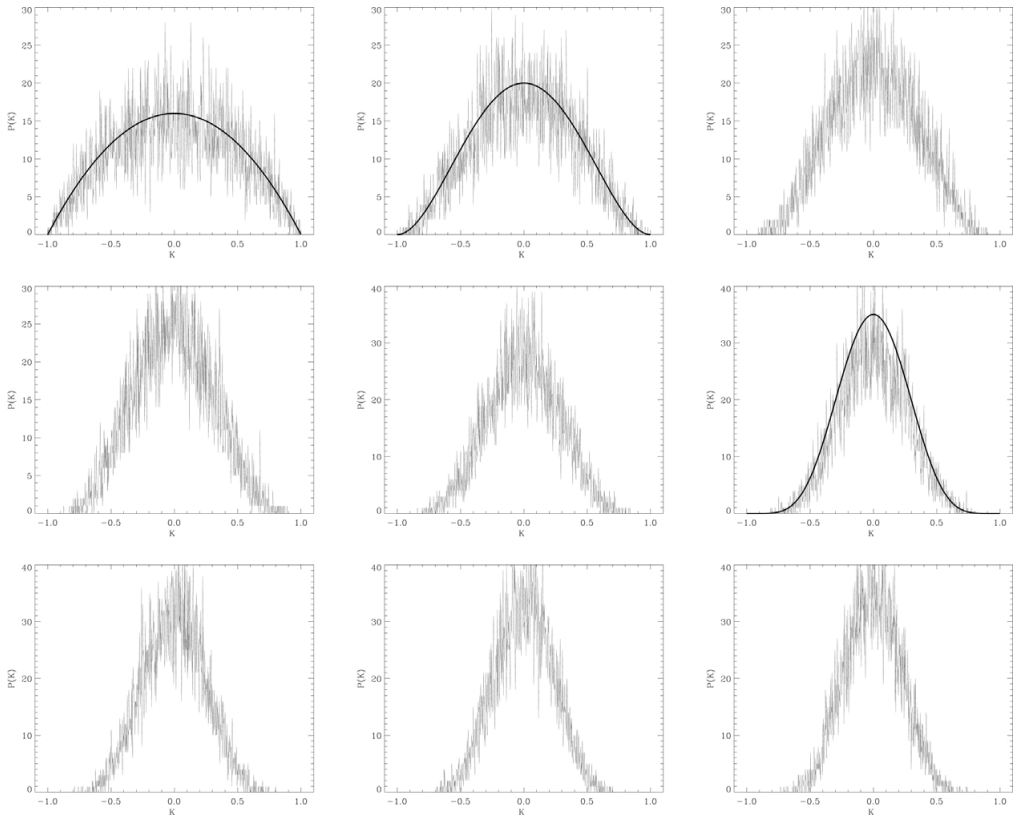


Рис. 3. Распределение функции $P(K)$ для кросс-корреляции между случайным CMB и фоном в V–полосе (слева). Слева направо и сверху вниз показаны данные для мультиполей $\ell = 2, 3..10$. Форма $P(K)$ такая же для любого фона в полосах K–W, включая и данные HA.

таблице 2:

$$|c_{2,0}^{ilc}| \cos(\xi_{2,0}) = |c_{2,0}| \cos(\eta_{2,0}) \frac{\mu + \epsilon}{1 + \mu}, \qquad (16)$$

где $\mu = (|F_{2,1}|^2 + |F_{2,2}|^2)/|F_{2,0}|^2 \ll 1$. Из уравнения (16) следует, что если $\epsilon \ll \mu$, тогда $\xi_{2,0} = \eta_{2,0}$ и $|c_{2,0}^{ilc}| = \mu |c_{2,0}| \ll |c_{2,0}|$. Таким образом, мода $|c_{2,0}^{ilc}|$ в карте ILC меньше, чем соответствующая $|c_{2,0}|$, примерно в μ раз. Если $\epsilon \gg \mu$, то мы имеем

$$|c_{2,0}^{ilc}| \cos(\xi_{2,0}) \simeq 2 \frac{\sum_{m=1}^{2} |c_{2,m}||F_{2,m}| \cos(\eta_{2,m} - \phi_{2,m})}{|F_{2,0}|}, \qquad (17)$$

и фаза $cos(\xi_{2,0})$ определяется знаком знаменателя в уравнении (17). Этот результат говорит нам о том, что для ряда реализаций случайного CMB, знак входного сигнала не имеет значения. Восстановленная фаза ILC $\xi_{2,0}$ может быть такая же, как $(\eta_{2,0})$, или противоположна фазе $\eta_{2,0} \pm \pi$ истинного CMB.

Чтобы показать, что этот эффект присутствует в численном моделировании метода ILC, мы рассмотрели 10000 реализаций входных и выходных карт для квадрупольной компоненты $c_{2,0}$, приведенной в работе [36]. Как показано в [4], разница между подходами WMAP и Эриксена и др. [36] в полученных картах CMB вызвана скорее различным выбором раздельных областей в Галактической плоскости, нежели различным байесом. Используя оценку $S = s_{2,0}^{\rm in} \times s_{2,0}^{\rm out} = \cos \eta_{2,0}^{\rm in} \times \cos \xi_{2,0}^{\rm out}$, где $s_{2,0}^{\rm in,out} = +1$ или 1 для положительного и отрицательного знака компонент $c_{2,0}^{\rm in,out}$ соответственно, мы нашли, что для 2148 реализаций $S = 1$. Более того, так как фоны $s_{2,0}^{f} = 1$ для всех полос K–W данных WMAP, практически 43% реализаций, имеющих $s_{2,0}^{\rm in} = 1$, после применения метода ILC изменяют знак и $s_{2,0}^{\rm out} = 1$ (флип-эффект). Мы расширяем наш анализ на октупольную компоненту ансамбля входных и выходных сигналов [36] и обнаруживаем, что данный эффект также имеет место, но число событий слегка меньше, чем для

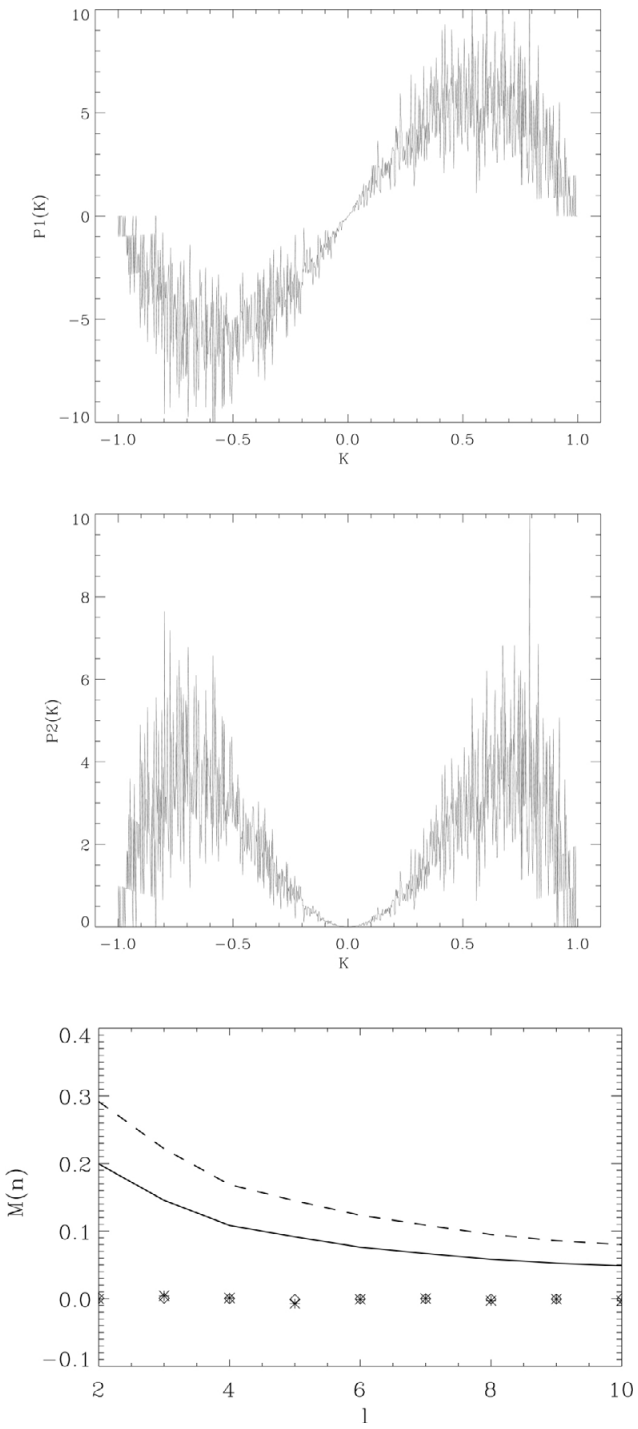


Рис. 4. Функции распределения $P1(K) = KP(K)$ (сверху) и $P2(K) = K^2P(K)$ (посередине) для кросс-корреляции между случайными реализациями сигнала CMB и фоном в полосе V. Нижний график показывает распределение $\langle K^n(\ell)\rangle$ для $\ell = 2-10$. Сплошная линия соответствует $\langle K^2(\ell)\rangle$, штриховая линия — $\langle K^4(\ell)\rangle^{\frac{1}{2}}$, звездочки — $\langle K(\ell)\rangle$, ромбики — $\langle K^3(\ell)\rangle$.

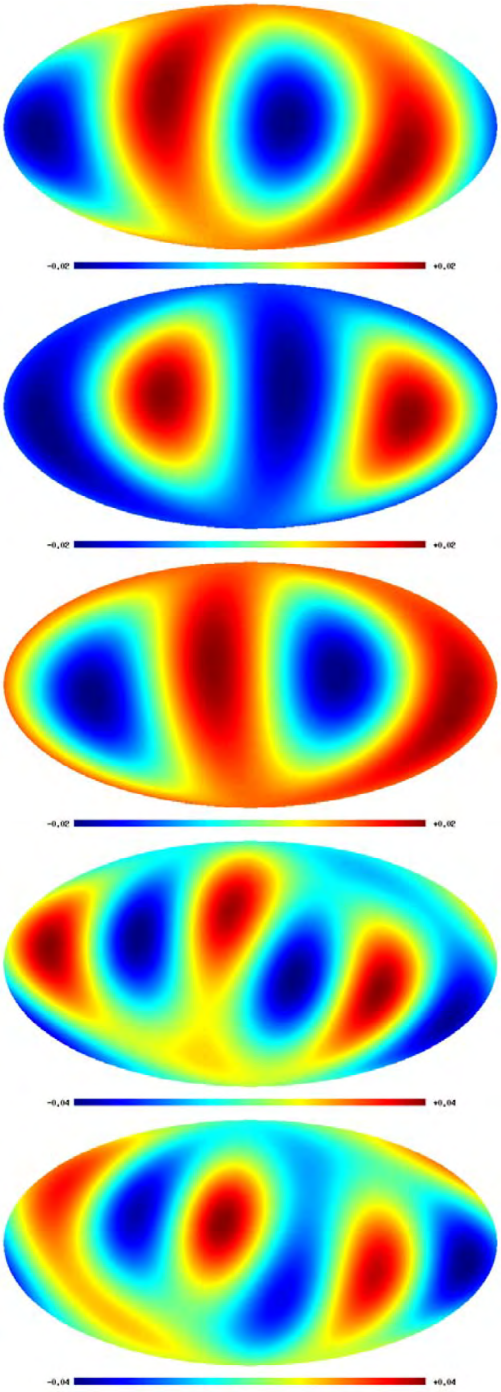


Рис. 5. Иллюстрация флип-эффекта для квадруполя и октуполя ILC(III). Сверху вниз: квадруполь ILC(III), квадруполь ILC(III) с флип-эффектом компоненты (2, 0), квадруполь с флип-эффектом компоненты (2, 2). Октуполь ILC(III) и он же с флип-эффектом компоненты (3, 1).

Таблица 2. Число гармоник, имеющих S–коэффициенты, равные 1, из 10000 реализаций входных и выходных карт. Верхний ряд содержит данные для квадрупольной компоненты, нижний — для октупольной. $\Re$ и $\Im$ обозначают вещественную и мнимые части коэффициентов $a_{\ell,m}$ разложения по сферическим гармоникам.

$\ell = 2$	2,0	$\Re$(2,1)	$\Im$(2,1)	$\Re$(2,2)	$\Im$(2,2)	-	-
$S = -1$	2148	361	55	1756	257	-	-
$\ell = 3$	(3,0)	$\Re$(3,1)	$\Im$(3,1)	$\Re$(3,2)	$\Im$(3,2)	$\Re$(3,3)	$\Im$(3,3)
$S = -1$	232	1852	337	106	367	533	355

квадрупольной компоненты.

В таблице 2 мы приводим число событий для $S = 1$, где входная и выходная компоненты квадруполя и октуполя имеют различный знак.

Там же (табл. 2) можно увидеть, что для компонент (2,0) и (3,1) число событий с $S = 1$ достигает максимума (соответственно 2148 и 1852 событий). Чтобы показать, что изменение знака компоненты (2,0) может влиять на увеличение кросс-корреляции между CMB и фоном, мы возьмем одну из реализаций из входных карт Эриксена и др. [36], например, с именем "in–00008", и рассчитаем коэффициент $K^{\rm in}(\ell = 2)$ для этой карты и синхротронной карты Хаслама [38]. У нас $K^{\rm in}(\ell = 2) = 0.222$. Для входной карты $c^{\rm in}_{2,0} = 9.944\mu K$. Для выходной карты CMB, именуемой "out–00008", $c^{\rm out}_{2,0} = 11.457\mu K$ и $K^{out}(\ell = 2) = 0.522$. Затем мы меняем знак компоненты $c^{\rm out}_{2,0}$ и пересчитываем снова коэффициент кросс-корреляции. Мы имеем $K^{\rm out}(\ell = 2) = 0.2466$, что практически является той же величиной, что и во входящей карте. Этот пример ясно демонстрирует, что для тех входных реализаций, для которых мода $c^{\rm in}_{2,0}$ отрицательна, эта компонента сигнала наиболее вероятно восстанавливается с противоположным знаком, увеличивая отрицательный уровень коэффициентов кросс-корреляции $K^{\rm out}(\ell = 2)$, т.е. величина коэффициентов K зависит от перемены знака компоненты (2,0).

Чтобы показать соответствующие изменения изображений квадруполя и октуполя, обусловленные флип-эффектом, мы приводим на рис. 5 квадруполь и октуполь ILC(III) с различным знаком для компонент (2,0), (2,2) и (3,1). Как можно видеть, флип-эффект значительно меняет морфологию карт. Это — обычное явление, так как все четные моды $\ell + m$ — наиболее мощные компоненты в сигнале ILC(III).

5. ВЫВОДЫ

Мы исследовали кросс-корреляцию карт ILC(I) и ILC(III) с фоновыми компонентами, полученными с помощью MEM по данным WMAP, и показали, что эти корреляции тесно связаны с байесом сигнала CMB, восстанавливаемого методом ILC. Используя модели Монте-Карло, мы нашли функцию распределения вероятности для коэффициента кросс-корреляции между истинным CMB и сигналом фона. Для дебайесинга CMB в карте ILC нам необходимо знать точное значение коэффициента $K(\ell)$. Так как метод ILCMVM не дает дополнительной информации о байесе, всякие предположения о свойствах фона должны оставить соответствующие искажения в сигнале ILC после дебайесинга и на его спектре мощности (см. для сравнения [4, 27, 29]). Эти неопределенности отражают напрямую наше незнание точного значения реализации случайного процесса $K(\ell)$, делая восстановление сигнала CMB неустойчивым.

Есть и другая причина неустойчивости восстановления квадруполя и октуполя CMB, имеющая отношение к байесу "CMB – фон". Мы обнаружили, что изменение знака происходит для четных мод $\ell + m$ (у компонент (2,0) и (2,2) квадруполя и моды (3,1) октуполя). Соответствующая вероятность эффекта около 20% (см. таблицу 1). Этот эффект может иметь значительное влияние на процедуру дебайесинга.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны NASA за возможность использования открытого архива (NASA Legacy Archive) и предоставление данных VMAP. Мы также признательны авторам пакета HEALPIX [40], используемого для расчета коэффициентов $a_{\ell m}$ из данных VMAP. Пакет GLESP[2] [41, 42] применялся для дальнейшего анализа данных. OBB благодарит РФФИ за частичную поддержку грантом № 08-02-00159.

[2] http://www.glesp.nbi.dk

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0302208.
3. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 135 (2003).
4. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
5. D. N. Spergel, R. Bean, O. Dore, et al. Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 377 (2007), astro-ph/0603449.
6. G. Hinshaw et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted, (2008), arXiv:0803.0732.
7. E. Komatsu et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted, (2008), arXiv:0803.0547.
8. J. Weeks, J.-P. Luminet, A. Riazuelo, and R. Lehoucq, Mon. Not. R. Astron. Soc. **352**, 258 (2004), astro-ph/0312312.
9. R. Aurich, S. Lustig, F. Steiner, and H. Then, Classical Quantum Gravity **21**, 4901 (2004), astro-ph/0403597.
10. M. Bridges, A. N. Lasenby, and M. P. Hobson, Mon. Not. R. Astron. Soc. **381**, 68 (2007), astro-ph/0607404.
11. R. Bean, A. Melchiorri, and J. Silk, Phys. Rev. D **75**, 063505 (2007), astro-ph/0701224.
12. G. Chen, P. Mukherjee, T. Kahniashvili, et al., Astrophys. J. **611**, 655 (2004).
13. R. Durrer, New Astron. Rev. **51**, 275 (2007), astro-ph/0609216.
14. P. D. Naselsky, L.-Y. Chiang, P. Olesen, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **615**, 45 (2004), astro-ph/0310601.
15. T. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., Astrophys. J. **629**, L1 (2005), astro-ph/0503213.
16. T. Jaffe, S. Hervik, A. J. Banday, and K. M. Górski, Astrophys. J. **644**, 701 (2006), astro-ph/0512433.
17. J. D. McEwen, M. P. Hobson, A. N. Lasenby, and D. J. Mortlock, Mon. Not. R. Astron. Soc. **359**, 1583 (2005), astro-ph/0406604.
18. J. D. McEwen, M. P. Hobson, A. N. Lasenby, and D. J. Mortlock, Mon. Not. R. Astron. Soc. **371**, L50 (2006), astro-ph/0604305.
19. C. Gordon, W. Hu, D. Huterer, and T. Crawford, Phys. Rev. D **72**, 103002 (2005), astro-ph/0509301.
20. C. J. Copi, D. Huterer, and G. D. Starkman, Phys. Rev. D **70**, 043515 (2004), astro-ph/0310511.
21. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. Starkman, Phys. Rev. D **75**, 023507 (2007), astro-ph/0605135.
22. D. J. Schwarz, G. D. Starkman, D. Huterer, and C. J. Copi, Phys. Rev. Lett. **93**, 221301 (2004), astro-ph/0403353.
23. K. Land and J. Magueijo, Phys. Rev. Lett. **95**, 071301 (2005), astro-ph/0502237.
24. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **599**, L53 (2003), astro-ph/0310542.
25. H. K. Eriksen, D. I. Novikov, P. B. Lilje, et al., Astrophys. J. **612**, 64 (2004).
26. L.-Y. Chiang, P. Coles, P. D. Naselsky, and P. Olesen, J. Cosmo. Astro. Par. **7**, 21 (2007), astro-ph/0608421.
27. R. Saha, S. Prunet, P. Jain, and T. Souradeep, Astrophys. J., submitted, (2007), arXiv:0706.3567.
28. M. Cruz, L. Cayon, E. Martinez-Gonzalez, et al., Astrophys. J. **655**, 11 (2007), astro-ph/0603859.
29. C.-G. Park, C. Park, and J. R. Gott III, Astrophys. J. **660**, 959 (2006), astro-ph/0608129.
30. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
31. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Int. J. Mod. Phys. D **17**, 179 (2008), astro-ph/0609409.
32. A. Gruppuso, C. Burigana, and F. Finelli, Mon. Not. R. Astron. Soc. **376**, 907 (2007), astro-ph/0701295.
33. M. Tegmark and G. Efstathiou, Mon. Not. R. Astron. Soc. **281**, 1297 (1996).
34. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, Phys. Rev. D **68**, 123523 (2003), astro-ph/03022496.
35. F. K. Hansen, P. Cabella, and D. Marinucci, Astrophys. J. **607**, L67 (2004), astro-ph/0402396.
36. H. K. Eriksen, F. K. Hansen, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **605**, 14 (2004), astro-ph/0307507.
37. H. K. Eriksen, A. J. Banday, K. M. Górski, et al., Astrophys. J. **660**, L81, (2007), astro-ph/0701089.
38. C. G. T. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel, and W. E. Wilson, Astron. Astrophys. **47**, 1 (1982).
39. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **62**, 218 (2007).
40. K. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **622**, 759 (2005).
41. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
42. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КАРТ NVSS ОБЗОРА И WMAP ILC*

О. В. Верходанов[1], М. Л. Хабибуллина[1], Е. К. Майорова[1], Ю. Н. Парийский[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

В данной статье рассматриваются одномерные сечения карт WMAPILC и распределения радиоисточников обзора NVSS на масштабах 0.75, 3, 4.5, 6.75 градусов. Исследуются корреляционные свойства этих сечений. В картах выделены области, где абсолютная величина коэффициента корреляции превышает 0.5. Представлен каталог этихо бластей. Показано, что их количество соответствует модельным картам, что может свидетельствовать о простом статистическом совпадении расположения этих зон.

Ключевые слова: теоретическая и наблюдательная космология

1. ВВЕДЕНИЕ

С появлением данных высокоточных радиоастрономических обзоров в миллиметровом, сантиметровом, дециметровом диапазонах длин волн стало возможным применение корреляционных исследований для проверки согласованной космологической модели. Прорывом в данном подходе явилось открытие доступа к данным эксперимента по измерению микроволнового фона (CMB), проводимого с помощью спутника WMAP[1]) (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), одного года, трех и пяти лет накопления сигнала на полной небесной сфере [1–7]. Для восстановления сигнала CMB из многочастотных наблюдений в этих работах применялся метод внутренней линейной комбинации (ILC — Internal Linear Combination) фоновых компонент [1], в результате которого была получена карта реликтового излучения, также называемая картой ILC и используемая для анализа низких гармоник с номерами мультиполей $\ell \leq 100$. Для построения карты ILC использовались наблюдения в пяти каналах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W).

Достаточно много работ было посвящено исследованию статистических свойств сигнала в представленной карте ILC и обсуждению негауссовости данных этой карты, обнаруженной различными методами, включающими фазовый анализ [8–11], максвеловские мультипольные вектора [12,13], вейвлеты [14–17], функционалы Минковского [18, 19].

Среди негауссовых особенностей активно обсуждается так называемое Холодное Пятно (далее CS — Cold Spot) размером порядка 10° с галактическими координатами ($l = 209°, b = 57°$), обнаруженное в распределении микроволнового фона в южной полусфере. CS, статистически выделяемое в распределении CMB, является одной из особенностей карт, противоречащих гипотезе однородных гауссовых флуктуаций фона. Изначально оно было отмечено как отклоняющееся от гауссовой статистики при применении вейвлет-анализа [14, 16, 17, 20] в данных первого и третьего года наблюдений миссии WMAP.

Позднее в области CS было обнаружено понижение пространственной плотности радиоисточников в картах NVSS [21], что позволило сделать предположение о существовании гигантского войда размером около 140 Мпк на красном смещении $z < 1$, вызывающего гравитационную аномалию, приводящую к интегральному эффекту Сакса-Вольфа [22] и проявляющуюся как CS. Кроме того, рассматривались возможности объяснения пятна эффектом Сюняева-Зельдовича [23], вызванным рассеянием в супергруппе галактик в созвездии Эридана [16, 24].

Предложены и экзотические объяснения эффекта, такие как текстура — топологический дефект во время фазового перехода в ранней Вселенной [24, 26] или анизотропная космологическая модель Бьянки VII_h [27].

В то же время были приведены серьезные аргументы, говорящие о том, что в данной карте на различных угловых масштабах присутствует остаточный вклад галактических фоновых компонент, ко-

*Астрофизический бюллетель. 2008. 63(4). С. 389

[1]`http://lambda.gsfc.nasa.gov`

торый и дает обнаруживаемую негауссовость. Этот вклад может проявляться в обнаруженной ранее связи в квадруполе между очищенной картой микроволнового фона и галактическими компонентами излучения [28, 29] и, кроме того, определять свойства низких мультиполей $\ell \leq 20$, приводя к неустойчивому их восстановлению [30]. В частности, влиянием этих мультиполей могут быть объяснены особенности CS, демонстрирующие отклонение статистики кластеров пиков колебаний сигнала на карте вокруг пятна [31] — увеличение числа положительных пиков. Независимое изучение свойств пятна, обнаруженного в области с близкими координатами на картах и подсчетах радиоисточников в обзоре NVSS [32], показало, что исследуемое Холодное Пятно, гигантские размеры и существование которого трудно объяснить в рамках космологической ΛCDM-модели, может быть простым статистическим отклонением, вызванным систематическими эффектами [33].

В данной работе мы решили проверить корреляционные свойства карт NVSS и ILC на масштабах 0.75, 3, 4.75, 6.75 и 9.75 градусов и постараться обнаружить и исследовать пятна типа CS. Размер масштабов выбирался значительно бóльшим, чем размер окна сглаживания карты ILC (1°), но меньшим 10°, чтобы сохранить достаточное число пикселов для статистического анализа. Также для статистического анализа мы добавили субградусный масштаб ($45' = 0.75°$). В этом исследовании был применен метод кросскорреляций избранных сечений, предложенный в работе [34] и используемый для анализа низкочастотных пространственных флуктуаций микроволнового фона в области RZF–обзора, выполняемого на РАТАН-600 [35, 36]. Для оценки получаемых результатов мы провели моделирование карт с генерированием случайных гауссовых флуктуаций со спектром мощности, соответствующим космологической ΛCDM-модели.

2. ДАННЫЕ

Карта ILC содержит данные о микроволновом фоне с разрешением до $\ell \leq 100$ (около 1°). Она восстановлена по многочастотным наблюдениям в пяти диапазонах длин волн на полной сфере, которые доступны на сайте миссии WMAP.

Обзор NVSS (NRAO VLA Sky Survey) [32] является самым полным обзором Северного неба с высокой чувствительностью и большой площадью покрытия. Он был проведен с большой антенной решеткой (VLA) на частоте 1.4 ГГц с 1993 по 1996 гг. и покрыл все северное небо выше склонения $\delta = -40°$ (33884□° или 82% небесной сферы). Обзор активно используется для различных статистических исследований в области космологии. Каталог содержит 1.8×10^6 источников, и, согласно описанию, является полным на 99% до плотностей интегральных потоков более $S_{1.4} = 3.5$ мЯн, и полным на 50% до плотностей потоков 2.5 мЯн. Обзор проводился в D–конфигурации радиотелескопа VLA, и размер синтезированной диаграммы направленности на уровне половинной мощности, определяющий разрешение, составил около $45''$ дуги. Данные обзора NVSS доступны на сайте NRAO[2], виртуальном телескопе SkyView[3] и в базе данных CATS[4] [37, 38].

2.1. Свойства NVSS каталога и карт

При анализе карт обзора NVSS мы применили подход построения одномерных сечений с учетом сглаживания диаграммой направленности, описанный в [39]. Были рассмотрены два типа NVSS-данных: (1) исходные карты обзора; (2) каталог радиоисточников. Во втором случае мы задавали также уровень удаления источников из карт как свободный параметр, тем самым используя возможность формирования сканов, свободных от влияния мощных радиоисточников.

Для сравнения сечений, построенных различными способами, были рассчитаны корреляционные коэффициенты (1) для сканов, построенных по каталогу и картам; (2) для сканов, рассчитанных по двумерным площадкам и одномерным сечениям, проводимых через центр выбранной области.

В первом случае коэффициент корреляции между всеми сечениями превышает 0.99, т.е. сечения, построенные по данным каталога и картам для нашего исследования, могут рассматриваться как идентичные, что значительно облегчает работу и позволяет в результате использовать списки источников каталога для анализа. Во втором случае коэффициент корреляции был не ниже 0.85, что мы считаем удовлетворительным и приемлемым для быстрых расчетов и соответствующего анализа.

Для исследования корреляционных статистических свойств мы преобразовали NVSS–карты в набор модифицированных одномерных сечений (M-сканы) на заданных склонениях с прямым восхождением от 0^h до 24^h. Шаг между сечениями по склонениям задавался равным размеру выбираемого пиксела на сфере. Значение в каждом пикселе в модифицированных одномерных сечениях NVSS представляют собой средний квадрат плотностей потоков источников в площадке заданного разме-

[2] http://www.cv.nrao.edu/nvss/
[3] http://skyview.gsfc.nasa.gov
[4] http://cats.sao.ru

ра с центром в данном пикселе:

$$M_i = \frac{1}{N_r}\sum_{\kappa_i}^{N_r} S^2_{\kappa_i},\ P_{\kappa_i}(r) \in R_i, \qquad (1)$$

где N_r — количество источников в пикселе (элементарной площадке на небе) заданного размера обзора NVSS, R_i — пиксел заданного размера с номером i, S_{κ_i} — плотность потока радиоисточника с номером κ_i в пикселе R_i, $P_{\kappa_i}(r)$ — положение источника с номером κ_i. Размер пиксела R_i определялся корреляционным масштабом 0.75, 3, 4.5, 6.75 и 9.75°. Подобная характеристика карты NVSS позволяет описать среднее распределение источников в заданной области неба, которая меняется от пиксела к пикселу, и, в частности, статистически проверить наличие скрытых флуктуаций, обусловленных неполнотой каталога WMAP [2,40,41]. Из исследования была исключена дыра в обзоре NVSS со склонениями $\delta < 40°$ и пересекающие ее сечения.

Для выделения сечений карты ILC использовалась процедура '*mapcut*' пакета GLESP [42], позволяющая делать срезы карты на заданном склонении с заданным шагом по прямому восхождению. Перед этой операцией мы генерировали карты на небесной сфере, используя коэффициенты при сферических гармониках из набора $a_{\ell m}$ с заданным разрешением, выполняя процедуру '*cl2map*' того же пакета с функцией синтеза карты:

$$\Delta T(\theta,\phi) = \sum_{\ell}^{\ell_{\max}}\sum_{m=1}^{\ell}$$

$$(a_{\ell,m}Y_{\ell,m}(\theta,\phi) + a_{\ell,-m}Y_{\ell,-m}(\theta,\phi)), \qquad (2)$$

где $Y_{\ell,m}$ — сферические функции, ℓ — номер мультиполя, m — мода мультиполя ℓ, (θ,ϕ) — полярные координаты, $a_{\ell,m}$ — коэффициенты при сферических гармониках, удовлетворяющие соотношению:

$$Y_{\ell,-m}(\theta,\phi) = (-1)^m Y^*_{\ell,m}(\theta,\phi)$$

$$a_{\ell,m} = (-1)^m a^*_{\ell,-m}. \qquad (3)$$

3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

В основе используемого подхода лежит двухступенчатый одномерный корреляционный анализ между M-сканами NVSS и сечениями карты ILC, целью которого являет поиск корреляционных особенностей на различных масштабах.

На первом этапе мы отобрали коррелированные сканы обеих карт и выделили те, где уровень корреляций был выше ожидаемого среднего, оцененного по модельным записям (рис. 1). Несмотря на то, что при таком низком уровне корреляций говорить о корреляции сканов проблематично, мы учитывали тот факт, что низкомасштабные корреляции в случае их существования должны проявиться над гауссовым шумом и могут поднять величину корреляции K выше статистически ожидаемой.

Корреляционные коэффициенты K_t для одномерных сечений вычислялись стандартным методом:

$$K_t = \frac{\mathrm{cov}(x_{\mathrm{ILC},t}, x_{\mathrm{NVSS},t})}{\sigma_{\mathrm{ILC},t}\sigma_{\mathrm{NVSS},t}} = \\ = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{i,\mathrm{ILC},t} - \overline{x_{\mathrm{ILC},t}})(x_{i,\mathrm{NVSS},t} - \overline{x_{\mathrm{NVSS},t}})}{\sigma_{\mathrm{ILC},t}\sigma_{\mathrm{NVSS},t}} \qquad (4)$$

где $x_{i,\mathrm{ILC},t}$ — i-ый элемент одномерного сечения карты ILC, записанный в виде вектора $x_{\mathrm{ILC},t}$ для заданного масштаба или координатного интервала t; $x_{i,\mathrm{NVSS},t}$ — аналогичная величина, где для построения вектора $x_{\mathrm{NVSS},t}$ вместо сечения карты ILC использовался M–скан NVSS, полученный по формуле (1); $\overline{x_{\mathrm{ILC},t}}$ и $\overline{x_{\mathrm{fgd},t}}$ — соответственно средние значения векторов данных сечений карт ILC и M-сечений NVSS, а $\sigma_{\mathrm{ILC},t}$ и $\sigma_{\mathrm{NVSS},t}$ — их дисперсии.

Второй этап заключался в исследовании свойств отобранных сечений для поиска интервалов с корреляционным коэффициентом $|K| \geq 0.5$. Сразу отметим, что корреляции между M-сечениями и данными NVSS при малом количестве точек, участвующих в процедуре, всегда могут быть обнаружены даже в двух случайных записях. Моделирование чистого гауссового шума с помощью процедуры '*fpatt*' системы обработки FADPS [43, 44] показало, что минимальное оптимальное число отсчетов, при котором величина коэффициента корреляции $|K| < 0.5$ у двух случайных записей с гауссовым шумом генератора случайных чисел, составляет 26 отсчетов. Это число мы выбрали как минимальный интервал, измеряемый в пикселах, для поиска значимых корреляций ($|K| \geq 0.5$) в записях, отобранных на первом этапе. Пример такой записи, у которой есть интервал с $|K| \geq 0.5$, приведен на рис. 2.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Из-за недостатка пикселов в сканах мы отказались от использования данных на масштабах 9.75°, исключив таким образом области размером порядка Холодного Пятна. В исследовании участвовали сечения и карты, построенные для масштабов 0.75, 3, 4.5, 6.75 градусов. Координаты центров интервалов и величины корреляционных коэффициентов приведены в таблицах 1-4.

Таблица 1. Координаты центров площадок, где корреляционные коэффициенты сканов $|K| \geq 0.5$. Координаты: прямое восхождение α в часах и склонение δ в градусах (на эпоху 2000.0) имеют точность порядка половины пиксела. Размер стороны пиксела 0.75°.

α_h	$\delta°$	k	α_h	$\delta°$	k	α_h	$\delta°$	k
14.407	-32.87	-0.58	8.387	12.12	0.52	6.024	45.12	-0.55
12.332	-37.37	-0.52	21.711	13.62	-0.52	7.228	45.12	-0.62
12.647	-37.37	-0.52	3.431	15.88	0.52	7.413	52.62	-0.50
12.961	-37.37	-0.59	3.535	15.88	0.51	9.472	52.62	-0.57
10.002	-32.87	-0.50	3.639	15.88	0.55	18.203	52.62	-0.59
6.747	-29.87	0.64	3.795	15.88	0.51	18.054	57.12	-0.54
11.517	-16.37	-0.54	7.342	30.12	-0.56	23.120	57.12	-0.50
11.726	-16.37	-0.56	17.805	30.12	-0.52	22.379	59.38	0.50
18.969	-16.37	-0.57	17.920	30.12	-0.65	1.104	60.12	0.55
7.574	-10.37	-0.52	22.719	30.12	-0.51	5.931	62.38	-0.51
7.726	-10.37	-0.50	0.716	33.12	-0.52	6.245	63.88	0.52
0.700	-1.38	0.51	11.001	36.88	0.59	8.454	71.38	-0.57
3.751	-1.38	0.56	14.313	36.88	0.51	9.550	71.38	-0.55
5.402	-1.38	-0.51	14.938	36.88	0.53	9.863	71.38	-0.51
5.702	-1.38	-0.51	3.508	38.38	-0.51	12.698	78.88	0.53
2.313	6.12	0.59	19.006	38.38	-0.55	13.734	78.88	0.64
3.938	12.12	0.51	4.864	41.38	-0.50	1.169	82.62	-0.62
8.080	12.12	0.52	5.464	41.38	-0.52			

Таблица 2. Координаты центров площадок, где корреляционные коэффициенты сканов $|K| \geq 0.5$. Координаты: прямое восхождение α в часах и склонение δ в градусах(на эпоху 2000.0) имеют точность порядка половины пиксела. Размер стороны пиксела 3°.

α_h	$\delta°$	k	α_h	$\delta°$	k	α_h	$\delta°$	k
23.448	-35.88	0.57	3.451	9.88	-0.54	8.207	25.62	-0.63
0.807	-7.38	-0.60	12.586	9.88	-0.51	9.538	25.62	-0.51
11.293	-7.38	-0.57	2.271	14.38	0.51	22.625	25.62	-0.54
14.117	-7.38	-0.63	16.724	14.38	0.63	3.931	30.12	-0.56
16.133	-7.38	-0.56	20.027	14.38	0.53	15.724	30.12	-0.53
23.595	-7.38	-0.52	21.885	14.38	0.55	21.871	40.62	-0.61
6.820	-4.38	0.53	3.397	19.62	-0.55	1.984	45.12	0.53
21.061	-4.38	0.51	6.158	19.62	-0.55	4.535	45.12	0.57
8.206	-2.12	0.51	8.281	19.62	-0.51	5.953	45.12	0.52
0.800	-1.38	0.53	2.787	21.12	-0.51	2.965	66.12	0.52
0.800	-0.62	0.52	3.645	21.12	-0.59			
19.400	0.12 0.55	8.405	21.88	-0.6				

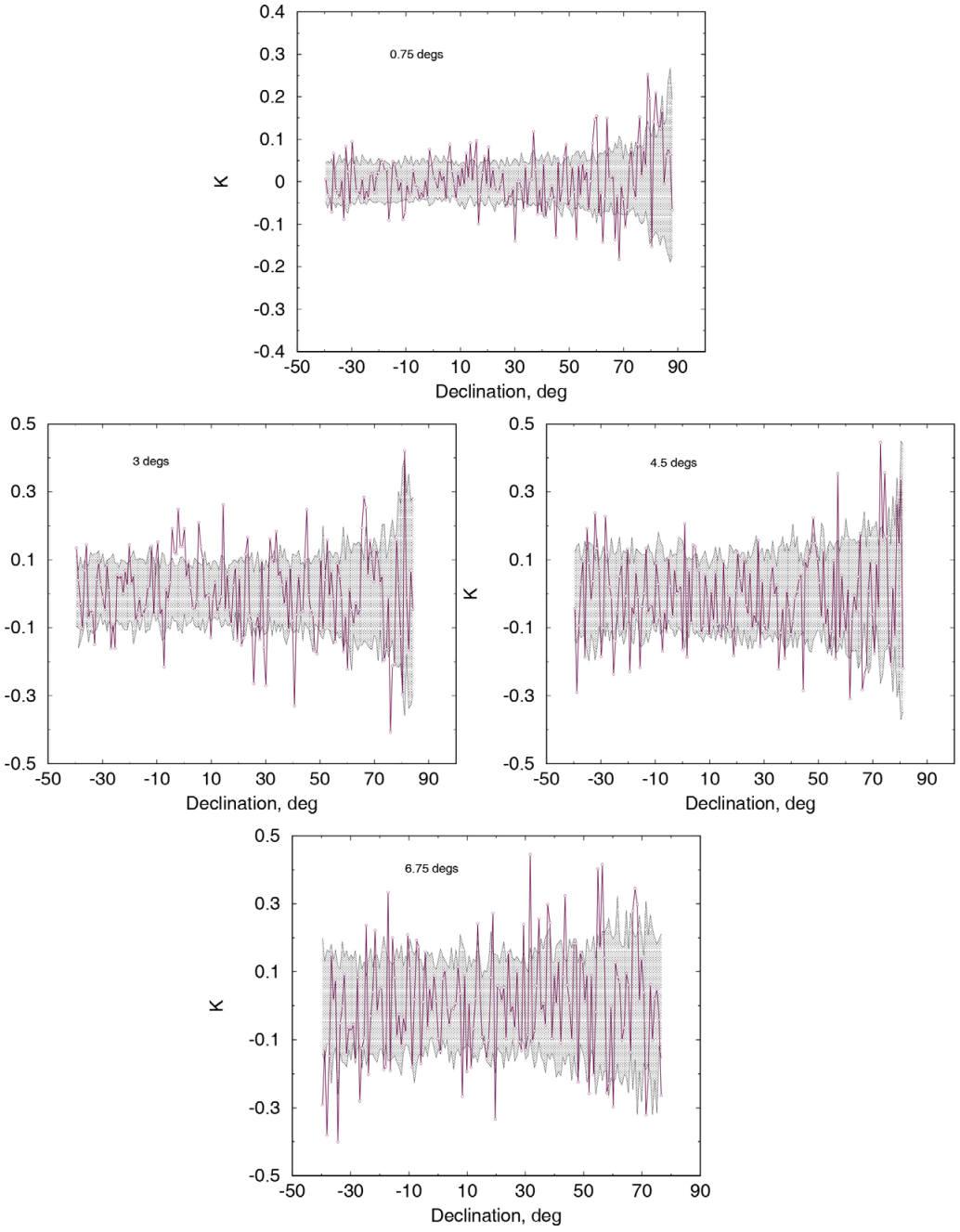


Рис. 1. Корреляционные коэффициенты для различных угловых масштабов в зависимости от склонения δ. Масштабы поиска корреляций (0.75, 3, 4.5 и 6.75 град.) указаны на рисунках. Серым фоном отмечен допустимый уровень кросскорреляций, рассчитанный по данным 50 моделей карт для ΛCDM–космологии.

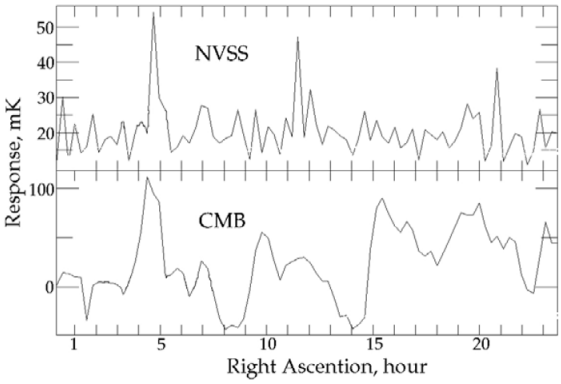


Рис. 2. Пример сечений NVSS (верхний график) и CMB (WMAP ILC) (нижний график) с интервалом 4.5 градуса, где коэффициент корреляции $|K| \geq 0.5$.

Таблица 3. Координаты центров площадок, где корреляционные коэффициенты сканов $|K| \geq 0.5$. Координаты: прямое восхождение в часах и склонение δ в градусах (на эпоху 2000.0) имеют точность порядка половины пиксела. Размер стороны пиксела 4.5°.

α_h	δ°	k	α_h	δ°	k	α_h	δ°	k
21.608	-32.12	0.52	15.218	18.88	-0.52	22.444	35.38	-0.51
12.300	0.12	-0.50	16.925	35.38	-0.50	23.213	57.12	0.57
22.500	0.12	0.55	18.764	35.38	-0.55			
13.950	18.88	-0.57	21.708	35.38	-0.51			

Таблица 4. Координаты центров площадок, где корреляционные коэффициенты сканов $|K| \geq 0.5$. Координаты: прямое восхождение в часах и склонение δ в градусах (на эпоху 2000.0) имеют точность порядка половины пиксела. Размер стороны пиксела 6.75°.

α_h	δ°	k	α_h	δ°	k	α_h	δ°	k
5.258	-39.62	-0.52	21.660	-17.12	0.52	12.155	31.62	0.73
10.516	-39.62	-0.54	1.812	-6.62	0.54	17.406	43.62	0.66
12.269	-39.62	-0.50	14.617	9.88	-0.60	7.039	54.88	0.52
10.904	-34.38	-0.55	0.478	19.62	-0.58			
0.942	-17.12	0.68	3.822	19.62	-0.57			

Таблица 5. Количество событий, когда коэффициент корреляции превышает величину $k = 0.5$ в сканах "ILC–NVSS"и в среднем значении коэффициента, полученного в модельных данных . Оценка делалась в сканах на одинаковых склонениях.

Масштаб град.	количество событий "ILC-NVSS"	среднее количество событий "модель-NVSS"
0.75	53	51.2±12.1
3.0	34	22.1±6.0
4.5	10	20.0±6.1
6.75	13	15.3±5.4

Количество событий, когда $K \leq 0.5$ (34 из 53, 19 из 34, 7 из 10, 7 из 13 для 0.75, 3, 4.5 и 6.75 градусов соответственно), ненамного превышает число событий, когда $K \geq 0.5$. Это можно было бы объяснить привлечением эффекта Сакса-Вольфа, однако, как показало дальнейшее статистическое моделирование, подобные отклонения находятся в пределах гауссовой дисперсии.

Для проверки значимости результатов методом Монте-Карло мы генерировали по 50 случайных модельных карт микроволнового фона для различного масштаба со спектром мощности, соответствующим ΛCDM-космологии, используя пакет GLESP [46]. Карты были построены с аналогичной изучаемым картам пикселизацией на различных масштабах. В каждой карте выделены сканы на склонениях из предыдущей таблицы и подсчитано число событий, когда коэффициент корреляции $|K| \geq 0.5$. Результаты подсчета событий приведены в таблице 5.

Результаты таблицы 5 свидетельствуют о том, что статистически значимых отклонений в корреляции между картой NVSS и картой микроволнового фона ILC от корреляций между картой NVSS и случайными картами CMB не обнаружено на масштабах порядка 1°–7°. Тем не менее, мы выделили области, приведенные в каталоге (табл. 1-4), где поведение M-сканов напоминает поведение CMB. Не исключено, что корреляция положения некоторых пятен из подготовленного каталога площадок может быть обусловлена все же реальным физическим эффектом. Хотя мы склоняемся к выводу о том, что большая часть коррелированных (антикоррелированных) пятен (если не все) может быть объяснена простым статистическим совпадением.

5. ВЫВОДЫ

Мы провели корреляционный анализ карт CMB и модифицированной карты NVSS, сглаженных до различных угловых масштабов, методом одномерных сечений. Для построения модифицированной карты NVSS мы использовали характеристику, представляющую собой средний квадрат плотностей потоков источников в площадке заданного размера с центром в пикселе, определяемым выбранной площадкой. По данным поиска корреляций мы каталогизировали области на различных масштабах, где $|K| \geq 0.5$. Для проверки значимости обнаруженных корреляций мы провели моделирование карт CMB методом Монте-Карло, используя угловой спектр мощности в ΛCDM-космологии как входной параметр. Для сгенерированных 50 моделей CMB мы провели аналогичный корреляционный анализ. Было обнаружено, что статистика корреляций на исследуемых масштабах (0.75, 3, 4.5, 6.75 градусов) не отличается от ожидаемых случайных карт. Таким образом, можно сделать вывод о том, что выявленные корреляции могут быть обусловлены статистическим совпадением. Несмотря на это, представляет интерес проведение двумерной корреляционной пикселизации (картографирования) неба с каталогами других диапазонов длин волн, что мы предполагаем сделать в следующей работе, в частности, и для поиска эффекта Сакса-Вольфа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем благодарность NASA за возможность использования доступного архива (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные WMAP. Мы также признательны авторам HEALPix за использование их пакета[5] [45], с помощью которого были преобразованы карты WMAP в коэффициенты $a_{\ell,m}$. В работе использован пакет GLESP[6] [42, 46] для дальнейшего анализа данных CMB на сфере и система обработки одномерных данных FADPS[7] [43, 44]. Данная работа была

[5] http://www.eso.org/science/healpix/
[6] http://www.glesp.nbi.dk
[7] http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html

поддержана грантом “Ведущие научные школы России”. О.В.В. благодарит РФФИ за частичную поддержку грантом No 08-02-00159.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0302208.
3. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 175 (2003), astro-ph/0302209.
4. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
5. D. N. Spergel, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 377 (2007), astro-ph/0603449.
6. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted, (2008), arXiv:0803.0732.
7. E. Komatsu, J. Dunkley, M. R. Nolta, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted, (2008), arXiv:0803.0547.
8. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. J. Way, Astrophys. J. **590**, L65 (2003), astro-ph/0303643.
9. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **599**, L53 (2003), astro-ph/0310542.
10. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
11. P. Coles, P. Dineen, J. Earl, and D. Wright, Mon. Not. R. Astron. Soc. **350**, 989 (2004), astro-ph/0310252.
12. C. J. Copi, D. Huterer, and G. D. Starkman, Phys. Rev. D **70**, 043515 (2004), astro-ph/0310511.
13. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. Starkman, Phys. Rev. D **75**, 023507 (2007), astro-ph/0605135.
14. P. Vielva, E. Martinez-Gonzlez, R. B. Barreiro, et al., Astrophys. J. **609**, 22 (2004), astro-ph/0310273.
15. P. Mukherjee and Y. Wang, Astrophys. J. **613**, 51 (2004).
16. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, and L. Cayon, Mon. Not. R. Astron. Soc. **356**, 29 (2005).
17. M. Cruz, L. Cayon, E. Martinez-Gonzalez, et al., Astrophys. J. **655**, 11 (2007), astro-ph/0603859.
18. H. K. Eriksen, D. I. Novikov, P. B. Lilje, et al., Astrophys. J. **612**, 64 (2004).
19. C.-G. Park, C. Park, and J. R. Gott III, Astrophys. J. **660**, 959 (2006), astro-ph/0608129.
20. L. Cayon, J. Jin, and A. Treaster, Mon. Not. R. Astron. Soc. **362**, 826 (2005).
21. L. Rudnick, S. Brown, and L. R. Williams, Astrophys. J. **671**, 40 (2007), arXiv:0704.0908.
22. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, Astrophys. J. **147**, 73 (1967).
23. R. A. Sunyaev and Ya. B. Zeldovich, Astrophys. Space Sci. **7**, 3 (1970).
24. S. Brough, D. A. Forbes, V. A. Kilborn, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **369**, 1351 (2006).
25. M. Cruz, N. Turok, P. Vielva, et al., Science **318**, 1612 (2007), arXiv:0710.5737.
26. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, et al., (2008), arXiv:0804.2904.
27. T. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., Astrophys. J. **629**, L1 (2005), astro-ph/0503213.
28. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Int. J. Mod. Phys. D **17**, 179 (2008), astro-ph/0609409.
29. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **62**, 218 (2007).
30. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, Astrophysical Bulletin **63**, 216 (2008), arXiv:0707.1484.
31. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., (2007), arXiv:0712.1118.
32. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
33. K. M. Smith and D. Huterer, (2008), arXiv:0805.2751.
34. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Yu. N. Parijskij, Astrophysical Bulletin **63**, 95 (2008).
35. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, A. B. Berlin, et al., Gravitation Cosmol. **10**, 139 (2005), astro-ph/0508065.
36. N. N. Bursov, Yu. N. Pariiskii, E. K. Maiorova, et al., Astron. Rep. **51**, 197 (2007).
37. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt H. E. Payne, ASP Conf. Ser. **322**, 46 (1997).
38. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005), arXiv:0705.2959.
39. E. K. Majorova, Astrophysical Bulletin **63**, 56 (2008).
40. E. L. Wright, X. Chen, N. Odegard, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser., submitted (2008), arXiv:0803.0577.

41. S. A. Trushkin, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **55**, 90 (2003).
42. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
43. O. V. Verkhodanov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne, ASP Conf. Ser. **125**, 46 (1997).
44. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
45. K. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **622**, 759 (2005).
46. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.

МОЗАИЧНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ ФОНОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИСТОЧНИКОВ*

О. В. Верходанов[1], М. Л. Хабибуллина[1], Е. К. Майорова[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Предлагается метод картографирования корреляций на полной сфере, позволяющий проверять качество восстанавливаемыхк арт, их негауссовость и проводить исследования в разных диапазонах длин волн. Метод апробирован на данных WMAP (как восстановленной карты, так и фоновых компонент), а также на данныхобзора NVSS. Обнаружено значительное смещение в корреляционных данных пылевой компоненты, что может быть обусловлено более сложной моделью пыли, чем используемая в настоящее время при разделении компонент. При исследовании корреляционных данных обзора NVSS продемонстрировано, что статистика совпадающих пятен в микроволновом фоне и обзоре NVSS соответствует ожидаемой в ΛCDM-модели, что может свидетельствовать о случайном совпадении пятен в данных NVSS и WMAP в области Холодного Пятна. Метод реализован в пакете GLESP.

Ключевые слова: радиоисточники

1. ВВЕДЕНИЕ

Полные обзоры небесной сферы в различных диапазонах длин волн привели к бурному развитию исследований глобальных свойств окружающего мира. Среди них и определение космологических параметров Вселенной в раннюю эпоху, и проблемы формирования крупномасштабной структуры Вселенной, и феномен темной энергии. Революционным шагом в современной космологии стали наблюдения космического микроволнового фонового излучения (CMB — Cosmic Microwave Background) с помощью спутника WMAP[1] (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [1–3], проведенные в пяти полосах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W) с измерением интенсивности и поляризации. В результате анализа данных получены карты анизотропии и поляризации CMB, фоновых компонент (синхротронного и свободно-свободного излучения, излучений пыли), а также рассчитаны их спектры мощности. Для не очень высоких гармоник ($\ell < 100$) приведена карта распределения анизотропии CMB, восстановленная из многочастотных наблюдений методом внутренней линейной комбинации (ILC — Internal Linear Combination) фоновых компонент [1].

Кроме данных микроволнового фона, в современных исследованиях на полной сфере активно используются карты обзоров в инфракрасном (ИК) [4], радио [5] и оптическом [6] диапазонах длин волн. С помощью корреляции CMB и радиоизлучения исследуется как вклад радиоисточников в общий фон [7,8], так и корреляционные свойства распределения радиоисточников и CMB, проявляющиеся на больших масштабах ($\theta > 2^\circ$), такие как эффект Сакса-Вольфа [9], и на малых масштабах(в основном, $\theta < 4'$) [10], такие как эффект Сюняева-Зельдовича. Корреляции ИК и оптических обзоров (особенно с известными красными смещениями) с данными CMB позволяют изучить формирование крупномасштабной структуры.

Другим важным направлением приложения корреляционных методов является исследование качества карт микроволнового фона и уровня их очистки от других типов излучения. Так, наличие корреляции CMB и фоновых компонент [11, 12], вносимых Галактикой, говорит об оставшемся вкладе мешающего излучения в процедуре разделения компонент. Кроме того, присутствие коррелированных компонент в ряде диапазонов мультиполей приводит к изменению статистики сигнала CMB, проявляющейся как негауссовость [13]. Это, в свою очередь, осложняет анализ карт исследуемого сигнала и их спектра мощности. Исследованию статистических свойств сигнала в карте ILC и обсуждению ее негауссовости было посвящено достаточно много работ, проведенных различными метода-

*Астрофизический бюллетель. 2009. 64(3). С. 272

[1]http://lambda.gsfc.nasa.gov

ми, такими как фазовый анализ [12–14], максвеловские мультипольные вектора [15], вейвлеты [16–18], функционалы Минковского [19, 20]. Корреляционная методика в исследовании негауссовости позволяет выделить негауссовость определенного вида, например, обусловленную систематикой при анализе данных.

В данной статье мы обобщаем подход построения корреляций карт на различных угловых масштабах, описанный ранее в [21, 22]. Мы предлагаем метод мозаичного картографирования и визуализации корреляций карт на полной сфере для различных угловых масштабов поиска корреляций. Мы используем этот подход при построении и исследовании карт корреляций ILC и фоновых компонент WMAP5 (данные WMAP пятого года наблюдений) [2], а также ILC и радиоисточников NVSS (NRAO VLA Sky Survey) [5].

2. МЕТОД КАРТОГРАФИРОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИЙ

Корреляция двух карт на сфере описывается корреляционным коэффициентом для мультиполя ℓ как

$$K(\ell) = \frac{1}{2}\frac{\sum\limits_{m=-\ell}^{l} t_{\ell m}s^*_{\ell m} + t^*_{\ell m}s_{\ell m}}{(\sum\limits_{m=-\ell}^{l}|t_{\ell m}|^2 \sum\limits_{m=-\ell}^{\ell}|s_{\ell m}|^2)^1/2}, \quad (1)$$

где $t_{\ell m}$ и $s_{\ell m}$ — это вариации температуры CMB и некоторого сигнала в гармоническом представлении, * — знак сопряжения, ℓ и m — номера сферической гармоники (мультиполя) и его моды в гармоническом разложении сигнала на сфере:

$$S(\theta,\phi) = \\ = \sum_{\ell}^{\ell_{max}}\sum_{m=1}^{\ell}(a_{\ell,m}Y_{\ell,m}(\theta,\phi) + a_{\ell,-m}Y_{\ell,-m}(\theta,\phi)), \quad (2)$$

где $Y_{\ell,m}$ — сферические функции, (θ,ϕ) — полярные координаты, $a_{\ell,m}$ — коэффициенты при сферических гармониках, удовлетворяющие соотношению:

$$Y_{\ell,-m}(\theta,\phi) = (-1)^m Y^*_{\ell,m}(\theta,\phi),$$

$$a_{\ell,m} = (-1)^m a^*_{\ell,-m}. \quad (3)$$

Величина коэффициента $K(\ell)$ позволяет проверить корреляцию гармоник на сфере, т.е. сравнить свойства карт в заданном угловом масштабе. Однако при поиске коррелированных областей, не повторяющихся в других областях сферы, этот подход замазывает такие одиночные площадки при общем усреднении по сфере внутри одной гармоники. В этом случае выделить коррелированные области уже практически не удается.

Мы предлагаем подход, реализованный в рамках пакета GLESP [23, 24], который позволяет обнаружить корреляции на исследуемых площадках определенного углового размера для карт, пикселизированных с более высоким разрешением. Метод реализован в пиксельном параметрическом пространстве. Картографирование корреляций состоит в присвоении пикселу с номером p результата корреляции внутри телесного угла Ξ_p, вычисляемой для двух карт, имеющих более высокое разрешение. В результате мы получаем новую карту, в которой значение в каждом пикселе отражает уровень корреляции исследуемых карт в данной площадке.

Коэффициент корреляции анизотропии температуры CMB и некоторого сигнала для каждого пиксела p ($p = 1, 2, ..., N_0$, где N_0 — полное число пикселов на сфере), стягивающего телесный угол Ξ_p и вычисляемый для карт на сфере с исходным разрешением, определяемым $\ell_{\max}$ (далее везде для исходных карт взято значение $\ell_{\max} = 150$), есть

$$K(\Xi_p|\ell_{\max}) = \\ = \frac{\sum\limits_{p_{ij}\in\Xi_p}\sum(\Delta T(\theta_i,\phi_j) - \overline{\Delta T(\Xi_p)})(S(\theta_i,\phi_j) - \overline{S(\Xi_p)})}{\sigma_{\Delta T_p}\sigma_{S_p}} \quad (4)$$

где $\Delta T(\theta_i,\phi_j)$ — величина анизотропии температуры CMB в пикселе с координатами (θ_i,ϕ_j) для заданного разрешения пикселизации сферы, $S(\theta_i,\phi_j)$ — величина другого сигнала в той же площадке, $\overline{\Delta T(\Xi_p)}$ и $\overline{S(\Xi_p)}$ — средние значения в площадке Ξ_p, полученные по данным карт с более высоким разрешением, задаваемым $\ell_{\max}$, $\sigma_{\Delta T_p}$ и σ_{S_p} — соответствующие стандарты на этой площадке.

3. КАРТЫ КОРРЕЛЯЦИЙ ILC WMAP5 И ФОНОВЫХ КОМПОНЕНТ

Одно из приложений данного подхода — проверка качества очистки сигнала CMB, выделя- емого из многочастотных наблюдений. Наличие остаточного (коррелированного) сигнала в данных CMB может привести к смещению оценки (байесу) мощности в ряде диапазонов мультиполей [25], что, в свою очередь, ведет к понижению точности определения космологических параметров.

Используя данные WMAP: карту синхротронного излучения в полосе K, свободно-свободного излучения в полосе V, излучения пыли в полосе W и, наконец, карту ILC, мы построили карты кор-

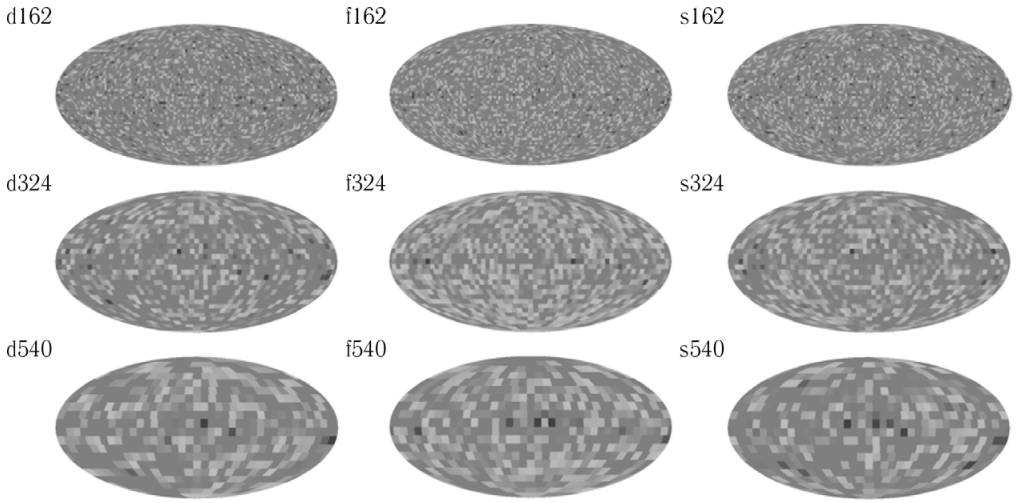


Рис. 1. Корреляционные карты ILC и галактических фонов: пыли, свободно-свободного и синхротронного излучений (слева направо), для различных корреляционных окон: $162'$, $324'$ и $540'$ (сверху вниз). Тон пикселов отражает величину корреляционных коэффициентов от –1.0 до 1.0. Более светлый тон соответствует меньшему абсолютному значению коэффициента корреляции.

реляции фонов и ILC на различных угловых масштабах.

Как было ранее показано в ряде работ, посвященных анализу карты ILC и изучению статистики сигнала в ней [11–13], имеются серьезные аргументы, говорящие о том, что в данной карте на различных угловых масштабах присутствует остаточный вклад фоновых компонент, который, в частности, и дает обнаруживаемую негауссовость. Этот вклад может проявляться также в обнаруженной ранее связи в квадруполе между очищенной картой микроволнового фона и галактическими компонентами излучения [25–27]. Согласно работам команды WMAP [1, 2], карта ILC не предназначена для исследования CMB на высоких мультиполях, но может быть применена для анализа фоновых компонент. Ее мы и используем для анализа свойств фона.

В предыдущей работе [21], используя одномерные сечения, мы применили подход поиска корреляций карт фоновых излучений миссии WMAP и установили, в частности, что в сечениях карт WMAP на склонении $\delta = 41^\circ$ присутствует сигнал, коррелированный и антикоррелированный с данными разделяемых компонент. Кроме того, на угловых масштабах, характерных для плоскости Галактики ($\ell = 10$–20), обнаружены значимые (по сравнению с модельными картами) корреляции с галактическими компонентами фона, которые могут быть следствием проявления остаточных невязок при выделении сигнала.

В данной работе мы построили карты корреляций ILC и фоновых компонент WMAP5 на полной сфере. Кроме того, мы оценили статистическую значимость выделенных коррелированных площадок методом Монте-Карло, сравнив их с картами случайных гауссовых полей, сгенерированных на полной небесной сфере для космологической модели ΛCDM [3]. Результат картографирования корреляций карт фонов и ILC приведены на рис. 1 для окон корреляции со сторонами $162'$, $324'$, $540'$ (соответственно $\ell_{\max 1} = 33, 16$ и 10) для трех фоновых компонент. Размеры окон выбирались таким образом, чтобы попасть в диапазон угловых масштабов влияния Галактики (ℓ =10–20), а также возможного эффекта Сакса-Вольфа ($\ell \leq 45$).

На картах рис. 1 явно прослеживается плоскость Галактики. Важным показателем является статистика величины корреляции в каждом пикселе. Мы построили гистограммы для всех приведенных карт и сравнили их с аналогичными результатами для модельных карт. Модельные карты генерировались в предположении, что данные CMB есть результат случайного гауссова процесса с угловым спектром мощности, соответствующим космологической ΛCDM–модели. Всего было построено 50 модельных случайных карт с использованием процедуры *'cl2map'* пакета GLESP [23, 24], и с их помощью оценен допустимый интервал, определяемый дисперсией разброса корреляционных значений. Распределение значений пикселов показаны на рис. 2. Допустимые границы уровня корреляций, построенные по данным моделирования, по-

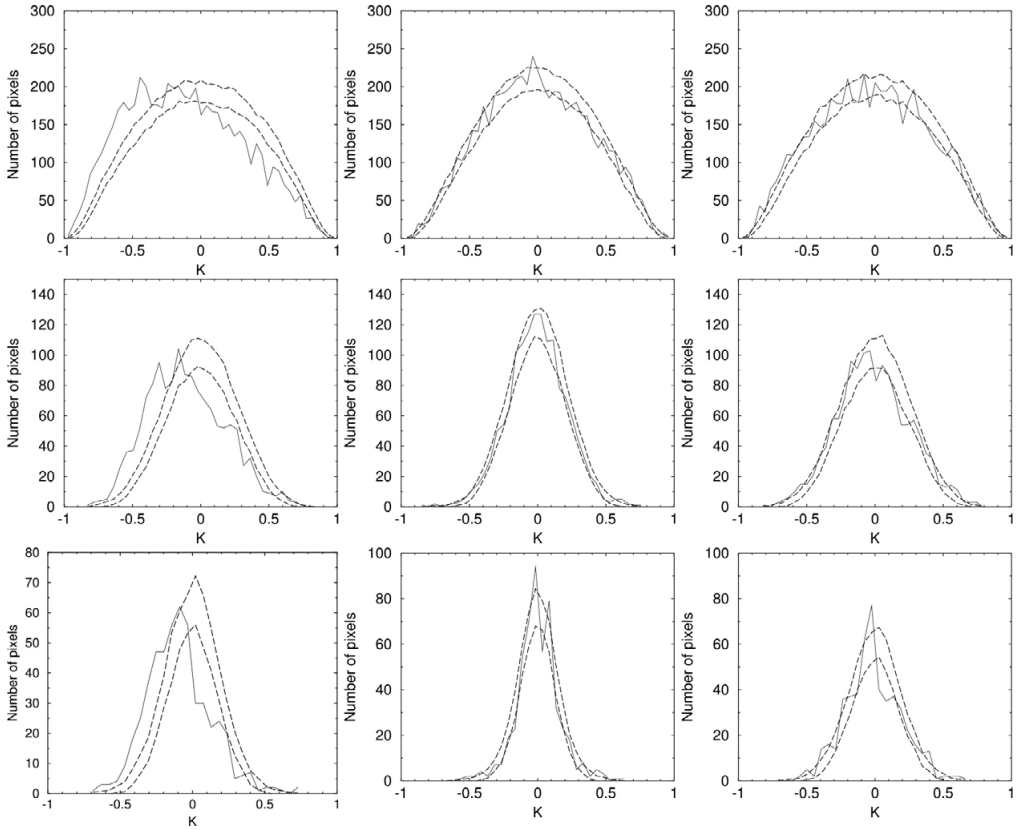


Рис. 2. Распределения величин корреляционных индексов в пикселах корреляционных карт ILC и галактических фонов: излучения пыли, свободно-свободного и синхротронного излучений (слева направо), для различных корреляционных окон: $162'$, $324'$ и $540'$ (сверху вниз). Допустимые границы уровня корреляций, построенные по данным моделирования, показаны пунктирными линиями.

казаны пунктирными линиями.

У распределений двух фоновых компонент (пыль и синхротрон) наблюдается сдвиг в область антикорреляций. Причем в случае пылевой компоненты сдвиг наблюдается на всех исследуемых масштабах, а для синхротронного излучения — на гистограммах для $324'$ и $540'$. Гистограмма для свободно–свободного излучения показывает распределение в пределах нормы, соответствующее CMB, как случайному гауссову процессу. Необходимо отметить, что аналогичный сдвиг в распределении был обнаружен для низких мультиполей при анализе метода ILC восстановления сигнала [25, 27] путем генерации модельных карт с последующим смешиванием их с фоновыми компонентами, восстановления сигнала, затем корреляции восстановленных карт и построения распределения корреляционных коэффициентов. В данном подходе оценка распределения состояла лишь из двух шагов: построение карты корреляций и вычисление гистограммы распределения значений в пикселах.

Сдвиг в распределении корреляционных коэффициентов может быть связан с недоучетом используемой моделью распределения пыли в нашей Галактике, причем избыток в отрицательных величинах коэффициентов говорит в пользу гипотезы, что в соответствующих пикселах коррелированные сигналы CMB и пыли имеют противоположный знак. Этот факт может быть использован при коррекции вклада пылевой компоненты. В дальнейшем предполагается проведение дополнительных исследований обнаруженного байеса.

4. КАРТЫ КОРРЕЛЯЦИЙ ILC WMAP5 И NVSS

Рассмотрим еще одно приложение корреляционного картографирования. Среди исследований карт CMB выделяются работы по изучению темной энергии с использованием интегрального эффекта Сакса-Вольфа [9], регистрируемого в работах по корреляциям между картами CMB и распределением источников NVSS [28, 29].

Обзор NVSS [5] является самым полным обзором Северного неба. Он был проведен с Большой Антенной Решеткой (VLA) на частоте 1.4 ГГц с 1993 по 1996 г.г., имеет высокую чувствительность и покрывает все небо выше склонения $\delta = 40^\circ$ ($33884\square^\circ$ или 82% небесной сферы). Обзор активно используется для различных статистических исследований в области космологии. Каталог этого обзора содержит 1.8×10^6 источников и, согласно описанию, является полным на 99% до плотностей интегральных потоков более $S_{1.4\ \text{ГГц}} = 3.5$ мЯн и полным на 50% до плотностей потоков 2.5мЯн. Обзор проводился в D–конфигурации радиотелескопа VLA, и размер синтезированной диаграммы направленности на уровне половинной мощности, определяющий разрешение, составил около $45''$. Данные обзора NVSS доступны на сайте NRAO[2], виртуальном телескопе SkyView[3] и в базе данных CATS[4] [30, 31].

По данным WMAP CMB и NVSS были также обнаружены негауссовы особенности, плохо согласующиеся с инфляционной ΛCDM-моделью, такие, например, как Холодное Пятно (далее CS—Cold Spot). Оно имеет размер порядка 10° и галактические координаты ($l = 209^\circ, b = \breve{}57^\circ$). CS, статистически выделяемое в распределении CMB, является одной из особенностей карт, противоречащих гипотезе однородных гауссовых флуктуаций фона. Изначально оно было отмечено как отклонение от гауссовой статистики при применении вейвлет–анализа [16,18] в данных первого года наблюдений миссии WMAP. Позднее в области CS было обнаружено понижение пространственной плотности радиоисточников в картах NVSS [32], что позволило сделать предположение о существовании гигантского войда размером порядка 140 Мпс, удаленного от нас до $z < 1$, вызывающего гравитационную аномалию, которая приводит к интегральному эффекту Сакса–Вольфа [9] и проявляется как CS. В то же время были приведены серьезные аргументы, указывающие, что в данной карте на различных угловых масштабах присутствует остаточный вклад галактических фоновых компонент, который и дает обнаруживаемую негауссовость. Этот вклад может проявляться в обнаруженной ранее связи в квадруполе между очищенной картой микроволнового фона и галактическими компонентами излучения [26, 27] и, кроме того, определять свойства низких мультиполей $\ell \leq 20$, приводя к неустойчивому их восстановлению [25, 27]. В частности, влиянием этих мультиполей могут быть объяснены особенности CS: отклонение статистики кластеров пиков вокруг пятна [33], а именно, увеличение числа положительных пиков. Независимое изучение свойств пятна, обнаруженного в области с близкими координатами на картах и подсчетах радиоисточников в обзоре NVSS [5], показало, что исследуемое Холодное Пятно, гигантские размеры и существование которого трудно объяснить в рамках космологической ΛCDM–модели, может быть простым статистическим отклонением, вызванным систематическими эффектами [34].

Ранее мы провели корреляционный анализ обзоров NVSS и WMAP5, предварительно модифицировав карту NVSS, методом одномерных сечений для различных угловых масштабов [22]. Для построения модифицированной карты NVSS мы использовали характеристику, представляющую собой средний квадрат плотностей потоков источников в площадке заданного размера с центром в пикселе, определяемым выбранной площадкой. В результате мы обнаружили, что статистика корреляций на исследуемых масштабах (0.75°, 3°, 4.5° и 6.75°) не отличается от ожидаемых случайных карт. Таким образом, можно сделать вывод, что выявленные корреляции могут быть обусловлены статистическим совпадением.

В данной работе проведено картографирование корреляционных свойств на сфере, используя те же данные WMAP5 и NVSS. Результаты показаны на рис. 3 и 4. При анализе статистики карт (рис.4) учитывалось отсутствие данных NVSS в области склонений $\delta < 40^\circ$. Карту NVSS мы строили двумя способами: (1) подсчитывая число источников в каждом пикселе и (2) складывая плотности потоков радиоисточников, попадающих в область пиксела. В связи с тем, что корреляционные свойства практически не отличаются (различие меньше 1%), мы весь анализ продемонстрируем для первого случая.

Как видно из рис. 4, статистика коррелированных величин пикселов находится внутри допустимых случайных отклонений, что подтверждает сделанные ранее оценки [22]. Это говорит о том, что в распределении корреляционных коэффициентов не обнаружен сигнал, имеющий уровень выше 1σ на выделенных масштабах, обусловленный, например, взаимодействием с крупномасштабной

[2] http://www.cv.nrao.edu/nvss/
[3] http://skyview.gsfc.nasa.gov
[4] http://cats.sao.ru

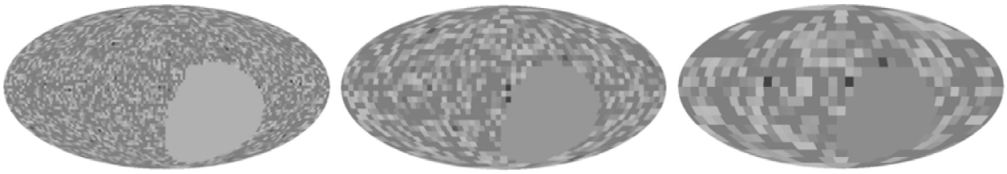


Рис. 3. Корреляционные карты ILC и NVSS для различных корреляционных окон: $162'$, $324'$ и $540'$ (справа налево). В нижней правой части каждого рисунка экранирована область, которая не рассматривалась при анализе из-за отсутствия наблюдений NVSS в диапазоне $\delta < -40^\circ$.

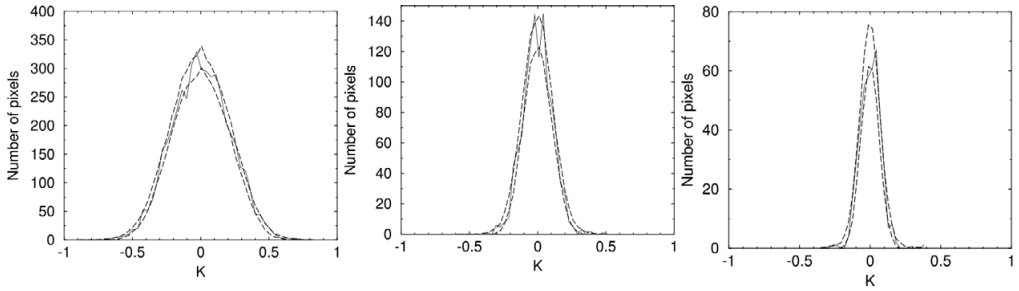


Рис. 4. Распределения величин корреляционных индексов в пикселах корреляционных карт ILC и NVSS для различных корреляционныхок он: $16'$, $324'$ и $540'$ (справа налево). Допустимые границы уровня корреляций, построенные по данным моделирования, показаны пунктирными линиями.

структурой и темной энергией, проявляющихся через эффект Сакса-Вольфа. С другой стороны, так как распределение коэффициентов соответствует ожидаемым случайным совпадениям для гауссовых возмущений в ΛCDM-модели, можно сделать вывод, что выделенных негауссовых пятен чрезвычайно мало, если они вообще есть. А с учетом того, что само Холодное Пятно может быть результатом локальной модуляции сферических гармоник, возникшей в результате разделения компонент [33], можно заключить, что данный феномен, наблюдаемый одновременно в CMB и NVSS, скорее всего, не является аномалией и может быть систематикой (переоценкой фона) при анализе данных WMAP и случайным совпадением со статистически незначимой особенностью распределения NVSS.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы представили метод картографирования корреляций на сфере для заданного углового масштаба. Метод картографирования корреляций программно реализован в рамках пакета GLESP. Предложенный подход позволяет исследовать на сфере свойства случайного сигнала CMB, имеющего единственную реализацию, основываясь только на его статистических свойствах, а именно эргодичности, когда по множеству реализаций реликтового излучения в разных областях сферы можно сделать вывод о его реализации во множестве подобных Вселенных и, тем самым, оценить его вероятные значения. Мы продемонстрировали возможности метода для данных WMAP5 (карты ILC и фоновых излучений: синхротронного, свободно-свободного и пыли). Для построенных карт корреляций был обнаружен сдвиг в распределении значений пикселов в сторону антикорреляций для пыли и синхротронного излучения на масштабах $162'$, $324'$ и $540'$. Это говорит о возможной переоценке вклада этих фонов в методе разделения компонент ILC. Избыток в отрицательных величинах коэффициентов говорит о том, что в соответствующих пикселах коррелированные сигналы CMB и пыли имеют противоположный знак. Этот факт может быть использован при коррекции вклада пылевой компоненты. Предполагается дальнейшее исследование этой проблемы. Описанный подход также применялся при исследовании корреляционных свойст в карты CMB и карты NVSS. В распределении корреляционных коэффициентов не обнаружен дополнительный сигнал уровнем выше 1σ над ожидаемым при случайном совпадении гауссовых возмущений в космологической модели ΛCDM. Такое распределение корреляций говорит в пользу того, что Холодное Пятно, проявляющееся одновременно в CMB и NVSS, может быть результатом случайного совпадения, и для его объяснения нет необходимости привлекать новую физику.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем благодарность NASA за возможность использования архива (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные WMAP. Мы также признательны авторам пакета HEALPix[5], с помощью которого были преобразованы карты VMAP в коэффициенты $a_{\ell m}$. В работе использован пакет GLESP[6] [23, 24] для дальнейшего анализа данных CMB на сфере и система обработки одномерных данных FADPS[7] [36, 37]. Данная работа была поддержана грантом "Ведущие научные школы России" и грантами РФФИ №09-02-00298 и 09-02-92659-ИНД. О.В.В. также благодарит РФФИ за частичную поддержку грантом №08-02-00159.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted, (2008), arXiv:0803.0732.
3. E. Komatsu, J. Dunkley, M. R. Nolta, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted, (2008), arXiv:0803.0547.
4. M. F. Skrutskie, S. E. Schneider, R. Stiening, et al., in *The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys*, Ed. by F. Garzon et al. (Kluwer Acad. Publ. Comp., Dordrecht 1997), p.25.
5. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
6. D. P. Schneider, P. B. Hall, G. T. Richards, et al., Astron. J. bf 134, 102 (2007).
7. K. M. Huffenberger , H. K. Eriksen, and F. K. Hansen, Astrophys. J. **651L**, 81 (2006), astro-ph/0606538.
8. O. V. Verkhodanov and Yu. N. Parijskij, *Radio galaxies and Cosmology*, (Fiz.Mat.Lit., Moscow 2009) [in Russian].
9. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, Astrophys. J. **147**, 73 (1967).
10. R. A. Sunyaev and Ya. B. Zeldovich, Astrophys. Space Sci. **7**, 3 (1970).
11. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **599**, L53 (2003), astro-ph/0310542.
12. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
13. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. J. Way, Astrophys. J. **590**, L65 (2003), astro-ph/0303643.
14. P. Coles, P. Dineen, J. Earl, and D. Wright, Mon. Not. R. Astron. Soc. **350**, 989 (2004), astro-ph/0310252.
15. C. J. Copi, D. Huterer, and G. D. Starkman, Phys. Rev. D **70**, 043515 (2004), astro-ph/0310511.
16. P. Vielva, E. Martinez-Gonzalez, R. B. Barreiro, et al., Astrophys. J. **609**, 22 (2004), astro-ph/0310273.
17. P. Mukherjee and Y. Wang, Astrophys. J. **613**, 51 (2004).
18. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, and L. Cayon, Mon. Not. R. Astron. Soc. **356**, 29 (2005).
19. H. K. Eriksen, D. I. Novikov, P. B. Lilje, et al., Astrophys. J. **612**, 64 (2004).
20. C.-G. Park, C. Park, and J. R. Gott III, Astrophys. J. **660**, 959 (2006), astro-ph/0608129.
21. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Yu. N. Parijskij, Astrophysical Bulletin **63**, 101 (2008).
22. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, E. K. Majorova, and Yu. N. Parijskij, Astrophysical Bulletin **63**, 366 (2008).
23. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
24. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
25. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, Astrophysical Bulletin **63**, 216 (2008), arXiv:0707.1484.
26. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Int. J. Mod. Phys. D **17**, 179 (2008), astro-ph/0609409.
27. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **62**, 218 (2007).
28. M. R. Nolta, E. L. Wright, L. Page, et al., Astrophys. J. **608**, 10 (2004), astro-ph/0305097.
29. J. D. McEwen, P. Vielva, M. P. Hobson, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **376**, 1211 (2007), astro-ph/0602398.
30. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne, ASP Conf. Ser. **322**, 46 (1997).
31. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005), arXiv:0705.2959.
32. L. Rudnick, S. Brown, and L. R. Williams, Astrophys. J. **671**, 40 (2007), arXiv:0704.0908.

[5] http://www.eso.org/science/healpix/
[6] http://www.glesp.nbi.dk
[7] http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html

33. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., (2007), arXiv:0712.1118.
34. K. M. Smith and D. Huterer, arXiv:0805.2751.
35. K. Gorski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, et al., Astrophys. J. **622**, 759 (2005).
36. O. V. Verkhodanov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne, ASP Conf. Ser., **125**, 46 (1997).
37. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).

К ПОНИМАНИЮ ЗАГАДКИ ХОЛОДНОГО ПЯТНА В КАРТАХ WMAP*

П. Д. Насельский[1], П. Р. Кристенсен[1], П. Коулз[2], О. В. Верходанов[3], Д. И. Новиков[4], Я. Ким[1]

[1]Niels Bohr Institute, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen, Denmark
[2]School of Physics & Astronomy, Cardiff University, 5 The Parade, Cardiff, CF24 3AA, Wales, United Kingdom
[3]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[4]Imperial College, London, United Kingdom

Холодное Пятно (CS — Cold Spot) с Галактическими координатами ($b = -57°$, $l = 209°$) было открыто в данных спутника Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) как аномалия фона. Чтобы оценить значимость Пятна для космологических исследований, мы проанализировали его свойства кластерным анализом пиков сигнала микроволнового фона. Кроме того, мы проверили гипотезу о том, что микроволновой сигнал имеет негауссовый хвост, локализованный в компонентах низких мультиполей. Для этого был построен линейный фильтр, разделявший сигнал на две части: негауссову и гауссову. Используя масштаб фильтра как переменную, можно максимизировать асимметрию и эксцесс сглаженного сигнала и минимизировать эти статистические характеристики. Мы нашли, что, в отличие от Северной части, Южная галактическая полусфера карты реликтового излучения характеризуется значительным отклонением от гауссовости, в котором CS является не единственным ее проявлением. Было обнаружено, что форма CS определяется в основном компонентами сигнала CMB из диапазона мультиполей $10 \leq \ell \leq 20$ с соответствующим угловым разрешением около $5 - 10°$. Этот сигнал приводит к модуляции CMB на всем небе, обнаруживаемой на широтах $|b| > 30°$ в обеих картах ILC и WCM, а не только в локализованной области. После вычитания этой модуляции оставшаяся часть сигнала CMB является статистически однородной и гауссовой. Поэтому мы делаем вывод, что загадка Холодного Пятна WMAP прямо отражает пекулярные особенности низких мультиполей сигнала CMB, а не один локальный (изолированный) дефект или анизотропную космологию.

Ключевые слова: теоретическая и наблюдательная космология

1. ВВЕДЕНИЕ

Предельно Холодное Пятно (Cold Spot — CS), явно несовместимое с предположением о статистически однородных гауссовых флуктуациях, было обнаружено вейвлет-анализом [1–3] в данных первого года наблюдений на спутнике WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Позднее существование пятна было подтверждено [4, 5] в данных третьего и пятого года наблюдений WMAP [6–8]. Центр CS в данных WMAP имеет галактические координаты $b = -57°$,$l = 209°$ и характерный масштаб около 10°. Как указали Круз и др. [9], в области пятна частотная зависимость сигнала очень плоская. Этот факт используется авторами как аргумент в пользу того, что WMAP CS является скорее частью сигнала космического микроволнового фона (Cosmic Microwave Background — CMB), чем частью наложенного фонового излучения. Авторы [9] указали причину, почему CS не было обнаружено в пространстве пикселов до применения вейвлет-анализа, объясняя это тем, что оно спрятано среди структур различных угловых масштабов.

Как легко видимый пример негауссового поведения CMB в данных WMAP, Холодное Пятно привлекает особенно серьезное внимание и с теоретической точки зрения. Так, Томита [10] предположил, что CS может иметь отношение к гравитационным эффектам второго порядка. Иноуи и Силк [11] предложили модель, привлекающую для объяснения феномена уравновешивающий сигнал локального войда. Происхождение CS и его связи с яркостной температурой и распределением источников NVSS [12], сглаженным до масштабов нескольких градусов, обсуждалось Рудником и др.

*Астрофизический бюллетель. 2010. 65(2). С. 107

[13]. Они обнаружили углубление на 20–45% в сглаженном распределении источников, которое может быть интерпретировано, по их мнению, как проявление интегрального эффекта Сакса-Вольфа, видимого в одной области неба в сигнале CMB. Яффе и др. [14, 15], Кэйон и др. [16] и МакИвен и др. [17, 18] исследовали возможность объяснения CS и других особенностей низких мультиполей WMAP анизотропными космологическими моделями Бьянки VIIh. Недавно Круз и др. [5, 19] указали, что CS может быть образовано космической текстурой, а сигнал CMB является комбинацией гауссовой и негауссовой частей. Текущий статус проблемы происхождения CS все еще остается неопределенным, несмотря на большой набор теоретических предложений. И все же, если мы верим, что какая-то часть сигнала CMB в данных WMAP содержит негауссовы особенности, необходимо найти дополнительные факты, подтверждающие негауссовость, чтобы понять их свойства более полно. Поэтому в этой работе мы проводим детальное исследование свойств CS, сосредотачиваясь на следующих моментах.

Первое, в разделе 2 мы показываем, как легко CS может быть обнаружено в пиксельном пространстве не только в выделенном сигнале CMB, но даже в картах WMAP в полосах K–W еще до разделения сигнала CMB и мешающих фоновых компонент.

Второе, мы продемонстрируем, что CS принадлежит кластеру локальных минимумов, пространственное распределение которых промодулировано модами больших угловых масштабов сигнала CMB вне Галактической плоскости. Для этого мы используем карту внутренней линейной комбинации (Internal Linear Combination — ILC) третьего (ILC III) года и карту, очищенную от фоновых компонент и полученную комбинацией наблюдаемых каналов (co-added WMAP foreground-cleaned combined map — WCM) [6, 7], в формате HEALPix с параметром $N_{\rm side} = 512$ и конвертированную в формат GLESP [20], где каждое кольцо по широте имеет одно и то же количество пикселов $N_\phi = 2048$ в азимутальном направлении ϕ в полярных координатах. Потом мы представим кластерный анализ [21] положительных и отрицательных пиков для выбранных колец в области вне маски Kp0 [6, 7] и уделим внимание кольцу на сфере, пересекающему CS на его экстремуме $b = -57^\circ$ и $-180^\circ \le \phi \le 180^\circ$. Рассматривая сигнал в каждом кольце на широте b, мы можем исследовать морфологию распределения сигнала для всего диапазона ϕ. Этот подход позволяет связать морфологию CS с сигналом снаружи CS на той же широте $b = -57^\circ$. Мы покажем, что кластер, содержащий CS, не является уникальной особенностью кольца на $b = -57^\circ$. Например, на близких к CS широтах есть два значимых кластера максимумов, но эти пики имеют меньшую, чем у CS, амплитуду.

Далее, так как происхождение больших кластеров экстремумов имеет отношение к угловой модуляции сигнала на больших масштабах [21], мы можем разделить сигнал на две части. Чтобы это сделать мы используем асимметрию (skewness) и эксцесс (kurtosis) сигнала в выбранных кольцах, включая кольцо на $b = -57^\circ$. Используя простой линейный сглаживающий фильтр с характеристическим масштабом R, мы разделяем сигнал на сглаженную компоненту и разницу между исходным сигналом и сглаженной компонентой. Для сглаженного сигнала мы определяем асимметрию $S(R)$ и эксцесс $K(R)$ как функции R и находим масштаб фильтрации, который максимизирует эти обе характеристики $S(R_{\rm opt})$,$K(R_{\rm opt}) \to \max$. Используя такой масштаб $R_{\rm max}$, мы разделяем исходный сигнал CMB на две части, одна из которых (сглаженная) содержит максимально негауссовый сигнал, а другая (входной сигнал минус сглаженный) — максимально гауссовый сигнал. Негауссова часть в основном формируется сигналом, локализованном в диапазоне мультиполей $2 \le \ell \le 20$, а другая часть принадлежит диапазону $\ell > 20$. Наш анализ явно демонстрирует, что объявленная негауссовость CS напрямую отражает существование крупномасштабной угловой модуляции сигнала CMB на $10 \le \ell \le 20$.

Наконец, используя кластерный анализ в комбинации со статистикой асимметрии и эксцесса, мы обнаружили несколько дополнительных холодных и горячих пятен на том же кольце с $b = -57^\circ$, что и самое известное. Чтобы показать, что эффект кластеризации пиков у низких мультиполей CMB является общим, мы рассмотрели Северное галактическое полушарие с дефицитом мощности и нашли на нем несколько холодных и горячих пятен. Идея применения кластерного анализа в комбинации с асимметрией и эксцессом была простимулирована работами [1–4, 9], и особенно [22, 23].

В нашем исследовании мы используем как карту WCM, так и карту ILC третьего года, которые очень похожи вне разреза $b = \pm 25^\circ$ от плоскости Галактики. Для нашего анализа использовалась карта высокого разрешения ILC III для маркировки возможных зон CMB на небе, в которых ожидается повышенная кластеризация пиков.

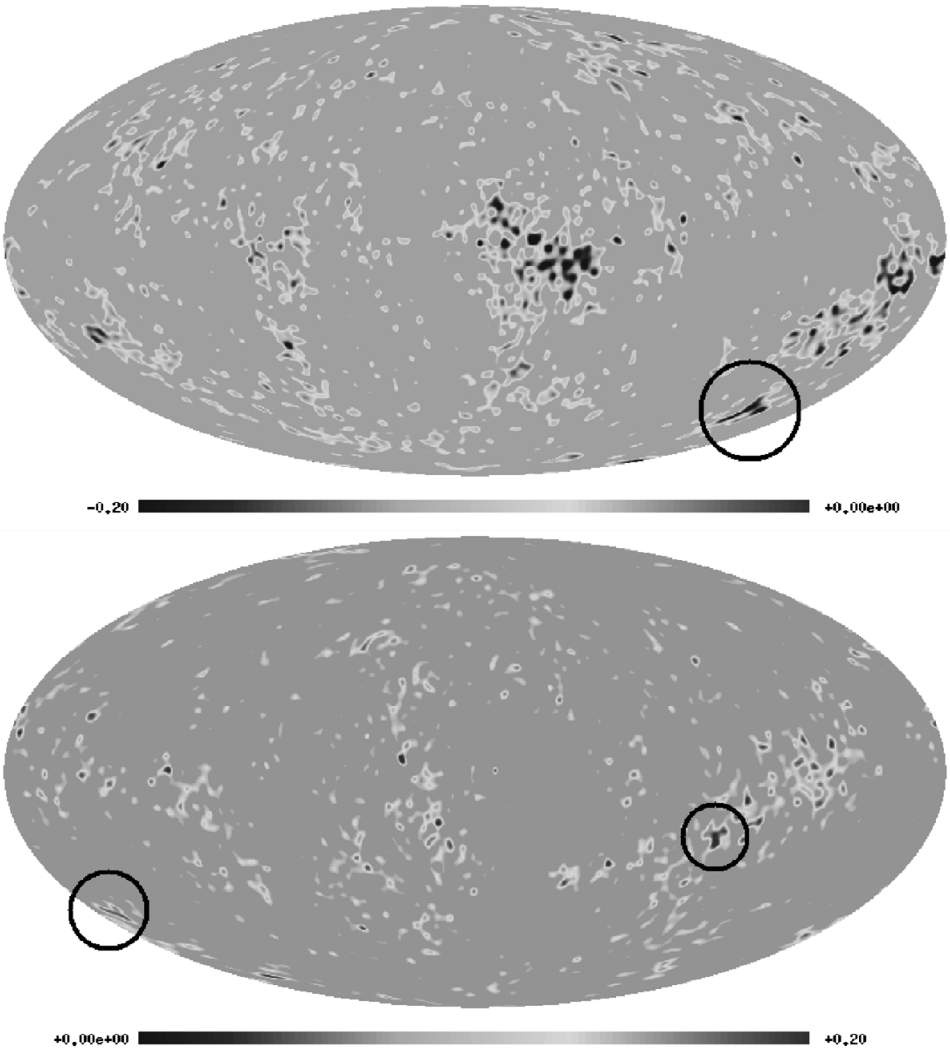


Рис. 1. Карта с отрицательными (вверху) и положительными (внизу) порогами $-0.2 \leq T \leq -0.05$ мК и $0.05 \leq T \leq 0.2$ мК для карты ILC III. На верхней карте окружность отмечает положение CS в Галактических координатах. На нижней карте окружности отмечают положительные пики высокой амплитуды.

2. "НАИВНОЕ" ОБНАРУЖЕНИЕ ХОЛОДНОГО ПЯТНА WMAP

Как указывалось во Введении, исторически CS было обнаружено в данных WMAP как один из самых глубоких минимумов в сигнале CMB с помощью основанного на вейвлетах метода. Наша первая цель — показать, что это Холодное Пятно может быть реально обнаружено совершенно непосредственно в пиксельном пространстве, применяя технику задания порогов. На рис. 1 мы устанавливаем два порога сигнала ILC III в диапазоне температур $-0.2 \leq \Delta T \leq -0.05$ и $0.05 \leq \Delta T \leq 0.11$ мК и отмечаем их цветовым (оттенками серого в черно-белом варианте) масштабом в диапазоне (–0.2, 0) и (0, 0.2) мК соответственно.

Из этого рисунка хорошо видна разница в статистических свойствах сигнала при положительных и отрицательных порогах карты. Во-первых, важно отметить, что большинство положительных пиков связано с площадкой вокруг $|b| \leq 25^\circ - 30^\circ$ (см. нижнюю часть рисунка), в то время как отрица-

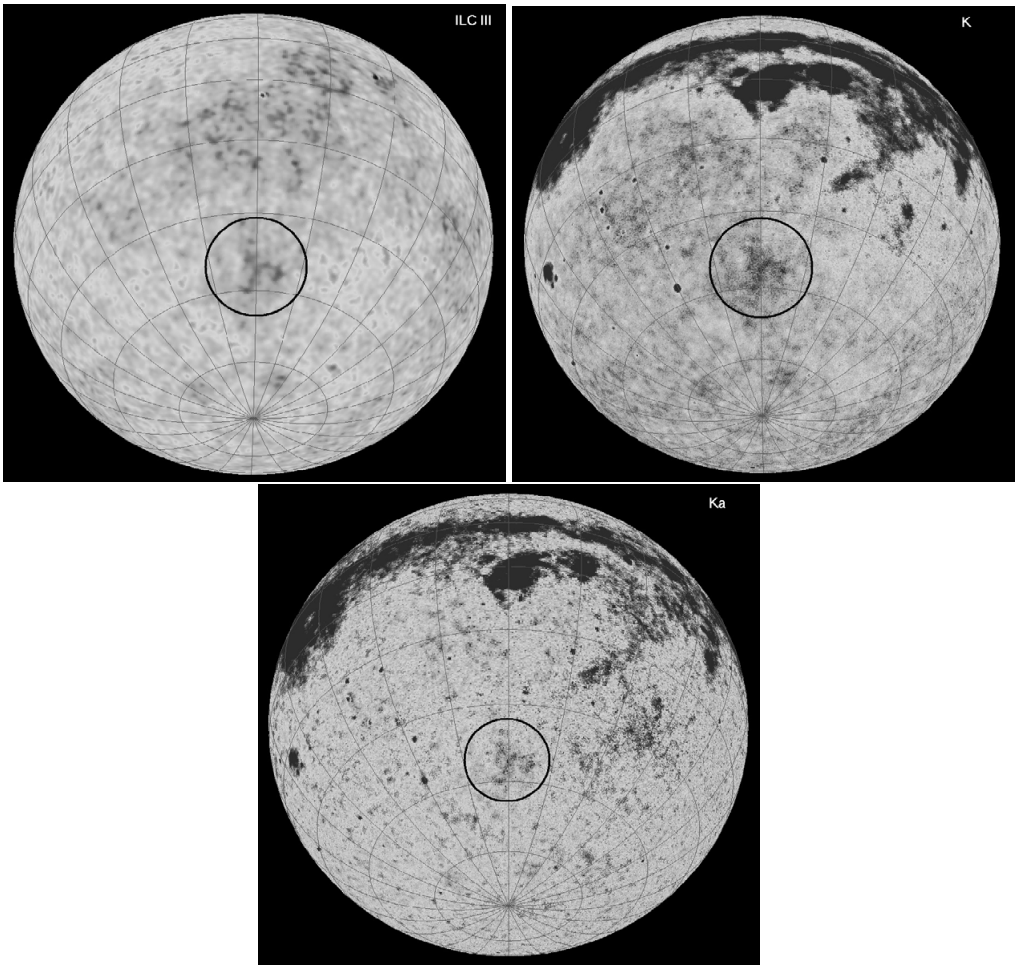


Рис. 2. Карты программы SkyViewer: вверху слева — ILC III, вверху справа — K-полоса, внизу — Ka-полоса WMAP с обрезанием до минимальных величин. На всех картах расположение зоны CS отмечено окружностью.

тельные пики ясно наблюдаются вне этой области карты. Во-вторых, амплитуда наиболее ярких положительных пиков ограничена уровнем 0.11 мК, в то время как отрицательные пики имеют амплитуду около −0.019 мК. Для Холодного Пятна температура отрицательного пика находится в согласии с оценкой из работы [4]. Используя программу SkyViewer, мы демонстрируем на рис. 2 карты ILC III, K–канала и Ka–канала, на которых CS располагается в центре области, отмеченной окружностью (группа холодных пиков внутри окружности). На K и Ka–картах можно видеть, что CS наблюдается даже без вычитания сигнала CMB. В согласии с [2, 13] мы отмечаем, что в данной области скорее расположен целый кластер отрицательных пиков, чем просто один минимум.

Чтобы показать структуру зоны, содержащей CS, мы даем на рис. 3 изображения с высоким разрешением ($\ell_{\max} = 100$) для внутренней структуры Холодного Пятна, а также карты Хаслама и др. на частоте 408 МГц [24], которая, как ожидается, свободна от "загрязнения" излучением CMB.

Из рис. 2 и 3 можно сделать важный вывод о том, что зона CS окружена зонами с горячими пятнами, отчетливо видимыми на рис. 2 точно с правой и левой сторон Холодного Пятна.

Если происхождение CS имеет отношение к модуляции на больших угловых масштабах карты CMB и возможной анизотропии распределения мощности вдоль неба, то естественно было бы ожидать, что дополнительно к CS в данных WMAP [1]

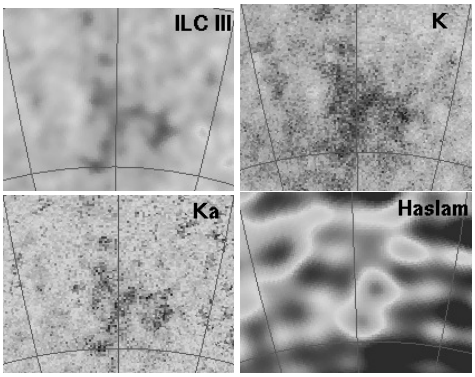


Рис. 3. Отдельная проекция зоны CS для карт ILC III, K, Ka и из работы Хаслама и др. [24] Размер всех карт $25^\circ \times 25^\circ$.

мы могли бы обнаружить и другие холодные и горячие пятна со схожими морфологическими свойствами. Чтобы это продемонстрировать для карт WCM и ILC III, в следующем разделе мы применим к ним кластерный анализ выделения возможных зон с пекулярным распределением кластеров в сигнале.

3. КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КАРТ CMB В ОКРЕСТНОСТИ CS

Основная идея кластерного анализа заключается в разделении сигнала CMB со всего неба на зоны над и под маской Kp0 и представлении его в виде широтных колец, а затем в анализе свойств сигнала в каждом кольце отдельно. Сначала коротко опишем статистические свойства сигнала $T(\theta = \theta_c,\varphi)$ для заданной широты b. Рассмотрим распределение пиков выше и ниже некоторого заданного порога $\nu_t = \Delta T/\sigma_0$, где σ_0 — стандарт для каждого кольца. Для одномерного сечения карты CMB мы вводим определение кластера максимумов, рассматривая, например, две точки x_1 и x_2 ($x_1 < x_2$) из кольца. Если для всех точек в интервале $x_1 \le x \le x_2$ выполняется $\Delta T(x) > \nu_t\sigma_0$, то будем называть такие точки x_1,x_2 связанными друг с другом по отношению к порогу ν_t. Вообще, набор максимумов для ΔT, расположенный в точках $\{x_k\}$,$k = \overline{1,K}$, мы назовем кластером длины D, если все точки $\{x_k\}$ являются связанными друг с другом, когда используется порог ν_t[1]. Длина кластера $D = |x_1 - x_2|/2\pi$ является аналогом определения двумерной площадки [4], но для одномерного случая. Для случайного гауссова поля статистика длины кластеров (одномерных) и площадки (двумерной) является одинаково чувствительной к спектральным параметрам случайного поля, как описано в [25]. Тем не менее, различие между статистикой кластерного анализа кольца и площадки становится очевидным в приложении к негауссовым случайным полям. Предположим временно, что некоторая зона в сигнале характеризуется статистикой площадки, и она очень негауссова. Чтобы охарактеризовать свойства негауссова поля, очень важно знать, относится ли эта площадка к равномерной структуре с одним пиком или она сформирована кластером пиков с такой площадью. Поэтому в нашем исследовании статистических свойств карт мы предпочитаем кластерный анализ (CA). В нашем анализе в дополнение к длине кластера D, мы будем использовать его размер S, который определим как число максимумов (или минимумов) выше (или ниже) порога ν_t с интервалом длины $D = |x_1 - x_2|/2\pi$.

3.1. Статистические свойства сигнала в заданном широтном кольце

Чтобы описать статистические свойства сигнала широтного кольца, мы используем подход из работы [26].

Стандартная обработка сигнала $T(\theta,\varphi)$ на полном небе проводится с помощью разложения по сферическим гармоникам:

$$T(\theta,\varphi) = \sum_{\ell=0}^{\ell_{\max}} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\varphi), \qquad (1)$$

где θ и φ — полярный и азимутальный углы соответственно, и $a_{\ell m}$ — коэффициенты при сферических гармониках $Y_{\ell m}$. Сферические гармоники определяются в терминах полиномов Лежандра и плоских волн:

$$Y_{\ell m}(\theta,\varphi) = N_{\ell m} P_\ell^m(\cos\theta)\exp(im\varphi), \qquad (2)$$

где

$$N_{\ell m} = (-1)^m \sqrt{\frac{(2\ell+1)(\ell-m)!}{4\pi(\ell+m)!}}. \qquad (3)$$

Для случайного гауссова распределения сигнала CMB по небу свойства статистического ансамбля реализаций полностью определяется спектром мощности

$$C(\ell) = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} \langle |a_{\ell,m}|^2 \rangle, \qquad (4)$$

в то время как для единственной реализации мы ожидаем найти некоторое отклонение от $C(\ell)$,

[1] Аналогичное определение можно ввести для кластера минимумов, когда вместо максимумов используются минимумы ΔT.

обусловленное эффектом "космической вариации" ("cosmic variance"). Ниже мы используем полярную систему координат, в которой Галактическая плоскость ($b = 0$) задается полярным углом $\theta = \pi/2$.

Проанализируем сигнал $T(\theta_c,\varphi)$ из широтного кольца $\theta = \theta_c$, где $|\theta_c| \geq |\theta_{\rm mask}|$, $|\theta_{\rm mask}|$ является максимальной широтой для любой маски фона. Это кольцо $T(\theta_c,\varphi) \equiv T_c(\varphi)$ является одномерным сигналом, для которого можно построить Фурье-преобразование с коэффициентами g_m:

$$T_c(\varphi) = \sum_{m=-\ell_{\rm max}}^{\ell_{\rm max}} g_m \, \exp(im\varphi), \qquad (5)$$

где

$$g_m = \int_0^{2\pi} d\varphi \, T_c(\varphi) \, \exp(-im\varphi). \qquad (6)$$

Тогда можно отнести кольцо ко всему небу с помощью (1) и (5) и получить

$$g_m = \sum_{\ell \geq |m|}^{\ell_{\rm max}} N_{\ell m} \, P_\ell^m(\cos\theta_c) \, a_{\ell m}. \qquad (7)$$

Надо сказать, что Фурье-коэффициенты g_m для кольца могут быть выражены через комбинацию коэффициентов $a_{\ell m}$ для полного неба. Определяя вариацию сигнала для широтного кольца как

$$VarT = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \, [T(\varphi) - \langle T \rangle]^2 \,,$$
$$\langle T \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi T(\varphi) \qquad (8)$$

и подставляя (5) в (8) мы имеем

$$\langle T \rangle = \sum_\ell N_{\ell,m=0} P_\ell(\cos\theta) a_{\ell,m=0},$$
$$VarT = \sum_\ell \sum_{\ell'} \sum_{m\neq 0} N_{\ell,m} N_{\ell',m} P_{\ell,m}(\cos\theta) \times P_{\ell',m}(\cos\theta) a_{\ell,m} a^*_{\ell',m}. \qquad (9)$$

Для случайного гауссова поля (Gaussian random field — GRF) после усреднения всех реализаций комбинации $a_{\ell m}$-коэффициентов в (9) удовлетворяют следующим условиям:

$$\langle a_{\ell,m} a^*_{\ell',m'} \rangle = C(\ell) \delta_{\ell,\ell'} \delta_{m,m'} \qquad (10)$$

и тогда

$$VarT = \sum_\ell \sum_{m\neq 0} N^2_{\ell,m} P^2_{\ell,m}(\cos\theta) C(\ell) = \sum_\ell W(\ell, \cos\theta) C(l) \qquad (11)$$

где $W(\ell, \cos\theta) = \sum_{m\neq 0} N^2_{\ell,m} P^2_{\ell,m}(\cos\theta)$ есть функция окна для кольца.

Наш подход является особым случаем для хорошо известного теоретического предсказания: любые n-мерные сечения N-мерного гауссова случайного сигнала дают также гауссовый сигнал. Тем не менее, эта универсальная теория говорит нам о GRF, представленном наборами реализаций. Для одной единственной реализации неба CMB, которая имеется у нас в случае сигнала WMAP, (11) больше не пригодно. В более общем случае вместо (11) мы имеем

$$a_{\ell,m} a^*_{\ell',m'} = C(\ell) G^{m,m'}_{\ell,\ell'}, \; \langle G^{m,m'}_{\ell,\ell'} \rangle = \delta_{\ell,\ell'} \delta_{m,m'} \,. \qquad (12)$$

Таким образом,

$$VarT = \sum_\ell \sum_{\ell'} \sum_{m,m'\neq 0} N_{\ell,m} N_{\ell',m'} P_{\ell,m}(\cos\theta) \times P_{\ell',m'}(\cos\theta) C(l) G^{m,m'}_{\ell,\ell'},$$
$$W(\ell, \cos\theta) = \sum_{\ell'} \sum_{m\neq 0} N_{\ell,m} N_{\ell',m'} \times P_{\ell,m}(\cos\theta) P_{\ell',m'}(\cos\theta) G^{m,m'}_{\ell,\ell'}. \qquad (13)$$

Матрица $G^{m,m'}_{\ell,\ell'}$ описывает связь между различными модами ℓ,m and ℓ',m' для случайного процесса $T(\varphi)$, который приводит к вариациям дисперсии $VarT(\theta)$ в различных кольцах ($\theta = const$). Можно видеть, что интегрирование (13) по θ предотвращает спонтанные корреляции ($G^{m,m'}_{\ell,\ell'} \neq \delta_{\ell,\ell'} \delta_{m,m'}$) даже на всем небе. Однако для отдельного кольца у нас будет дополнительная модуляция этих корреляций, зависящая от θ через функцию окна $W(\ell, \cos\theta)$. На рис. 4 мы показываем зависимость $VarT$ от галактической широты для карт WCM и ILC III.

Сначала подчеркнем заметную схожесть этих карт вне области маски Kp0. Более того, вариация карты WCM в каждом кольце соответствует вариации ILC III почти точно для всех широт, исключая зону $|b| \leq 5^\circ$. Второе, заметим, что кольцо $b = -57^\circ$ лежит возле локального максимума вариации. Ширина этой зоны около 10°. Третье, из рис. 4 можно ясно видеть асимметрию вариации для колец, расположенных в Северной и Южной полусферах. Чтобы охарактеризовать эту асимметрию, мы вводим следующий параметр

$$A(x = \cos\theta) = \frac{VarT(-\cos\theta) - VarT(\cos\theta)}{VarT(\cos\theta) + VarT(-\cos\theta)} \qquad (14)$$

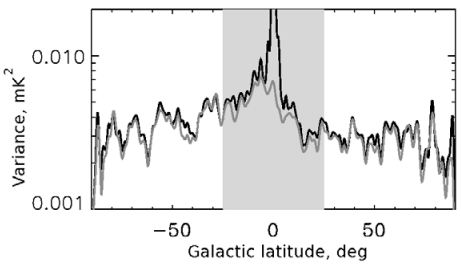


Рис. 4. Вариация карты WCM (черная толстая линия) и ILC III (серая тонкая линия) в зависимости от галактической широты. Вертикальная полоса в центре рисунка отмечает область Галактики.

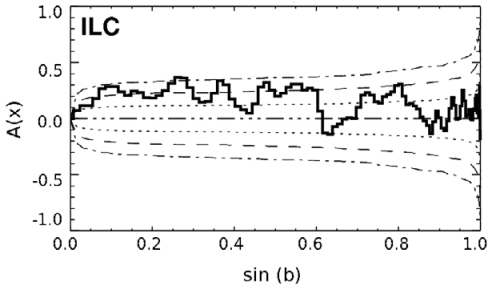


Рис. 5. Параметр асимметрии $A(x)$ в зависимости от $\sin(b)$ для колец ILC III и для 1000 реализаций GRF CMB. Пунктирная, штриховая и штрих–пунктирная линии соответствуют порогам 68%, 95% и 99%.

где $VarT(\cos\theta)$ — вариация сигнала для кольца с полярной координатой θ.

На рис. 5 мы показываем поведение параметра асимметрии $A(x)$ в зависимости от $\sin(b)$ при сравнении с такими же параметрами, полученными для 1000 реализаций GRF CMB. Не требуется дополнительного анализа, чтобы увидеть, что вариация сигнала в Южном полушарии выше, чем в Северном. Этот результат согласуется с исследованиями ассиметрии мощности для 10° участков неба [22] и анализом статистики пиков [23]. Более того, изучая рис. 4 на $b = -25°$ ($\sin(-25°) = -0.42$), можно найти глобальные максимумы вариаций вне маски Kp0. Эта зона ясно наблюдается на рис. 1 прямо ниже Галактической плоскости как большой кластер минимумов, отмеченный Парком [27]. Может ли происхождение этого кластера быть таким же как и кластера вокруг CS? Чтобы ответить на этот вопрос, нам необходимо внимательно посмотреть свойства сигнала для кольца $b = -57°$ в азимутальном направлении. Отметим, что этот подход близок к методу Ериксена и др. [22], когда небесная сфера разделяется на зоны с характерным масштабом (диаметром) около 10°, после чего для каждой зоны мощность сигнала используется, чтобы охарактеризовать различие между ними. В нашем подходе, мы частично используем метод Ериксена, разделяя небесную сферу на широтные круги, и затем, анализируя морфологию сигнала для каждого кольца, мы пытаемся найти возможный источник пекулярности сигнала. Из рис. 5 ясно видно, что кольца на широтах $|\sin(b)| > 0.82$ ($b > 55°.1$) характеризуются величинами параметра асимметрии $A(x) \leq 0.2$. Тем не менее, маленькие значения этого параметра свидетельствуют о том, что распределение вариации для каждого кольца в зависимости от галактической широты почти симметрично по отношению к Галактической плоскости. Таким образом, CS, обнаруженное на широте $b = -57°$, могло бы иметь "симметричного партнера" в кольце $b = 57°$, или, по крайней мере, морфология сигнала для этих колец могла бы быть близка, чтобы дать почти одинаковую дисперсию $VarT(b = -57°) \simeq VarT(b = 57°)$, и $A(x) \leq 0.2$.

3.2. Кластеры на кольце $b = -57°$

В этом разделе мы уделим внимание азимутальному распределению сигнала для широтного кольца $b = -57°$, которое содержит CS. На рис. 6 мы приводим $T(\theta_c, \phi)$ для карт WCM и ILC III, сглаженных до углового масштаба $\Theta_c = 1°$. Этот рисунок ясно демонстрирует, что нет значительной разницы между морфологией CS в этих картах. Отметим, что команда WMAP указала на то, что карта ILC пригодна для научного анализа только для мультипольных моментов $\ell \leq 10$. Как видно из рис. 6, для кольца на $b = -57°$ нет значительной разницы между картами ILC III и WCM. Эта тенденция устойчива и для других колец вне маски Kp0. Поэтому мы будем далее использовать карту ILC III как индикатор феномена CS. Весь анализ, представленный в работе, проведен для карты WMAP ILC III в комбинации с картой WCM, и мы не находим значимой разницы между ними.

В последующем анализе мы используем Галактическую координатную систему, в которой Галактический центр имеет широту $\phi = 0$ и ϕ отсчитывается по часовой стрелке до величины $\phi = 360°$. Пикселизация GLESP позволяет нам зафиксировать одно и то же число пикселов для каждого широтного кольца ($N = 2048$) и, следовательно, положение каждого пиксела $0 \leq k \leq N$ характеризуется углом ϕ_k как $\phi_k = 2\pi k/N$.

На рис. 6 CS ясно проявляется при $k \simeq 1130 \ldots 1224$ как кластер минимумов (C10, $n = 10$) для сигнала в картах WCM и ILC III,

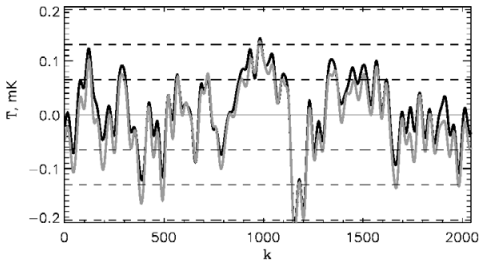


Рис. 6. Распределение температуры T в зависимости от номера пиксела k одномерного кольца, проходящего через центр CS ($b = -57^\circ$) в азимутальном направлении. Толстая линия соответствует сигналу WCM, серая линия — карте ILC III. Все карты сглажены до углового масштаба $\Theta_c = 1^\circ$. Для данного кольца $\sigma_0 = 0.0651$ мК. Пунктирными линиями отмечены пороги $|\nu_t| = 1{,}2{,}3$.

а также видно, что нет значимой разницы между этими двумя сигналами как для всего кольца, так и для области CS. рис. 7 демонстрирует распределение длин кластеров $D(n)$ в зависимости от номера кластера. Кластеры максимумов показаны черным, минимумов — серым. Как можно видеть из рис. 7, в сечении находятся 17 кластеров максимумов и 17 кластеров минимумов. Средняя длина кластеров максимумов карт ILC и WCM $\langle D^+_{\rm ilc}(n)\rangle \simeq 0.0337$, в то время как для кластеров минимумов мы имеем $\langle D^-_{\rm ilc}(n)\rangle \simeq 0.0256$. Для сравнения, после применения 1000 реализаций GRF для спектра мощности WMAP, соответствующего космологической модели ΛCDM, мы нашли $\langle D^+_{\rm grf}(n)\rangle \simeq 0.0303$ и $\langle D^-_{\rm grf}(n)\rangle \simeq 0.0315$. Вспомним, что в одномерном случае статистика в площадке, используемая в [4] для двумерного случая и предложенная выше статистика длин, эквивалентны. Тем не менее, чтобы оценить функцию распределения вероятности $P(D)$ для кластеров при $\nu_t = 0$ и получить длину D внутри интервала $D - \delta D \ldots D + \delta D$, мы делаем численное моделирование, используя 1000 реализаций GRF CMB. В частности, для каждой реализации мы учитывали, что длина каждого кольца на соответствующей широте θ перемасштабирована с фактором $|\sin\theta|$, который перенормирует длину кластера в каждом кольце. Затем мы сосчитали число кластеров длиной D и получили функцию распределения $P(D)$. Для $D > \langle D\rangle$ функция $P(D/\langle D\rangle)$ имеет гауссову форму $P(D) \propto \exp(-0.5(D/\langle D\rangle)^2)$, и соответствующая вероятность получить кластер длиной $D/\langle D\rangle \simeq 3-4$ — около $0.00033 - 0.011$. Для кольца с $\theta = \pi/2$ полное число кластеров равно 40 (для выбранного разрешения карты $\Theta = 1^\circ$), и существование единственного кластера с $D/\langle D\rangle \sim 3$ вполне возможно. Тем не менее, вероятность, что два или даже три кластера с $D/\langle D\rangle > 3$ для одного кольца меньше 0.016 (для двух кластеров с $D/\langle D\rangle = 3$) и меньше 0.005 для трех кластеров с такой же длиной. Для $D/\langle D\rangle > 4$ соответствующая вероятность найти два кластера меньше 2×10^{-4}. Заметим, что наши модели основаны на GRF для карты CMB, в которой в общем воспроизводится статистически однородный и изотропный случайный гауссовый процесс. Как было показано в разделе 3.1, карта ILC III уже статистически пекулярна. Поэтому модель GRF CMB не является совсем адекватной картам WMAP ILC III и WCM и соответствующая оценка статистических свойств этих сигналов нуждается в учете тенденции отклонения от гауссовости скорее, чем строгое ее свидетельство. В разделе 4 мы обсудим некоторые из возможных следствий анизотропии мощности, обсуждаемой в разделе 3.1 и их влияние на свойства зоны CS.

Возвращаясь к анализу CS, мы хотели бы напомнить что кластер C10, содержащий CS, имеет длину $D_{\rm CS} = 0.0459 \simeq 1.5\langle D^-_{\rm grf}(n)\rangle$, а его размерность $D^- = 2$ при $\nu_t = 0$. В то же время $D_{\rm CS}/\langle D^-_{\rm ilc}(n)\rangle \simeq 1.8$ при $\nu_t = 0$. Эти отношения говорят нам, что данный кластер выглядит как "обычный", определяемый порогом $\nu_t = 0$ без какого-либо значительного отклонения от статистических свойств случайного гауссова поля. Тем не менее, экстраординарные свойства этого кластера становятся очевидными, когда рассматриваются другие пороги $-3 \le \nu_t \le -2$. Из рис. 7 мы можем увидеть, что для диапазона ν_t кластер все еще существует как кластер минимумов на уровне $\nu_t = -3$ и как кластер локальных максимумов на уровне $\nu_t = -2$. Новиков и Йоргенсен [21] показали, что для кластера минимумов с $d^- = 2$ условная вероятность $P(k_1, k_2)$ найти два отрицательных пика, локализованных в точках k_1 и k_2 в этом кластере, меньше, чем условная вероятность найти один максимум между этими точками с высотой пика выше ν_t. В нашем случае этот порог $\nu_t \simeq -2$ и $P(k_1, k_2) \le 0.02$. Заметим, что условная вероятность $P(k_1, k_2)$ была найдена теоретически в работе [21] для случайного гауссова поля. Практически, чтобы доказать это ожидание, мы рассмотрели 1000 реализаций карт CMB всего неба, полученных с помощью случайного гауссового генератора, и зафиксировали только те из экстремумов (минимумы и максимумы), которые превышают порог 2σ. Затем из этих экстремумов мы выбирали только те, которые имеют структуру кластера с двумя максимумами и единственным минимумом между ними (или два минимума и локальный максимум между ними) с амплитудой соответствующего минимума или максимума $\nu_m \ge 2\sigma$, где σ^2 — дисперсия сигнала CMB для каждой реализации сигнала

CMB со всего неба. Угловое разрешение карт GRF CMB соответствует 1°, а спектр мощности CMB $C(\ell)$, используемый для генерации ансамбля реализаций, соответствует WMAP ΛCDM космологической модели [28]. Мы нашли, что у 38 (17 минимумов и 21 максимум) реализаций из 1000 имеется подобная CS морфология для частично изолированных зон. Однако ни в одной из этих 38 реализаций пятна не окружены положительными (или отрицательными) кластерами с размерностью 4 или 5. После обнаружения изолированных зон с морфологией, подобной CS, мы выделили одномерные сечения карты, проходящие через эти зоны, чтобы сравнить свойства одномерного скана и кольца на широте $b = -57°$ из карты ILC. Ни инструментальный шум, ни профиль диаграммы направленности не учитывались. Наша мотивация использования этой простейшей модели заключается в том, что характерный масштаб CS, упоминаемый в [2, 4] составляет около 10°. Для таких угловых масштабов вклад инструментального шума и влияние формы диаграммы направленности слишком малы, чтобы воздействовать на свойства сигнала в окружении CS. Более того, структура CS практически такая же, как для данных WMAP первого, третьего и пятого года представления, в которых инструментальный шум различается значительно. Мы планируем обобщить наш анализ в отдельной работе, включив упомянутый инструментальный шум и форму диаграммы.

Возвращаясь к анализу CS, мы хотели бы указать, что кластер у CS не является уникальной особенностью кольца $b = -57°$. Имеются еще два кластера максимумов (см. рис. 6), а именно, кластер C9 с $k_{\min} = 825$ и $k_{\max} = 1129$ с $D_{C9} = 0.15 = 4.40\langle D^+_{ilc}(n)\rangle$ и кластер C11 с $k_{\min} = 1310$, $k_{\max} = 1634$ и $D_{C11} = 0.15 = 4.69\langle D^+_{ilc}(n)\rangle$. Здесь $k_{\min}$, $k_{\max}$ отмечают координаты кластера при $\nu_t = 0$ в пиксельном домене. Эти кластеры, видимые на рис. 7, лежат возле кластера минимумов C10, внутри которого находится и CS.

Существование таких кластеров с длинами больше $4\langle D^+_{\rm ilc}(n)\rangle$ и кластера минимумов C10 с такой большой амплитудой (отрицательной) кажется совершенно пекулярным на широте кольца $b = -57°$. Тем не менее, эти особенности не уникальны. Чтобы показать, что "сверхкластеризация" сигнала CMB со всего неба является типичной особенностью сигнала, проверим, например, кольцо на широте $b = +57°$, расположенное симметрично кольцу $b = -57°$ относительно Галактической плоскости. На рис. 8 мы показываем $T(k)$ и распределение кластеров в зависимости от их длины в кольце на широте $b = 57°$. Сигнал обнаруживает замечательную схожесть с морфологией кольца на широте $b = -57°$.

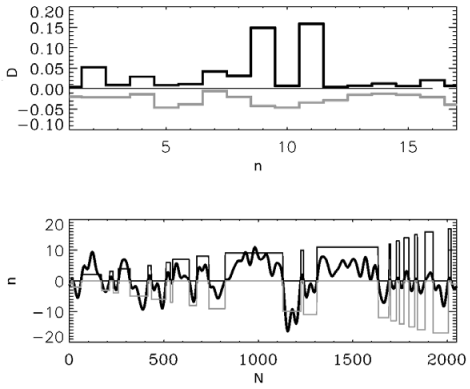


Рис. 7. Вверху: длина $D(n)$ кластеров с $\nu_t = 0$ в зависимости от номера кластера: линия положительных значений — для кластеров максимумов, линия отрицательных значений — минимумов. Нижний график: номер кластера в зависимости от его положения в пиксельном пространстве (2048 пикселов соответствуют 360° по азимуту). Толстая линия показывает распределение сигнала в одномерном кольце карты ILC III, проходящее через CS, в единицах $5 \times T_k/\sigma_0$. Отрицательный знак для $D^-(n)$ показывает длину кластеров минимумов.

Так же как и кольцо, содержащее CS, кольцо на $b = 57°$ характеризуется очень высоким уровнем кластеризации, существованием минимума на уровне 3σ как члена кластера с $D^- = 4$ и существованием положительного кластера с $D^+ = 6$. Более того, можно увидеть, что кластер максимумов C7 при $k_{\min} = 547$, $k_{\max} = 633$ имеет структуру, схожую со структурой сигнала в CS, но для максимумов.

В конце этого раздела мы хотели бы отметить, что существование кластеров длиной $D > 3\ldots4\langle D\rangle$ является очень редким событием для GRF. Существование трех кластеров с $D \sim 3\langle D\rangle$ для одного широтного кольца на $b = 57°$ и двух кластеров с $D > 4\langle D\rangle$ для $b = -57°$ так же, как и для CS, позволяет нам заключить, что карты ILC и WCM в основном "сверхкластеризованы". Внимание на CS было сфокусировано в основном по причине *амплитуды* сигнала в этой области. Более специфичная особенность CS не в этом, а в том, что зона CS реально является кластером пиков с почти одинаковой амплитудой, а также, что существует очень большой кластер возле этой зоны.

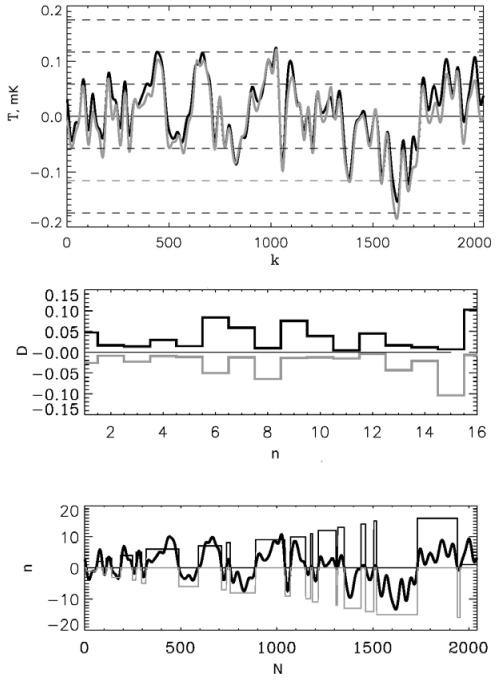


Рис. 8. То же, что и на рис. 6 и 7, но для кольца с $b = 57^\circ$.

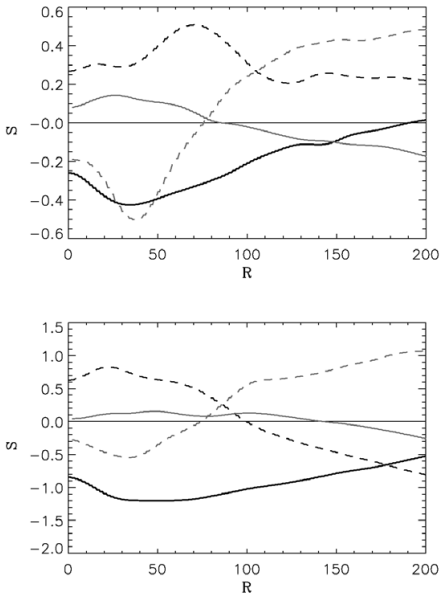


Рис. 9. Вверху: асимметрия и эксцесс для кольца $b = -57^\circ$ на карте ILC III. Сплошная черная и штриховая черные линии соответствуют асимметрии и эксцессу сглаженной части сигнала ILC III $\overline{S}(k,R)$. Серые линии — сигналу s_k. Внизу: то же, что и вверху, но для зоны кольца $k_{\min} = 825, k_{\max} = 1634$.

4. "ДЕКЛАСТЕРИЗАЦИЯ" ILC III И WCM ЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

В этом разделе мы перепроверим идею Круза и др. [4] о том, что происхождение CS может быть объяснено, если сигнал WMAP CMB содержит негауссовы компоненты в комбинации с гауссовыми. Эта идея кажется совершенно естественной, так как низкомультипольная часть карты ILC WMAP показывает значительные пекулярности сигнала: выравнивание квадруполя и октуполя друг относительно друга, связь с галактическими фонами, низкую мощность квадруполя и так далее. Заметим, что команда WMAP представила анализ гауссовости сигнала CMB, вычтя из карты компоненты до десятого мультиполя и объявив, что остаточный сигнал находится в согласии с гауссовой статистикой. Однако асимметрия мощности CMB, открытая в работе [22], существование CS, а также другие пекулярности, упоминаемые в [30,31], поднимают вопрос о том, существует ли какой-нибудь признак негауссовых особенностей, локализованных по большей части в низкомультипольном диапазоне спектра мощности.

Если WMAP CMB вне Галактической маски $|b| = 25^\circ$ представляет собой сумму гауссовой и негауссовой компонент, кажется естественным, что эти два сигнала могут иметь различные характерные масштабы. Идея, которую мы развиваем ниже, заключается в том, чтобы применить линейный фильтр для сигнала CMB в каждом кольце карты с переменным масштабом фильтрации R, который разделяет сигнал CMB на две части: $S(k) = \overline{S}(k,R) + s(k)$, где $s(k)$ соответствует гауссовой компоненте, а $G(k) = \overline{S}(k,R)$ — негауссовой. Заметим, что Круз и др. [4] используют подход, основанный на вейвлетах, для описания такого анализа. Мы вместо него применим фильтр со скользящим окном, определяемым в пиксельном пространстве как

$$\overline{S}(k,R) = \langle T_k \rangle = \frac{1}{R} \sum_{j=0}^{R-1} T_{k+j-\frac{R}{2}},$$
$$j = [\frac{R-1}{2}, \dots N_{pix} - \frac{R+1}{2}]$$
$$s_k = T_k - \langle T_k(R) \rangle. \qquad (15)$$

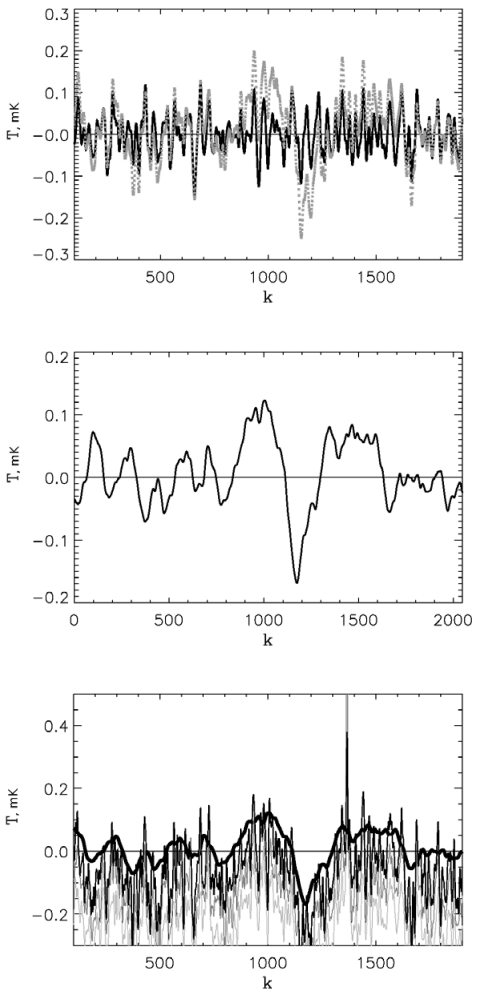


Рис. 10. Вверху: кольцо ILC III на широте $b = -57°$ до демодуляции (серые точки) и после (черная линия). В середине: сигнал ILC III, сглаженный с $R = 70$ пикселами (соответствующий угловой масштаб $\Delta\phi = 12.3°$.) Внизу: сглаженный сигнал ILC (толстая черная линия) в сравнении с сигналами от Ka (тонкая черная линия), Q (темно-серая линия) и V полосы (светло-серая линия).

Отметим, что выбор линейного фильтра не является слишком важным для критерия разделения гауссова и негауссова хвостов сигнала. Можно, например, использовать гауссовый фильтр $\overline{S}(k) \propto \sum_j T_j \exp\left(-(k-j)^2/R^2\right)$ или любой другой допустимый фильтр. Важным является выбор критерия масштаба R. Следуя [9], мы используем асимметрию (skewness) и экцесс (kurtosis) сигнала s_k как функции R, старясь минимизировать разницу между их реальными величинами и наиболее вероятными величинами для GRF.

На рис. 9 мы показываем асимметрию и эксцесс для кольца ILC III на широте $b = -57°$ для различных масштабов фильтрации R.

Асимметрия и эксцесс очень чувствительны к выбору зоны кольца. Например, если мы исследуем зону $k_{\min} = 825$,$k_{\max} = 1634$, занятую кластерами C^+9,C^-10,C^+11, мы получаем асимметрию и эксцесс, показанные на рис. 9 (нижний график). Из этих двух графиков можно увидеть, что величина параметра $R \simeq 70$ является предпочтительной для такого анализа. Для этого масштаба фильтрации эксцесс сглаженного сигнала достигает максимума, в то время как для гауссова хвоста полного сигнала обе характеристики близки к нулю как для всего кольца, так и для отдельной зоны вокруг CS. На рис. 10 показан сигнал ILC III до (серая пунктирная линия) и после вычитания сглаженных с $R \simeq 70$ пикселов (черная линия). Можно видеть, что CS исключено.

Тем не менее, из среднего графика рис. 10 мы можем видеть, что CS, так же, как и все крупные кластеры, возникает при сглаживании сигнала, который сохраняет все негауссовы особенности, упоминаемые в предыдущем разделе, включая CS. Нижний график на рис. 10 показывает более значительно пекулярную особенность зоны CS. Прямо на краю CS можно увидеть яркий точечный источник. Амплитуда этого источника около $50\sigma_{\rm cmb}$ для полосы K, и она спадает до $6\sigma_{\rm cmb}$ для V и W полос. На рис. 11 мы показываем этот точечный источник в полосах Ka и W. Для карт ILC III и WCM остаточный сигнал от этого источника ассоциируется с локальным максимумом на уровне $1\sigma_{\rm cmb}$.

5. ЕСТЬ ЛИ ДРУГИЕ “ХОЛОДНЫЕ” ИЛИ “ГОРЯЧИЕ” ПЯТНА?

Этот вопрос кажется одним из наиболее важных для полного анализа происхождения CS. Имеем ли мы только одну единственную пекулярную зону на карте CMB или таких зон с негауссовыми свойствами сигнала больше? Чтобы ответить на этот вопрос, мы предлагаем использовать распределение вариации сигнала CMB в зависимости от широты, показанное на рис. 4. Остановимся на Южном полушарии и, в частности, на точках максимума вариации. Мы можем видеть следующие полярные расстояния точек максимумов: $\theta = -80°, -70°, -57°, -30°$. Для колец на таких широтах мы повторили тот же анализ, что и для кольца на $b = -57°$. Все сечения показывают существование негауссовых особенностей, ко-

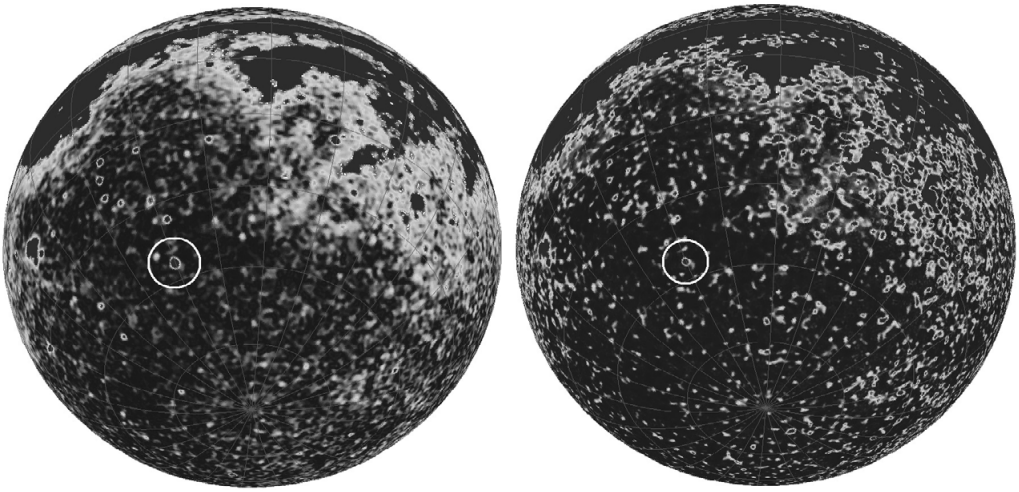


Рис. 11. Сигнал в полосе Ka (слева) и W (справа) в Южном полушарии. Кольцом отмечено положение точечного источника на краю CS.

торые могут быть отождествлены таким же методом, что был применен для кольца с $b = -57°$. На рис. 12 мы демонстрируем сигнал для кольца с $b = -70°$. Негауссово горячее пятно ясно видно при $k \sim 850$ (соответствующие Галактические координаты $b = -70°$, $\phi = 149°$). Амплитуда пика около $4.8\sigma_o$, и он является членом кластера с $d^+ = 6$ для $\nu_t = 0$. Из рис. 12 можно увидеть оптимальный размер масштаба фильтра $R \simeq 50$.

Рисунок 13 демонстрирует такие же характеристики сигнала, как и предыдущий, но для кольца с $b = -30°$. Характерный масштаб фильтра около $R = 70$ пикселов. Можно продолжить поиск других колец в Южном полушарии, просто следуя распределению максимумов вариации из рис. 4. Но возникает вопрос, можем ли мы найти такие же особенности сигнала в Северном полушарии, где наблюдается дефицит мощности вариаций? В разделе 3 мы уже упоминали, что кольцо с $b = 57°$ на самом деле обнаруживает сверхкластеризацию. Посмотрим поближе на асимметрию и эксцесс для этого кольца и найдем характерный масштаб негауссовости. Интересно, что для кольца с $b = 57°$ асимметрия и эксцесс, показанные на рис. 14, имеют очень близкие к гауссовым характеристики, в то время как для зоны $k_{\min} = 1520$, $k_{\max} = 1940$ с кластерами C^-15,$k_{\min} = 1520$, $k_{\max} = 1731$ и C^+16, $k_{\min} = 1732$, $k_{\max} = 1940$ мы можем ясно увидеть два минимума у демодулированного сигнала, один при $R = 20$ и другой при $R = 70$.

Тем не менее, мы подчеркиваем, что для полного кольца на широте $b = 57°$ даже без фильтрации асимметрия и эксцесс близки к GRF, в отличие от, например, кольца $b = -57°$. Более того, увеличение масштаба R приводит в результате к бóльшим отклонениям от гауссовости, как видно из рис. 14. Эта тенденция является общей для кольца $b = 72°$ (точка локального минимума вариаций), также как и для кольца $b = 78°$ (точка локального максимума вариации на рис. 4). Таким образом, значительная негауссовость карт ILC III и WCM характерна в основном для Южного полушария и связывается с большими угловыми масштабами: около 9°–12°.

Чтобы показать, что кластеризация экстремумов сигналов ILC III и WCM — типичная особенность мофологии, мы приводим на рис. 15 карту ILC III в проекции, видимой из Северного и Южного галактических полюсов. В кольце на широте $b \simeq 80°$ можно легко найти большой кластер максимумов и еще один большой кластер почти на той же широте. Для Южного полюса зона CS связывается с тремя большими кластерами максимумов.

В конце этого раздела мы хотели бы привести еще один аргумент, что сверхпикселизация в картах WCM и ILC III может иметь отношение к пекулярным свойствам сигнала WMAP при низком угловом разрешении. В частности, покажем, что меняя свойства первых 10 гармоник сигнала, можно легко убрать негауссовость CS. Чтобы продемонстрировать это, рассмотрим коэффициенты $a_{\ell m}$ для карты ILC III для $\ell \leq 10$ и заменим их случайными коэффициентами $a_{\ell m}^{\rm rand}$, полученными

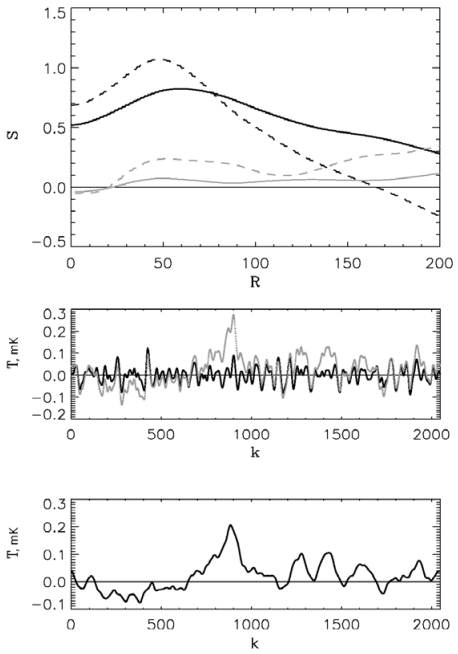


Рис. 12. Вверху: асимметрия и эксцесс для полного кольца с $b = -70°$. Обозначение линий такое же, как и на рис. 9 (вверху). Посередине: кольцо ILC III с $b = -70°$ до демодуляции (серые точки) и после нее (черная линия). Внизу: сигнал ILC III, сглаженный по $R = 50$ пикселам (соответствующий угловой масштаб $\Delta\phi = 8.8°$.)

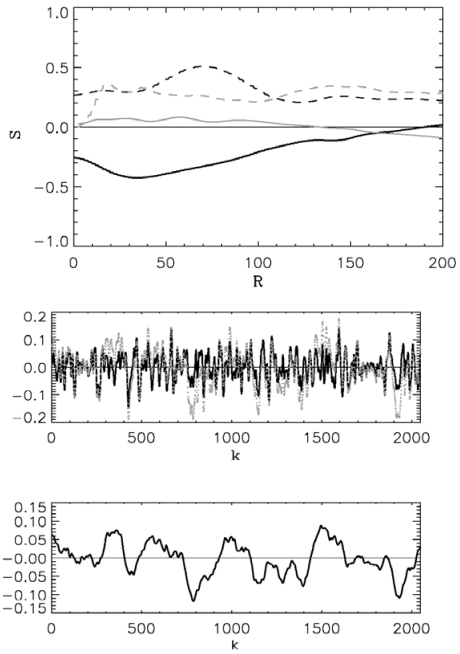


Рис. 13. То же, что и на рис. 12, но для кольца с $b = -30°$. Масштаб фильтрации $R = 70$ пикселов.

с помощью генератора случайных чисел. Остаток $a_{\ell m}$ для $11 \le \ell \le 100$ соответствует сигналу ILC III. Если негауссовосств CS имеет отношение к высоким мультиполям, эта замена не должна изменить значимость статистических свойств сигнала в зоне около CS. Однако если негауссовость CS имеет отношение к корреляциям между низкими мультиполями ($\ell \le 10$), пекулярность CS должна исчезнуть. На рис. 16 мы приводим карту ILC III для $\ell \le 10$, карту GRF CMB с таким же разрешением и комбинированную карту, в которой первые 10 коэффициентов $a_{\ell m}$ карты ILC III заменены коэффициентами $a_{\ell m}^{\rm rand}$.

Можно видеть, что зона CS все еще видна в комбинированной карте, но амплитуда и морфология CS меняются довольно сильно. Первое, CS больше не является одним из глубочайших минимумов в карте. Амплитуда CS падает от –0.22 мК до –0.15 мК. Второе, морфология зоны около CS больше не соответствует кластеру с размерностью 2, окруженному кластерами с размерностью 5. Морфология этой зоны теперь близка морфологии сигнала, приведенного на рис. 10 (черная сплошная линия на верхнем рисунке). Это результат теперь не кажется удивительным. Как было показано в работе [29], сигнал CMB может быть представлен как набор пиков с различными амплитудами. Для сигнала GRF CMB плотность этих пиков и форма каждого пика в окружении максимумов зависит от спектральных параметров σ_0,σ_1 и σ_2, где

$$\sigma_0^2 \sim \frac{1}{4\pi}\sum_m (2\ell+1)C(l),$$
$$\sigma_1^2 \sim \frac{1}{4\pi}\sum_m (2\ell+1)\ell(\ell+1)C(l),$$
$$\sigma_2^2 \sim \frac{1}{4\pi}\sum_m (2\ell+1)\ell^4 C(l),$$
$$R_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \qquad \gamma = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0\sigma_2}, \tag{16}$$

а $C(\ell)$ — спектр мощности GRF CMB. Хорошо известно, что параметр R_1 определяет корреляционную длину сигнала CMB, который пропорционален длине кластера с размерностью ($\nu_t = 0$,$\nu = 1$). Как видно из (16), для $C(\ell) \propto 1/\ell(\ell+1)$ этот параметр в основном зависит от максимального раз-

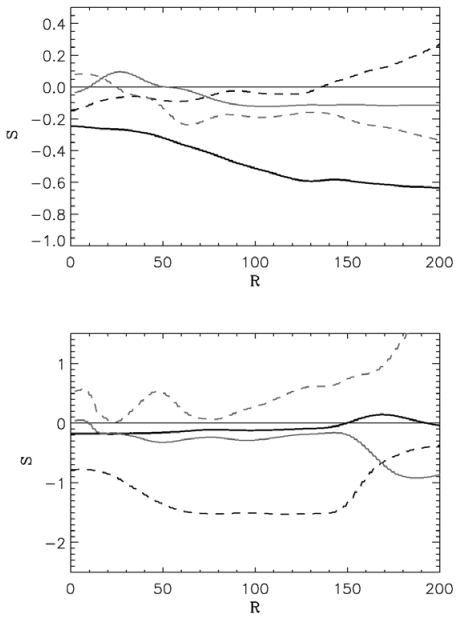


Рис. 14. Асимметрия и эксцесс для кольца с $b = 57°$. Верхний график показывает эти храктеристики для полного кольца, нижний график — для комбинации кластеров $C^{-}15 + C^{+}16$. Цвет линий обозначает то же, что и на рис. 9.

решения карты. Тем не менее, кластеризация пиков определяется параметром γ [21]. Этот параметр зависит от дисперсии σ_0, которая для $C(\ell) \propto 1/\ell(\ell+1)$ изменяется логарифмически. Таким образом, величина σ_0 зависит от диапазона низких мультиполей спектра мощности и, следовательно, γ-параметр напрямую отражает эту тенденцию. Тогда замещение низких мультиполей сигнала ILC III мультиполями $a_{\ell m}^{\rm rand}$ случайного гауссова сигнала нарушает асимметрию спектра мощности комбинированной карты ILC.

Более того, в комбинированной карте с высоким разрешением самые глубокие пики связаны с отрицательными пиками, ясно видимыми на карте GRF CMB с низким разрешением (второй сверху график на рис. 16). Этот простейший метод подтверждает наш вывод, что пекулярная структура кластера вокруг CS определяется низкими гармониками сигнала ILC III, который обнаруживает значительные пекулярности.

6. СРАВНЕНИЕ С ПЕКУЛЯРНЫМИ ЗОНАМИ, НАЙДЕННЫМИ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТОВ

Обнаружение пекулярностей в сигнале CMB со всего неба является, очевидно, одним из важных шагов при исследовании отклонения сигнала от изотропности и однородности. Как упоминалось во Введении, эта проблема обсуждалась в [30], где применялись вейвлеты сферической “мексиканской шляпы” (SMWH), эллиптической SMHW и сферического вейвлета “баттерфлай” (SBW) при обнаружении и определении положения пятен на небе CMB, распределение которого было прокоррелированно с каталогом точечных источников обзора NVSS. Ниже мы ссылаемся на эти методы целиком как на вейвлет-методы. МакИвен и др. приводят в каталоге [30] обнаруженные пекулярные зоны с приблизительными (оценочными) координатами этих зон. Мы приводим эти данные в таблице для сравнения с нашими результатами обнаружения кластеров высокой размерности.

Обсудим свойства сигнала для Зоны 6 из таблицы. Вейвлет-подход дает нам азимутальные координаты пятна $\phi_6 = 268°$. Из верхнего левого графика (рис. 17) мы можем увидеть, что эта точка соответствует относительно маленькому отрицательному пику. Аналогичная морфология пиков явственно наблюдается при $\phi \sim 210°$ и $\phi \sim 330°$. Оба пика очень похожи на зону CS, но имеют меньшую амплитуду. Эти два пика вероятно в целом дают вклад в негауссовость сигнала более значительно, чем пик на $\phi_6 = 268°$ (см. таблицу).

Следующая зона, которая не обнаружена кластерным анализом при $\nu_t = 0$, это Зона 7, показанная на верхнем правом рисунке рис. 17. Согласно вейвлет-анализу, азимутальная координата этой зоны $\phi_7 = 213°$. Повторим, здесь имеется отрицательный пик, но пик на $\phi_7 \simeq 240°$ обнаруживает более значительное отклонение от гауссовости, являясь членом кластера с числом минимумов $N = 4$.

Для Зоны 8 вейвлет-анализ дает $\phi_8 = 223°$. Мы приводим соответствующее кольцо на рис. 17 (второй сверху левый график). Обнаруженные зоны проявляют себя как точки максимумов, в то время как отрицательные пики, обнаруженные кластер-анализом и приведенные в таблице, показывают значительное отклонение от гауссовости. Например, кластер минимумов при $\phi \simeq 140° - 160°$ может быть обнаружен не только при пороге $\nu_t = 0$, но даже и при $\nu_t = -2$ как кластер максимумов и минимумов. Другими словами, все картинки, показанные на рис. 17, ясно демонстрируют, что применение кластерного анализа с различными порога-

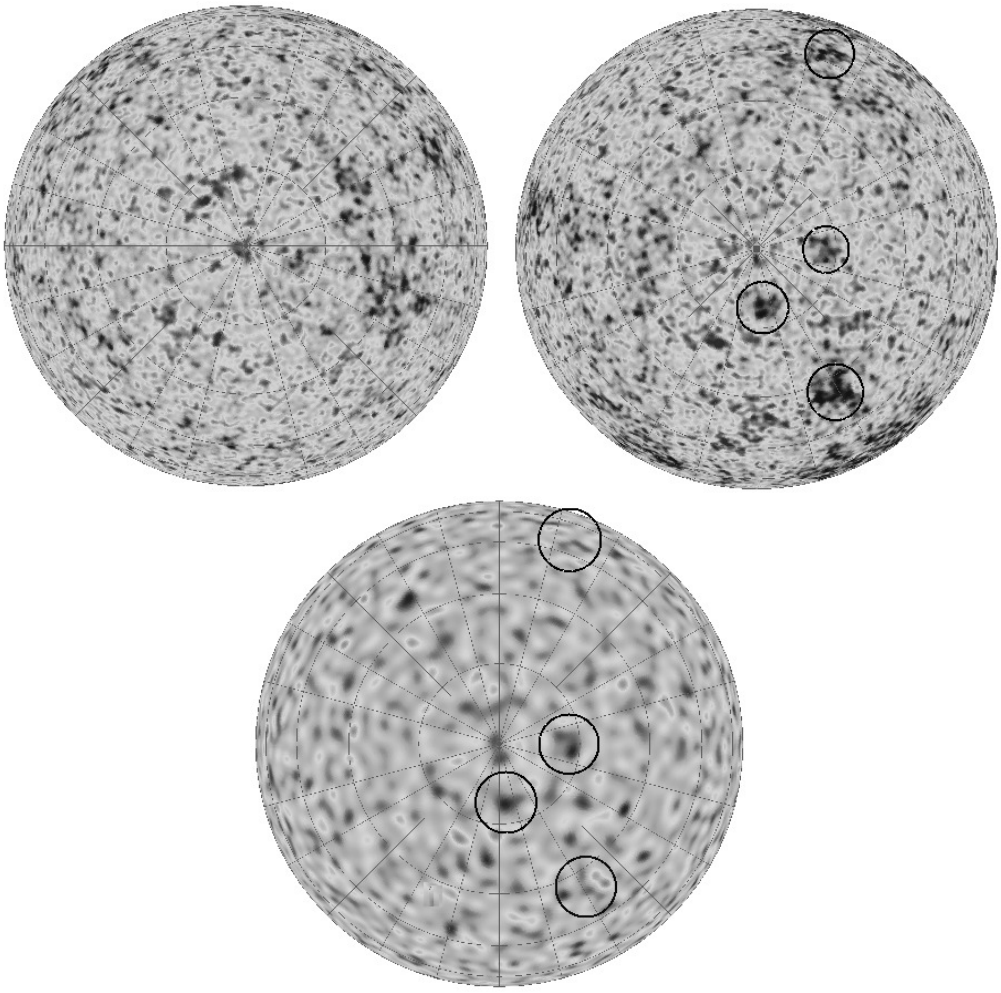


Рис. 15. Изображение неба, видимого из Северного и Южного галактических полюсов (верхние левый и правый рисунки). Нижний рисунок демонстрирует Южное полушарие неба CMB после вычитания первых 20 мультиполей сигнала ILC III. Окружности отмечают положения кластеризованных холодных пятен с минимумами до удаления низких гармоник (верхний правый рисунок) и после (нижний рисунок).

ми ν_t дают нам возможность определить не только негауссовы зоны, но также и кластеры этих зон, которые имеют нелокальную структуру. Чтобы проиллюстрировать эту тенденцию, мы обращаем внимание на нижнюю правую картинку, соответствующую Зоне 18. Согласно таблице, негауссова зона, которая расположена на $\phi_{18} = 218°$, является членом кластера и обнаружена как вейвлетами, так и кластерным анализом. Тем не менее, есть еще одна зона на $\phi \simeq 80°$ с морфологией, схожей с CS. Более того, если посмотреть на форму сигнала на $\phi > 130$, можно увидеть модуляцию сигнала низкочастотными гармониками. Такой тип негауссовости является аргументом в пользу гипотезы о том, что низкие мультиполи сигнала CMB являются негауссовыми с высокой степенью.

7. ВЫВОДЫ

Мы проверили свойства внутренней линейной комбинации карты CMB WMAP и карты WCM, проанализировав свойства сигнала в окрестности Холодного Пятна. Эти две карты CMB показывают в высшей степени схожие структуры на широтных кольцах при $|b| > 30°$. Мы перепровери-

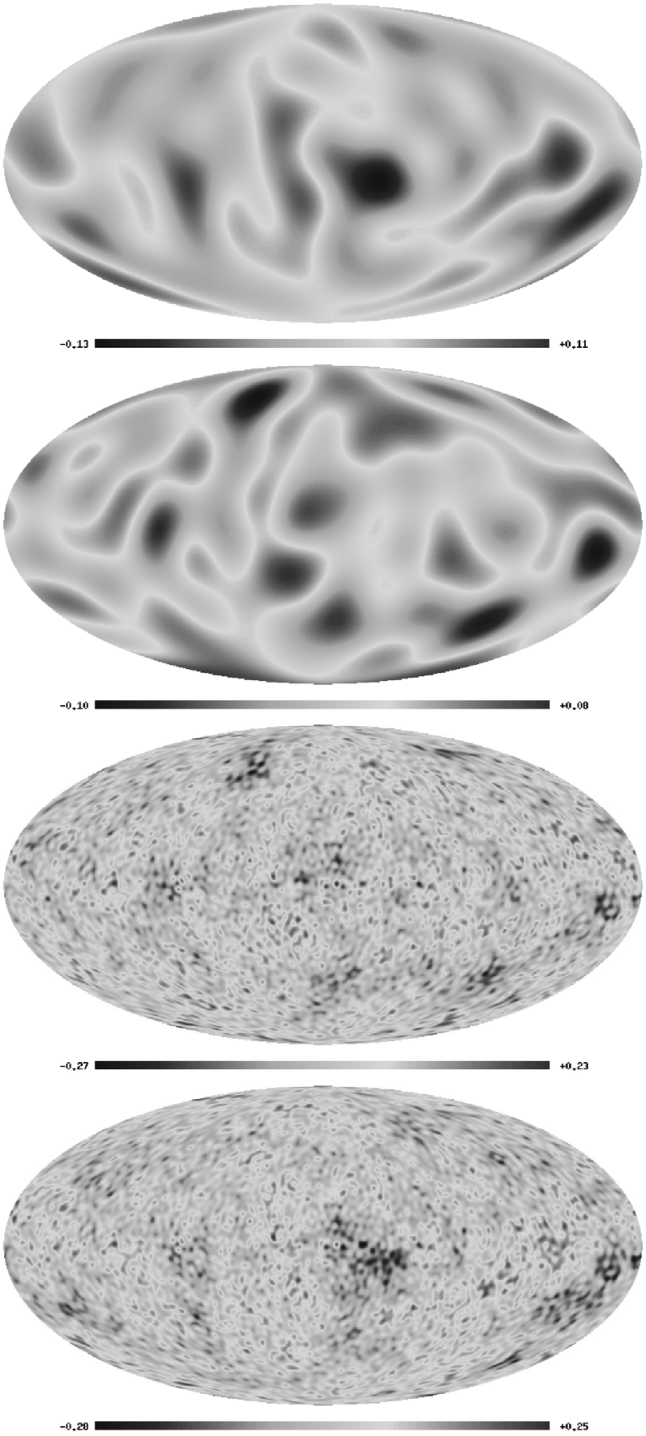


Рис. 16. Вверху: карта ILC III для $\ell \leq 10$. Вторая сверху: карта GRF CMB с таким же разрешением, что и первая. Второй снизу рисунок показывает комбинированный сигнал ILC с первыми 10 мультиполями, взятыми из случайного сигнала, а а остаток мультиполей $11 \leq \ell \leq 100$ из карты ILC III. Нижняя карта: ILC III с разрешением $2 \leq \ell \leq 100$.

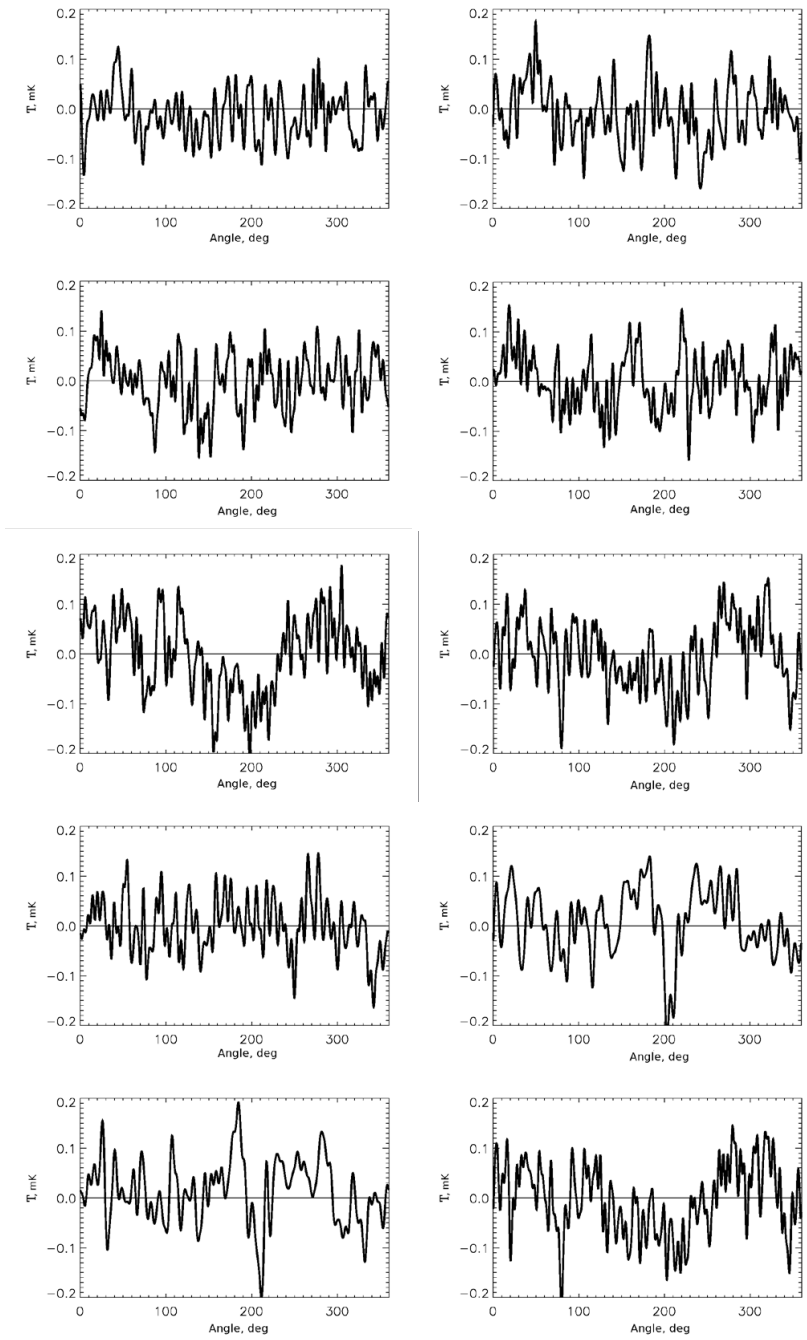


Рис. 17. Сигнал CMB для широтных колец, отмеченных в таблице знаком “−”. Слева направо и сверху вниз показаны зоны 6–12, 16–18.

ли свойства самого CS на галактической широте $b = -57°$ и долготе $l = 209°$ и показали, что оно отождествляется с кластером длины $D \sim 3\langle D(n)\rangle$. В добавление к CS мы также нашли еще зоны в сигнале CMB с почти такой же морфологией на широтах $b = 57°$, $b = -80°$, $b = -30°$.

Анализируя карту ILC III, мы показали, что форма CS исходно образована сигналом CMB, локализованным в диапазоне мультиполей $10 \leq \ell \leq 20$ (соответствующих угловым масштабам около $5° - 10°$), что согласуется с результатами [4, 9]. В то же время продемонстрировано, что кластеризация пиков в области вокруг CS зависит от остатка низких мультиполей в карте ILC III: $2 \leq \ell \leq 10$.

Таблица 1. Пекулярные зоны на карте сигнала CMB, обнаруженные с помощью вейвлетов (первый и второй столбцы) из работы МакИвена и др. [30], приведены долгота ϕ и широта θ каждой зоны. В третьем столбце записаны долготы кластеров, в которых находится пекулярная точка, обнаруженная вейвлетами. В четвертом столбце показано число экстремумов в кластере (S) и длина кластера (D). Знак "–" означает, что пекулярная зона вейвлета не обнаружена с помощью CA при $\nu_t = 0$. Звездочки перенаправляют читателя к рис. 17.

Зона	Положение, W	Положение, CA	S, D
	ϕ, θ (deg)	$\phi_{\min}$, $\phi_{\max}$	
1	75, 57	56, 86	3, 0.083
		157, 183	3, 0.072
		267, 304	4, 0.102
		304, 341	4, 0.102
2	75, 53	69, 93	2, 0.067
		40, 66	4, 0.072
		160, 183	3, 0.064
		273, 310	4, 0.103
3	323, 56	304, 339	4, 0.098
		278, 304	3, 0.072
4	321, 62	306, 333	2, 0.075
		333, 357	3, 0.067
		272, 307	4, 0.097
5	267, 50	251, 274	3, 0.064
		58, 82	3, 0.067
		313, 344	4, 0.086
6	268, 45	–	–
		129, 156	3, 0.075
7	213, 40	–	–
		30, 58	4, 0.078
		233, 258	4, 0.069
8	223, 30	–	–
		9, 37	4, 0.078
		136, 157	4, 0.056
9	160, 26	–	–
		174, 213	6, 0.108

Таблица 1. (продолжение)

Зона	Положение, W ϕ, θ (deg)	Положение, CA $\phi_{\min}$, $\phi_{\max}$	S, D
		4, 32	4, 0.078
10	94, -28	–	–
		35, 62	3, 0.075
		142, 235	15, 0.258
		333, 352	4, 0.056
11	81, -34	–	–
		141, 181	7, 0.11
		187, 230	6, 0.12
		261, 294	7, 0.092
12	118, -42	-	-
		8, 30	4, 0.061
		333,360+8	5, 0.097
13	20, -48	7, 30	4, 0.058
		70, 105	4, 0.097
		243, 278	4, 0.097
14	34, -31	32, 55	5, 0.064
		288, 330	6, 0.117
15	230, -68	220, 253	2, 0.092
		19, 52	2, 0.092
		63, 117	5, 0.15
16	204, -56	198, 216	2, 0.05*
		148, 188	4, 0.11
		223, 270	5, 0.13
17	186, -54	193, 216	2, 0.063*
		150, 193	4, 0.12
		224, 294	6, 0.194
18	218, -33	187, 230	3, 0.12
		258, 294	6, 0.10*

Учитывая, что такие же моды приводят к модуляции всего неба CMB, мы вычли эти моды из сигнала CMB. Демодулированный сигнал CMB выглядит как случайный без сверхкластеризации в согласии с [2].

Мы исследовали асимметрию вариаций на широтных кольцах, параллельных Галактической плоскости. Южное полушарие имеет бóльшую дисперсию сигнала, чем Северное. Поэтому локальные дефекты и крупные кластеры, включая CS и его ассоциированный кластер, в основном сконцентрированы в Южном полушарии.

Обобщив все подобные исследования, мы видим, что загадка CS в данных WMAP прямо отражает пекулярности низко-мультипольного части сигнала CMB, а отнюдь не (изолированный) дефект или проявление глобально анизотропной модели. Эта интерпретация не устраняет возможности эк-

зотического происхождения CS и связанных с ним феноменов, но она более точно устанавливает, к каким свойствам такие объяснения должны приводить. Удовлетворительная модель CS должна объяснить полный диапазон его свойств, а не только один какой-либо аспект.

Наша заключительная ремарка имеет отношение к значимости определения CS различными методами, основанными на предположении, что гауссова статистика применима ко всему наблюдаемому сигналу CMB. Из работы Ериксена и др. [22], в которой показано, что распределение мощности CMB по небу очень анизотропно на масштабах около 10°, стало ясно, что гауссова статистика более не является веской ссылкой при определении значимости этой особенности. Наш подход, основанный на анализе крупномасштабной угловой модуляции CMB, является возможной альтернативой этой методике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем признательность NASA за возможность использования Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis (LAMBDA[2]). Мы также благодарны авторам пакета Healpix [32], использованного для вычисления коэффициентов $a_{\ell m}$. В данной работе для анализа карт на сфере используется пакет Glesp [20, 33]. О.В.В. благодарит РФФИ за частичную поддержку грантом 09-07-00159, Фонд Содействия Отечественной Науке (программа “Молодые доктора РАН”) и Фонд “Династия”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Vielva, E. Martinez-Gonzalez, R. B. Barreiro, et al., Astrophys. J. **609**, 22 (2004), astro-ph/0310273.
2. M. Cruz, E. Martinez-Gonzales, P. Vielva, and L. Cayon, Mon. Not. R. Astron. Soc. **356**, 29 (2005), astro-ph/0405341.
3. L. Cayon, J. Jin, and A. Treaster, Mon. Not. R. Astron. Soc. **362**, 826 (2005), astro-ph/0507246.
4. M. Cruz M., L. Cayon, E. Martinez-Gonzales, et al., Astrophys. J. **655**, 11 (2007), astro-ph/0603859.
5. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc., submitted, (2008), arXiv/0804.2904.
6. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
7. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009), arXiv:0803.0732.
8. D. N. Spergel et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 377 (2007), astro-ph/0603449.
9. M. Cruz, M. Tucci, E. Martinez-Gonzalez, and P. Vielva, Mon. Not. R. Astron. Soc. **369**, 57 (2006), astro-ph/0601427.
10. K. Tomita, Phys. Rev. D **72**, 103506 (2005), astro-ph/0509518.
11. K. T. Inoue and J. Silk, **664**, 650 (2007), astro-ph/0612347.
12. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
13. L. Rudnick, S. Brown, and L. R. Williams, **671**, 40 (2007), arXiv:0704.0908.
14. T. Jaffe, Astrophys. J. **629**, L1 (2005), astro-ph/0503213.
15. T. Jaffe, S. Hervik, A. J. Banday, and K. M. Górski, Astrophys. J. **644**, 701 (2006), astro-ph/0512433.
16. L. Cayon et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **369**, 598 (2006), astro-ph/0602023.
17. J. D. McEwen, M. P. Hobson, A. N. Lasenby, and D. J. Mortlock, Mon. Not. R. Astron. Soc. **359**, 1583 (2005), astro-ph/0406604.
18. J. D. McEwen, M. P. Hobson, A. N. Lasenby, and D. J. Mortlock, Mon. Not. R. Astron. Soc. **371**, L50 (2006), astro-ph/0604305.
19. M. Cruz et al., Science **318**, 1612 (2007), arXiv:0710.5737.
20. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
21. D. I. Novikov and H. Jorgensen, Astrophys. J. **471**, 521 (1996).
22. H. K. Eriksen et al., Astrophys. J. **605**, 14 (2004), astro-ph/0307507.
23. D. L. Larson and B. D. Wandelt, Astrophys. J. **613**, L85 (2004), astro-ph/0404037.
24. C. G. T. Haslam , C. J. Salter, H. Stoffel, and W. E. Wilson, Astron. Astrophys. **47**, 1 (1982).
25. J. M. Bardeen, J. R. Bond, N. Kaiser, and A. S. Szalay, Astrophys. J. **304**, 15 (1986).
26. L.-Y. Chiang and P. D. Naselsky, Mon. Not. R. Astron. Soc. **380**, L71 (2007), arXiv:0705.1626.
27. C.-G. Park, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 313 (2004).
28. E. Komatsu, J. Dunkley, M. R. Nolta, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted, (2008), arXiv:0803.0547.

[2] `http://lambda.gsfc.nasa.gov`

29. J. R. Bond and G. Efstathiou, Mon. Not. R. Astron. Soc. **226**, 655 (1987).
30. J. D. McEwen et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **373**, 1211 (2007), astro-ph/0602398.
31. J. D. McEwen, Y. Wiaux, M. P. Hobson, et al. Mon. Not. R. Astron. Soc. **384**, 1289 (2008), arXiv:0704.0626.
32. K. Górski et al., Astrophys. J. **622**, 759 (2005).
33. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).

ЗАГАДКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ GRB НА СФЕРЕ*

О. В. Верходанов[1], В. В. Соколов [1], М. Л. Хабибуллина[1], С. В. Карпов [1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

В работе исследуется случайность распределения на небе положения космических гамма-всплесков. Так как эти события связаны с массивными галактиками, спиральными либо эллиптическими, то их положение должно отслеживать крупномасштабную структуру, что, в свою очередь, могло бы найти отражение в распределении флуктуаций микроволнового фона (CMB) на сфере. Мы проверяем данную гипотезу корреляционным мозаичным картографированием распределений CMB пиков и положения всплесков, обнаруживаем корреляцию между распределениями этих сигналов и интерпретируем её как возможный систематический эффект.

Ключевые слова: гамма-всплески

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление сравнительно больших каталогов гамма-всплесков в результате обзоров космических миссий, таких как итало-голландского спутника BeppoSAX[1] (Satellite per Astronomia X, "Beppo" в честь Giuseppe Occhialini) [1] и комптоновской обсерватории NASA, на которой был проведен эксперимент BATSE[2] (Burst and Transient Source Experiment) [2], позволило перейти к исследованию свойств пространственного распределения гамма-всплесков, которые в первом приближении распределены равномерно по небесной сфере.

Среди работ последнего времени отметим рассмотрение возможной связи распределения гамма-всплесков из каталога BATSE с крупномасштабной структурой [3]. Авторы работы рассматривают эффект, возникающий при влиянии локальной крупномасштабной структуры на видимое положение гамма-всплесков в результате слабого линзирования, который может проявиться для далеких ($z > 4$) событий. В этом случае может наблюдаться антикорреляция положений гамма-всплесков и галактик скоплений. Авторы статей о гамма-всплесках, используя измерения оптических величин и положений галактик с помощью APM (Automatic Plate Measuring Facility), сообщают об обнаружении такой антикорреляции для галактик на $z \sim 0.2 - 0.3$.

В другой работе [4] распределение всплесков из каталога BATSE исследуется различными методами (с помощью диаграмм Вороного — Voronoi tessalations, дерева минимальных расстояний — minimum spannig tree, мультифрактального спектра — multifractal spectrum). Авторы разделяют список объектов на подвыборки источников с различной длительностью сигнала ($t < 2$ сек, $2 < t < 10$ сек, $t > 10$ сек) и исследуют каждую подвыборку упомянутыми методами. Для первых двух групп они обнаруживают отклонения от однородности при сравнении с модельными данными. Основываясь на полученных данных, авторы [4] обсуждают состоятельность космологического принципа.

В нашем исследовании использовались каталоги BeppoSAX (диапазон энергий: 0.1–200 кэВ, 781 источник) и BATSE (20 кэВ — 2 МэВ, 2037 источников), взятые с родных сайтов экспериментов. Мы разделили каждый каталог на две подвыборки, содержащие, соответственно, короткие (продолжительностью $t < 2$сек) и длинные ($t > 2$сек) события. Таким образом мы получили 4 подвыборки источников, которые были исследованы раздельно, но одним и тем же образом. На рис. 1 показано положение всех гамма-всплесков каталогов BeppoSAX и BATSE. На рис. 2 — положение коротких и длинных гамма-всплесков каталогов BeppoSAX и BATSE на отдельных картах неба.

В данной статье мы рассматриваем статистические корреляционные свойства распределения гамма-всплесков на небе по отношению к космическому микроволновому фону (CMB). Исходным пунктом рассуждений является предполагаемая связь гамма-всплесков с массивными спиральными (длинные всплески) либо эллиптическими (ко-

*Астрофизический бюллетень. 2010. 65(3). С. 252

[1]http://www.asdc.asi.it/bepposax/

[2]http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/

роткие всплески) галактиками, а их расположение, соответственно, с крупномасштабной структурой. Тогда можно надеяться обнаружить отклонения в распределении флуктуаций микроволнового фона в проекции на сферу областей всплесков. Отметим, что крупномасштабная структура может быть отражена в флуктуациях CMB посредством эффекта Зельдовича–Сюняева, проявляющегося через взаимодействие фотонов CMB с горячими электронами скоплений [5] и наблюдаемого на масштабах порядка $4'$, и меньших, а также посредством интегрального эффекта Сакса–Вольфа [6] при движении квантов в гравитационном поле с переменным потенциалом, возникающем при формировании крупномасштабной структуры и расширении Вселенной, ожидаемом на видимых масштабах более $200'$.

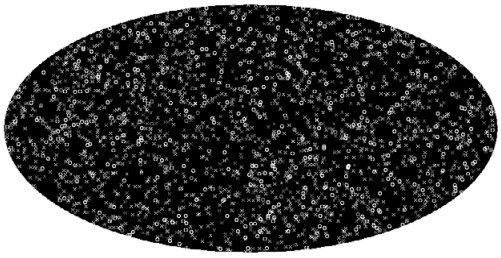


Рис. 1. Распределение гамма-всплесков на небесной сфере. Серым цветом (кружки короткие — всплески, крестики — длинные) показаны данные BeppoSAX, белым — BATSE.

Для исследования корреляционных свойств положений гамма-всплесков и пиков CMB мы используем карту микроволнового фона, полученную в результате проводимого уже в течение семи лет на спутнике WMAP[3] (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) эксперимента по накоплению сигнала со всей небесной сферы [7]. Для восстановления сигнала CMB из многочастотных наблюдений в этой работе применялся метод внутренней линейной комбинации (ILC — Internal Linear Combination) фоновых компонент [8], в результате которого была получена карта реликтового излучения, также называемая картой ILC и используемая для анализа низких гармоник с номерами мультиполей $\ell \leq 150$. Для построения карты ILC использовались наблюдения в пяти каналах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W).

Обращая внимание, что одна из центральных проблем статистического исследования гамма-всплесков — большие боксы ошибок при определении координат источников, порядка $1^\circ \times 1^\circ$, и во избежание неопределенности при анализе распределения событий по небу мы работаем с пикселами размером такого же порядка или больше.

Применяемые в данной статье методы и результаты изложены следующим образом. Сначала описываются способы пикселизации карт распределения всплесков и метод корреляции карт. Далее проводится исследование статистики отклонений CMB в области гамма-всплесков. На следующем этапе сравниваются корреляционные карты данных BATSE с данными BeppoSAX и CMB. Результаты обсуждаются в последнем разделе.

2. МЕТОД МОЗАИЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

При исследования свойств карт на различных угловых масштабах используется разложение распределенного на сфере сигнала по сферическим гармоникам (мультиполям):

$$\Delta S(\theta,\phi) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi)\,. \qquad (1)$$

Здесь $\Delta S(\theta,\phi)$ — вариации сигнала на сфере в полярных координатах, ℓ — номер мультиполя, m — номер моды мультиполя. Сферические гармоники определяются как

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

$$x = \cos\theta\,,$$

где $P_\ell^m(x)$ — присоединенные полиномы Лежандра. Для непрерывной функции $\Delta S(x,\phi)$ коэффициенты разложения $a_{\ell m}$ выражаются как

$$a_{\ell m} = \int_{-1}^{1} dx \int_0^{2\pi} \Delta S(x,\phi) Y^*_{\ell m}(x,\phi) d\phi\,, \qquad (3)$$

где $Y^*_{\ell m}$ обозначает комплексное сопряжение $Y_{\ell m}$.

Корреляционные свойства двух карт распределения сигнала на сфере на заданных масштабах описываются корреляционным коэффициентом для соответствующего мультиполя ℓ как

$$K(\ell) = \frac{1}{2} \frac{\sum_{m=-\ell}^{\ell} t_{\ell m} s^*_{\ell m} + t^*_{\ell m} s_{\ell m}}{(\sum_{m=-\ell}^{\ell} |t_{\ell m}|^2 \sum_{m=-\ell}^{\ell} |s_{\ell m}|^2)^{1/2}}\,, \qquad (4)$$

где $t_{\ell m}$ и $s_{\ell m}$ — это вариации двух сигналов в гармоническом представлении. Величина коэффициента $K(\ell)$ позволяет проверить корреляцию гармоник на сфере, т.е. сравнить свойства карт в задан-

[3] http://lambda.gsfc.nasa.gov

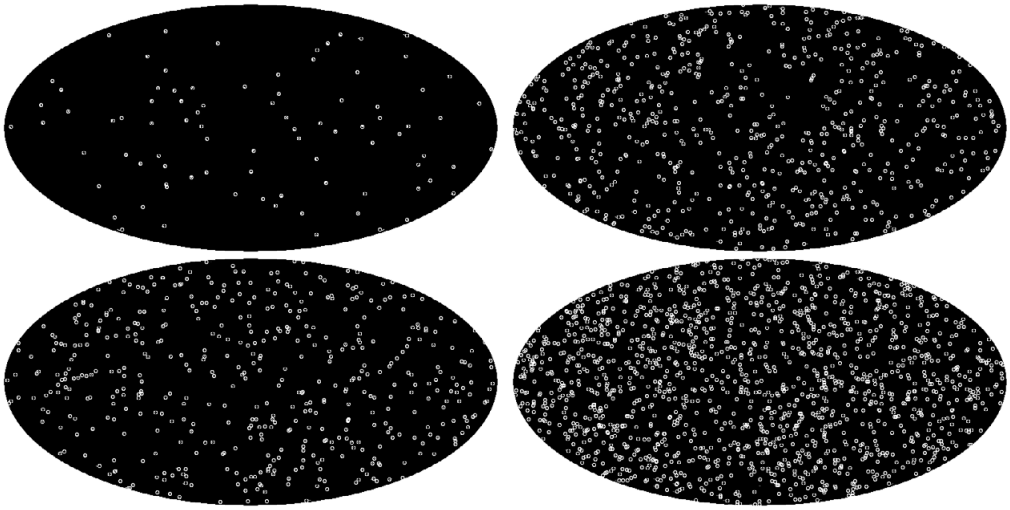


Рис. 2. Распределение подвыборок каталогов гамма-всплесков на небесной сфере. Левый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек.

ном угловом масштабе. Однако при поиске скоррелированных областей, не повторяющихся в других областях сферы, этот подход замазывает такие одиночные площадки при общем осреднении по сфере внутри одной гармоники. В этом случае выделить скоррелированные области уже практически не удается.

В работе [9] был предложен подход, реализованный во второй версии пакета GLESP [10] (утилита '`difmap`'), позволяющий обнаружить корреляции на исследуемых площадках определенного углового размера для двух карт. В этом методе каждому пикселу с номером p, стягивающему телесный угол Ξ_p, ставится в соответствие величина коэффициента кросс-корреляции данных обеих карт на подлежащей площадке. Таким образом, для двух сигналов T и S строится карта корреляций, у которой каждый пиксел p ($p = 1,2,...,N_0$, и N_0 — полное число пикселов на сфере) с углом Ξ_p, вычисляемый для карт на сфере с исходным разрешением, определяемым $\ell_{\max}$, есть

$$K(\Xi_p|\ell_{\max}) = \frac{\sum\limits_{p_{ij}\in\Xi_p}\sum (T(\theta_i,\phi_j) - \overline{T(\Xi_p)})(S(\theta_i,\phi_j) - \overline{S(\Xi_p)})}{\sigma_{T_p}\sigma_{S_p}}. \quad (5)$$

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

3. СТАТИСТИКА СИГНАЛА CMB В ОБЛАСТИ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

Первым способом проверки статистических свойств распределения положений всплесков и сигнала CMB был простейший анализ измерений значений пикселов в картах CMB. Измерения в пикселах проведены процедурой '`mapcut`' пакета GLESP. На рис. 3 и 4 показано положение всплесков из подвыборок каталогов BeppoSAX и BATSE на картах CMB с разрешением $260'$, ($\ell_{\max} = 20$) и $36'$ ($\ell_{\max} = 150$). Разрешение карт было выбрано в соответствии с ожидаемым масштабом проявления эффекта Сакса-Вольфа и предельным разрешением миссии WMAP.

Для поиска возможных корреляций мы подсчитали количество попаданий всплесков в пикселы CMB, имеющие отрицательные значения флуктуаций сигнала, возможно обусловленного описанными выше эффектами, на картах микроволнового фона с различным разрешением. В таблице приведена статистика значений пикселов CMB в областях гамма-всплесков для подвыборок каталогов BATSE и BeppoSAX для коротких и длинных событий. В неё включены полное количество источников в подвыборках, количество источников, которые находятся в пикселах CMB с отрицательным значением флуктуаций, а также ожидаемое коли-

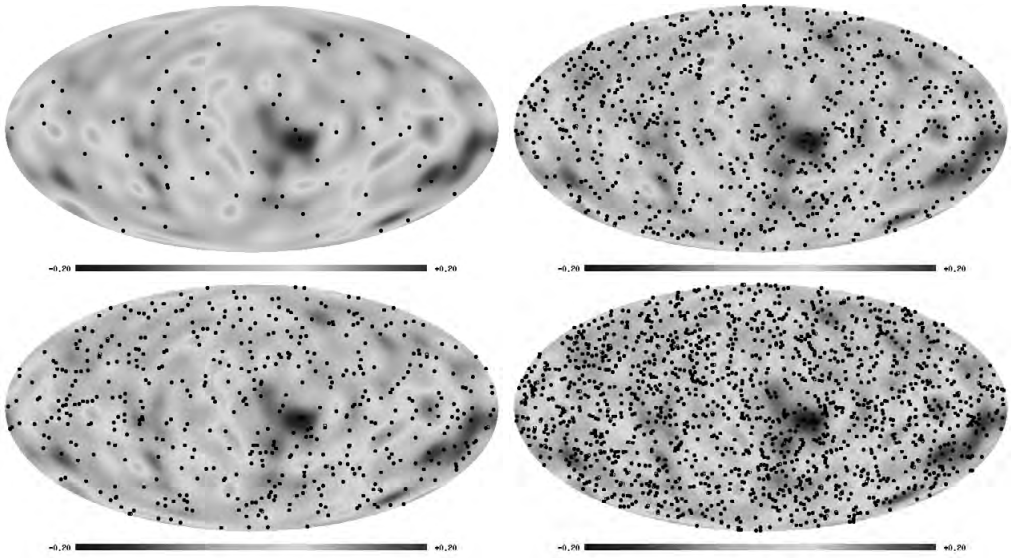


Рис. 3. Положение гамма-всплесков из разных подвыборок на картах CMB с разрешением $\ell_{\max} = 20$. Левый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек.

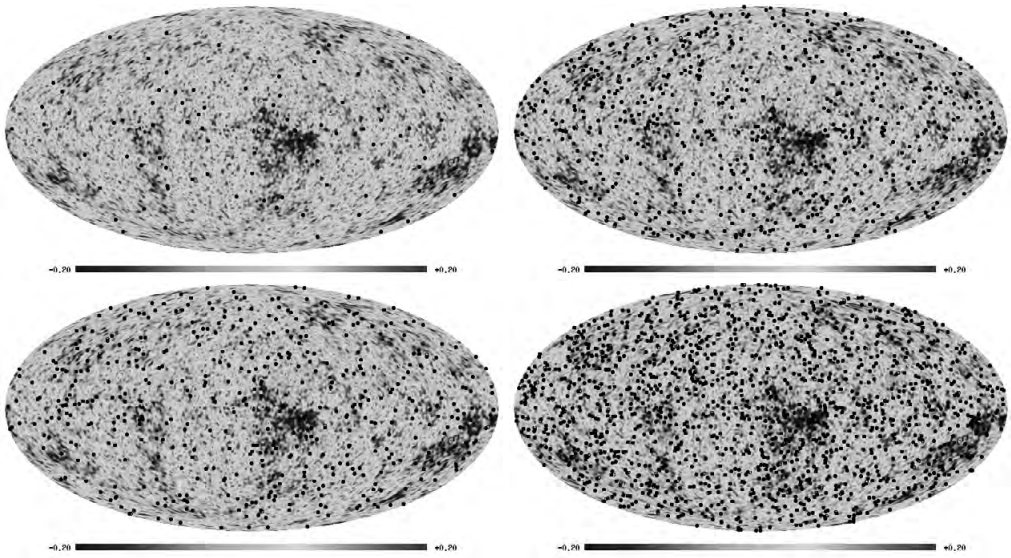


Рис. 4. Положение гамма-всплесков из разных подвыборок на картах CMB с разрешением $\ell_{\max} = 150$. Левый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек.

чество пикселов с отрицательным значением амплитуды CMB по модельным данным 200 реализаций случайного гауссова сигнала CMB в ΛCDM космологии и 1σ-разброс этих значений.

На рис. 5 и 6 мы приводим диаграммы распределения величины флуктуаций CMB для четырех подвыборок всплесков и двух карт CMB с различным разрешением. Пунктирными линиями пока-

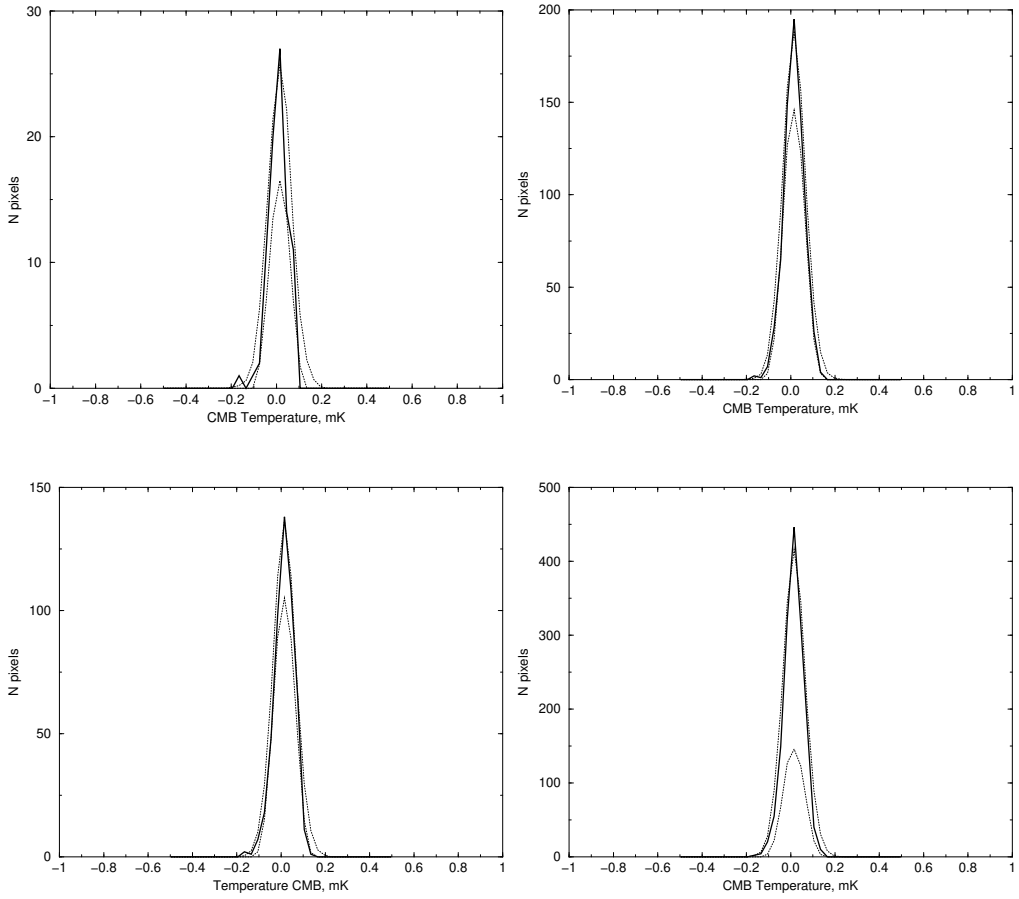


Рис. 5. Распределение значений флуктуаций CMB в пикселах WMAP, соответствующих положению гамма-всплесков, с разрешением карт $\ell_{\max} = 150$ для разных подвыборок гамма-всплесков. Левый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек. Пунктирными линиями показан 1σ-разброс значений CMB в ΛCDM космологической модели.

зан ожидаемый 1σ-разброс значений CMB в ΛCDM космологической модели. Привлекает внимание левый нижний график на рис. 6, где показано распределение величины флуктуаций на карте CMB с разрешением $\ell_{\max} = 150$ в областях коротких гамма-всплесков каталога BATSE. В области положительных значений графика имеется пик, приводящий к отклонению от гауссовости диаграммы. Положение этих всплесков, наложенное на квадруполь CMB, показано на рис. 7. Уровень значимости этой особенности, оценка которого была проведена посредством моделирования 10000 случайных реализаций CMB со спектром мощности, соответствующим ΛCDM модели, равен 7×10^{-4}.

Для анализа распределения положений гамма-всплесков, соответствующих избыточному пику, мы провели пикселизацию карты положений всплесков с помощью программного пакета GLESP [10]. Размер пиксела $700' \times 700'$, выбран таким, чтобы максимальное значение пиксела — число событий в соответствующей ему области — было не меньше трех, и обеспечивался значимый динамический диапазон для гармонического анализа. Пикселизованная таким способом карта выбранных всплесков показана на рис. 8. Изображение демонстрирует явно неравномерное распределение событий на сфере, сконцентрированное у эклиптических и/или экваториальных полюсов, что наибо-

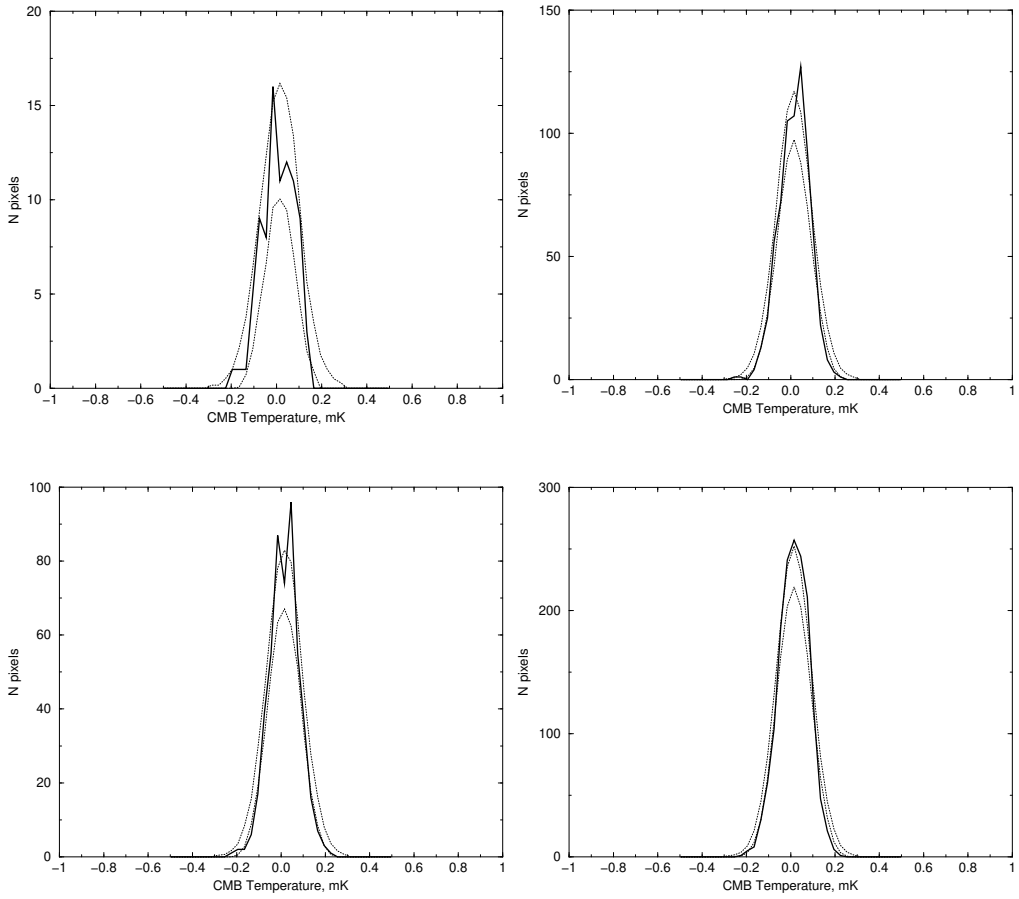


Рис. 6. Распределение значений флуктуаций CMB в пикселах WMAP, соответствующих положению гамма-всплесков, с разрешением карт $\ell_{\max} = 150$ для разных подвыборок гамма-всплесков. Левый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек. Пунктирными линиями показан 1σ-разброс значений CMB в ΛCDM космологической модели.

лее хорошо видно на сглаженной карте (рис. 9). На рис. 9 также нанесены сетки эклиптической и экваториальной систем координат, и видно, что имеется асимметрия сигнала в мощности относительно экваториальной плоскости и в количестве пятен, концентрирующихся в южном полушарии в обеих системах координат. Отметим также, что горячее пятно над галактическим центром лежит в экваториальной плоскости.

Для более явной демонстрации симметрий построим квадруполь сглаженной карты (рис. 10) и таким же образом как на рис. 9 наложим сетки эклиптической и экваториальной систем координат. Из положений пятен квадруполя видно, что полюса обеих координатных систем находятся на окраине горячих пятен, холодные пятна находятся симметрично относительно экваториальных плоскостей, галактический центр попадает в седловидную область между холодными и горячими пятнами.

Исследование свойств положений гамма-всплесков из области пика в распределении коротких всплесков каталога BATSE по отношению к CMB показало неожиданную чувствительность к локальным (околоземным) системам координат. Для более детального исследования этой проблемы проведем пикселизацию всех четырех подвыборок каталогов гамма-всплесков методом

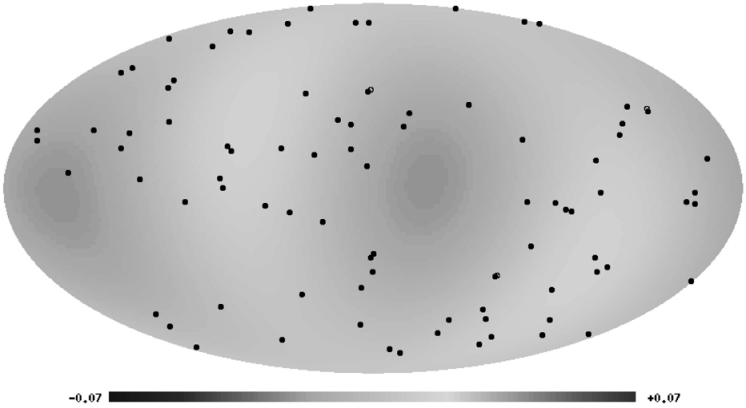


Рис. 7. Положение коротких всплесков из каталога BATSE, соответствующих избытку на гистограмме рис. 6 (левый нижний график), на карте квадрупольной компоненты ILC.

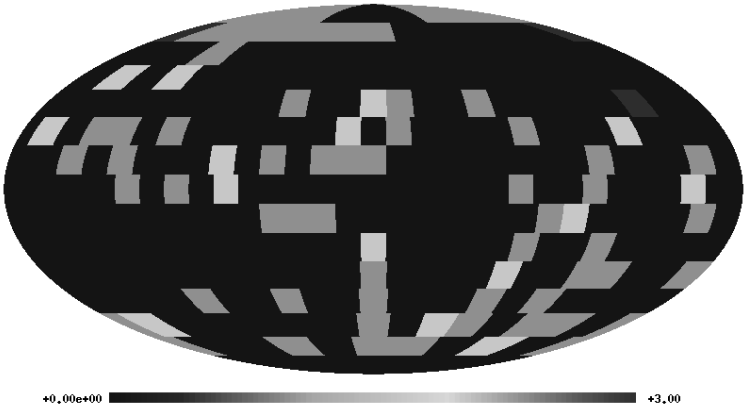


Рис. 8. Пикселизованная карта положений коротких гамма-всплесков из каталога BATSE, соответствующих избытку гистограммы на рис. 6 (левый нижний график). Размер пиксела $700'\times700'$, выбран таким образом, чтобы максимальное значение в пикселе — число событий в соответствующей области неба — было не меньше трех.

мозаичной корреляции, описанной в предыдущем разделе.

4. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ И WMAP ILC

Для проверки и уточнения корреляционных свойств карт положений гамма-всплесков и флуктуаций микроволнового фона мы провели пикселизацию карт положений гамма-всплесков четырех подвыборок гамма-всплесков (рис. 11). Размер пиксела $200'\times200'$, ($\ell_{\max} = 26$) был выбран, как и на предыдущем этапе, таким, чтобы его максимальное значение — число событий в соответствующей ему площадке — было не меньше трех.

Далее мы провели мозаичную корреляцию карт для пар “BATSE — BeppoSAX” и “BATSE — CMB” (рис. 12). Размер пиксела корреляций составил $500'\times500'$.

Используя разложение по формуле (1), можно рассчитать угловой спектр мощности карты:

$$C(\ell) = \frac{1}{2\ell+1}\left[|a_{\ell 0}|^2 + 2\sum_{m=1}^{\ell}|a_{\ell,m}|^2\right]. \qquad (6)$$

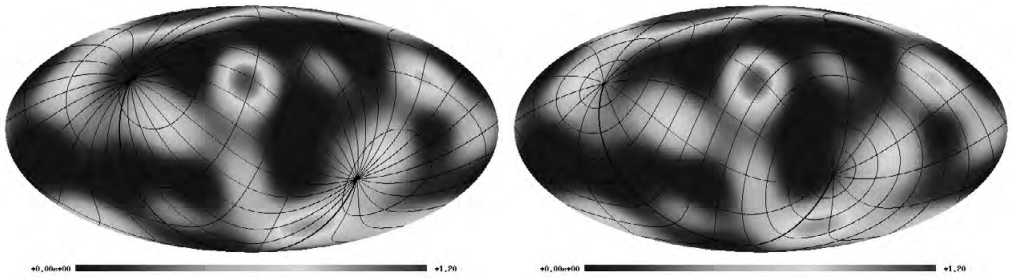


Рис. 9. Сглаженная карта неба, соответствующая пикселизации на рис. 8, с наложенными на неё координатными сетками: эклиптической (справа) и экваториальной (слева).

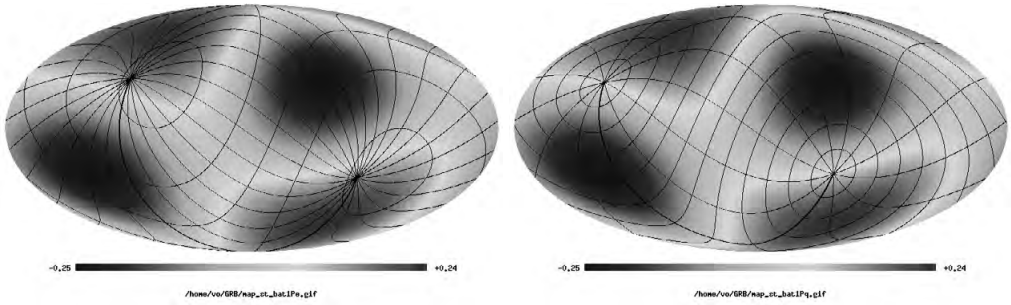


Рис. 10. Квадруполь сглаженной карты (рис. 9) с наложенными на него координатными сетками: эклиптической (справа) и экваториальной (слева).

Спектр мощности позволяет выделить основные гармоники, дающие вклад в корреляционную карту. На рис. 13 мы приводим спектры мощности карт корреляционных коэффициентов для данных BATSE мозаичной корреляцией с данными CMB ($\ell_{\max} = 26$) и положениями гамма-всплесков BeppoSAX.

Обращают на себя внимание три графика спектров мощности карт корреляций: между положением коротких всплесков BATSE и BeppoSAX (рис. 13, левый верхний график), а также коротких и длинных всплесков BATSE и флуктуаций CMB (рис. 13, соответственно правые верхний и нижний графики), в пиках которых имеются особенности, формально выходящие за уровень 2σ, а гармоники ℓ=1,4,7,9 — и за 3σ. Для оценки значимости этих отклонений было проведено численное моделирование нулевой гипотезы — сгенерированы 10000 случайных реализаций совокупности положений гамма-всплесков каталога BeppoSAX на небесной сфере в предположении их равномерного распределения, а также случайные карты CMB с соответствующим ΛCDM космологии гауссовым распределением амплитуд, и для них проведен расчет корреляций и соответствующих спектров мощности аналогично проделанному для реальных данных. Вероятности достижения уровней наблюдаемых на рис. 13 особенностей в рамках нулевой гипотезы — уровни значимости пиков спектра мощности — показаны на рис. 14. Для мультиполей ℓ=1, 4, 7, 9 карты корреляций коротких всплесков BATSE и BeppoSAX они составляют соответственно 0.0011, 0.0012, 0.0001 и меньше 0.0001, тогда как для октуполя корреляций длинных всплесков BATSE и BeppoSAX — 0.0325, а для квадруполя карты корреляций длинных всплесков BATSE и флуктуаций CMB — 0.0614. Карта одной из гармоник ($\ell = 7$) в распределении корреляционных коэффициентов положений коротких всплесков BATSE и BeppoSAX показана на рис. 15. Карты пиковых гармоник ($\ell = 3$ для коротких и $\ell = 2$ для длинных всплесков) спектра корреляционных карт BATSE и CMB приведены на рис. 16.

Особенностью приведенных карт с наложенными координатными сетками является положение полюсов координатных систем. На рис. 15 видно, что полюса эклиптической системы координат находятся в особых точках — седлах между максимумами и минимумами в распределении сигнала на карте. Аналогично, в седлах располагаются и

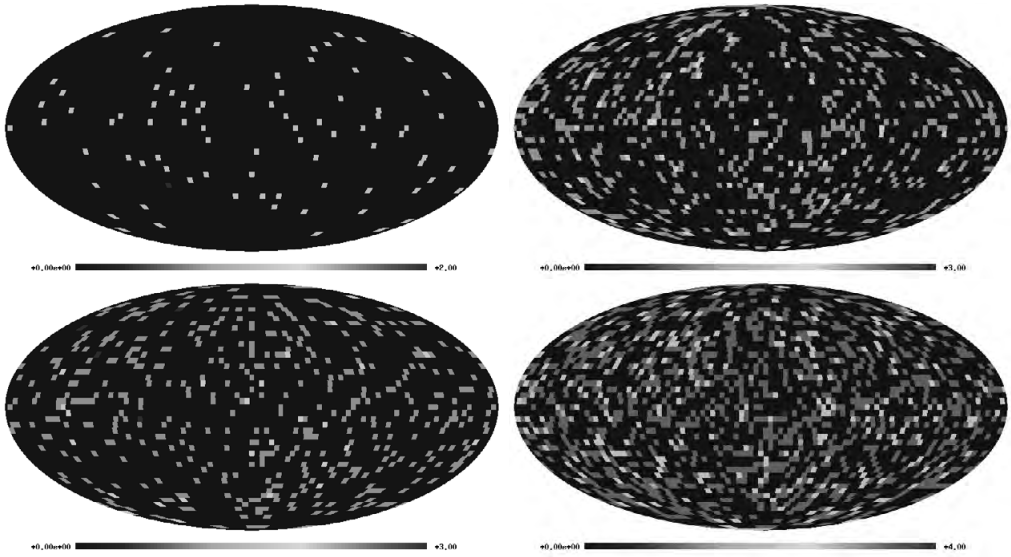


Рис. 11. Пикселизованные карты положений подвыборок гамма-всплесков. Размер пиксела $200' \times 200'$. Левый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек.

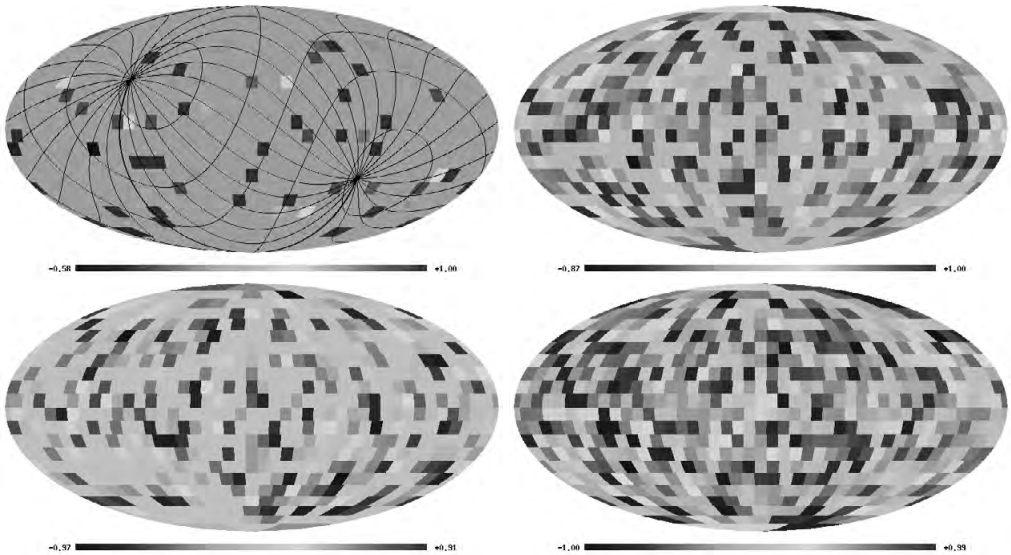


Рис. 12. Корреляционные карты данных CMB ($\ell_{\max} = 26$) и положений гамма-всплесков в галактической системе координат. Размер пиксела корреляций — $500' \times 500'$. Левый верхний рисунок — корреляция данных BATSE и BeppoSAX, $t < 2$ сек, с наложенной сеткой эклиптической системы координат. Правый верхний рисунок — корреляция данных BATSE ($t < 2$ сек) и CMB. Левый нижний рисунок — корреляция данных BATSE и BeppoSAX, $t > 2$ сек. Правый нижний рисунок — корреляция данных BATSE ($t > 2$ сек) и CMB.

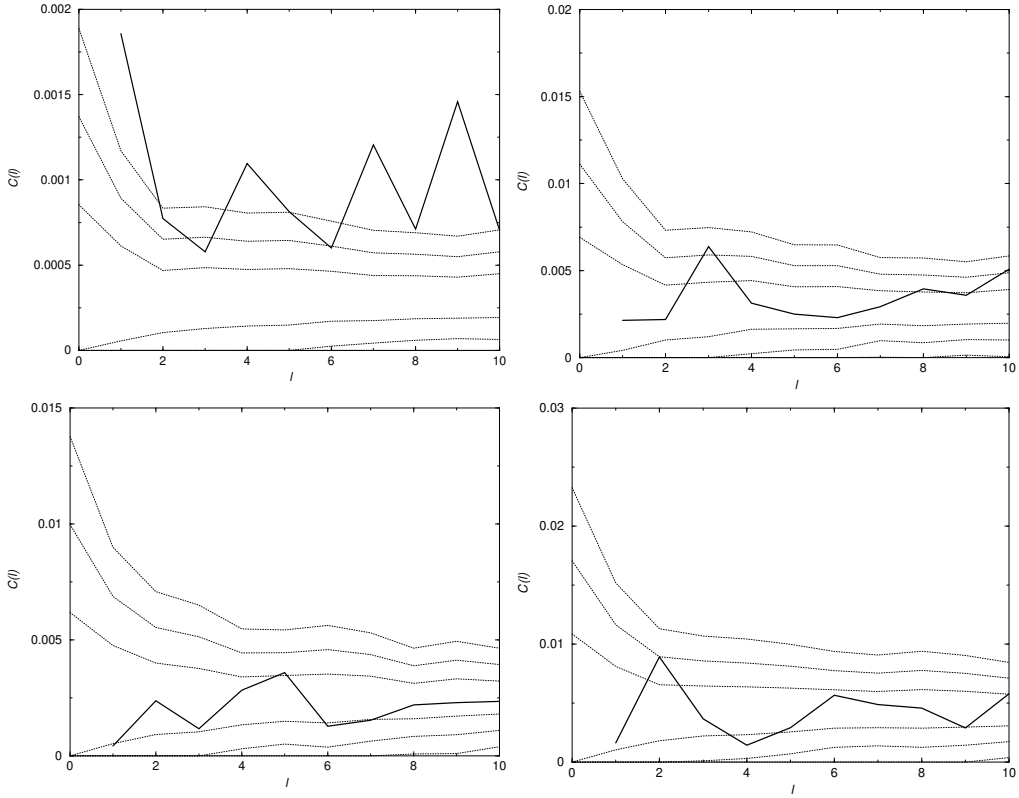


Рис. 13. Спектры мощности карт корреляционных коэффициентов между положениями гамма-всплесков BATSE с данными BeppoSAX и CMB ($\ell_{\max} = 26$) (сплошная линия). Размер пиксела корреляций $500' \times 500'$. Левый верхний рисунок — спектр корреляции данных BATSE и BeppoSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — спектр корреляции данных BATSE ($t < 2$ сек) и CMB. Левый нижний рисунок — спектр корреляции данных BATSE и BeppoSAX, $t > 2$ сек. Правый нижний рисунок — спектр корреляции данных BATSE ($t > 2$ сек) и CMB. Пунктирные линии соответствуют уровням отклонений от среднего в $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$ и $\pm 3\sigma$, где σ оценивалась по спектрам 200 случайных реализаций нулевой гипотезы, состоящей в равномерном распределении всплесков на небесной сфере, а также в соответствующем ΛCDM-космологии гауссовском распределении амплитуд для CMB.

полюса в экваториальной системе на карте октуполя корреляций (рис. 16, сверху). На правой карте (квадруполе) рис. 16 видно, что полюса лежат в минимумах квадруполя. Мы оценили значимость такой конфигурации — вероятность попадания минимумов квадруполя в области радиусом 5 градусов вокруг экваториальных полюсов — описанным выше способом для 10000 случайных реализаций для пикселизации GLESP с 102 пикселами на экваторе, и нашли её равной 0.0035.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ корреляций карт положений гамма-всплесков и CMB свидетельствует, что такие корреляции существуют. Вызывает большой интерес ориентация (фазовые характеристики) карт корреляций, в распределении которых можно выделить два момента: (1) для корреляций положений коротких гамма-всплесков разных каталогов, а также их корреляций с CMB обнаруживаемые особенности (положение полюсов) наблюдаются как в экваториальной, так и в эклиптической системах координат; кроме того, несмотря на малое количество коротких событий BeppoSAX и BATSE, корреляций их положений в окне $500' \times 500'$, демонстрирует цепочку событий в эклиптической плоскости (рис. 12, левый верхний), а также преимущественное попадание скоррелированных пикселов в южное эклиптическое полушарие; (2) корреляции длинных событий BATSE и флуктуаций CMB имеют особенности в экваториальной системе координат, причем совместная ве-

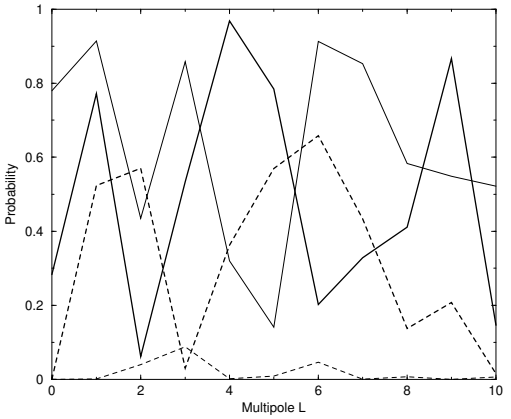


Рис. 14. Уровни значимости отклонений от среднего для спектров мощности карт корреляций положений коротких гамма-всплесков BATSE-BeppoSAX (тонкая штриховая линия), длинных всплесков BATSE-BeppoSAX (толстая штриховая линия), коротких всплесков BATSE и флуктуаций CMB (тонкая сплошная линия) и длинных всплесков BATSE и флуктуаций CMB (толстая сплошная линия). Значимость оценивалась посредством прямого численного эксперимента с 10000 случайных реализаций нулевой гипотезы, принимающей равномерное распределение всплесков на небесной сфере, а также в соответствующем ΛCDM-космологии гауссовом распределении амплитуд для CMB.

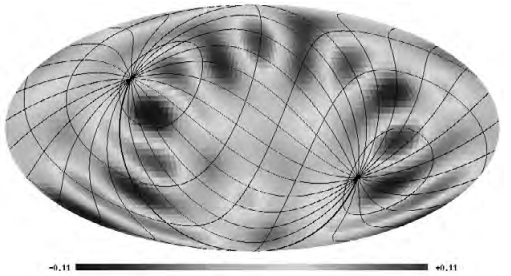


Рис. 15. Карта седьмой гармоники ($\ell = 7$) в разложении карты корреляций положений коротких всплесков BATSE и BeppoSAX с наложенной сеткой экваториальной системы координат.

роятность высокой амплитуды квадруполя и попадания его минимума в экваториальный полюс при корреляции со случайными картами практически равна нулю.

Обнаруженные корреляции между положением гамма-всплесков и CMB, чувствительные к экваториальной системе координат, скорее всего связаны с систематическими эффектами. Так, большее число гамма-событий вблизи экваториальных полюсов может быть связано с бóльшим интегральным временем экспозиции камер спутников в силу их метода наблюдений — оба спутника, наблюдавших гамма-всплески, обращались по достаточно низким околоземным орбитам, что приводило к систематическому экранированию областей вблизи небесного экватора. В то же время, для данных CMB такую чувствительность к экваториальной системе в рамках подобной простой модели объяснить не удается, т.к. данные микроволнового фона получены на спутнике WMAP, обращающемся вокруг точки Лагранжа L2. Отметим, что в предыдущей работе [11] мы также получили корреляции, "знающие" о существовании экваториальной системы. Мы не исключаем здесь возможного вклада магнитного поля Земли, имеющего большую протяженность и проявляющегося в крупномасштабных корреляциях микроволнового фона. Однако механизм таких корреляций нам не ясен.

Непонятна также возможная взаимосвязь плоскости эклиптики и положений гамма-всплесков. Здесь ситуация обратная: эклиптические особенности в данных CMB в последнее время уже обсуждались [11–13], но чтобы понять, что может связывать гамма-события и эклиптическую плоскость, потребуются дополнительные исследования. Одна из возможных гипотез — селекционный эффект, связанный с разворотом аппаратуры спутников от Солнца и тем самым с выделением эклиптической плоскости.

Таблица 1. Статистика значений пикселов CMB в областях гамма-всплесков для подвыборок каталогов BATSE и BeppoSAX. В колонках соответственно: t — длительность (сек); миссия; разрешение карты CMB (номер мультиполя), полное количество источников гамма-излучения в подвыборке (N_t); количество источников (N_e), которые находятся в пикселах CMB с отрицательным значением флуктуаций; ожидаемое количество пикселов с отрицательным значением амплитуды CMB по данным 200 реализаций случайного гауссова сигнала в ΛCDM космологии и 1σ-разброс этих значений.

t, сек	Миссия	$\ell_{\max}$	N_t	N_e	Модель
<2	BATSE	150	497	244	249±11
>2	BATSE	150	1540	763	769±19
<2	BATSE	20	497	250	248±13
>2	BATSE	20	1540	781	768±32
<2	BeppoSAX	150	87	43	44±5
>2	BeppoSAX	150	694	339	347±15
<2	BeppoSAX	20	87	50	44±5
>2	BeppoSAX	20	694	346	348±18

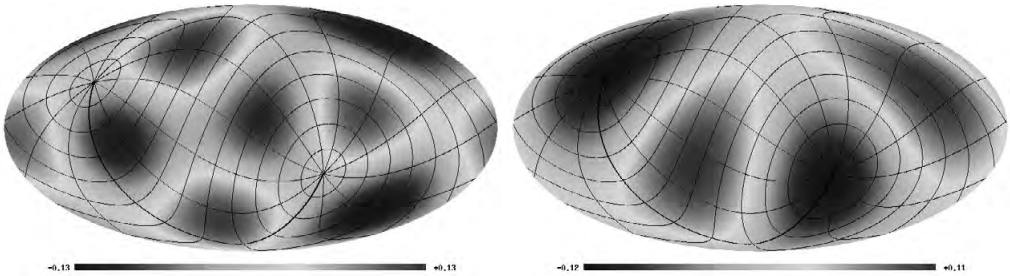


Рис. 16. Карты выделенных гармоник в спектре мощности (рис. 13). Карты корреляций положения всплесков BATSE ($t > 2$ сек) с данными BeppoSAX (верхний рисунок, $\ell = 3$) и CMB (нижний рисунок, $\ell = 2$). На карты наложена сетка экваториальной системы координат.

Отметим также, что корреляционные свойства CMB, проявляющиеся в "околоземных" системах координат, при использовании данных "случайно" распределенных событий говорят о негауссовости данных CMB в области низких мультиполей, обусловленных либо систематикой, либо неизученным эффектом в околоземном пространстве. Продолжение исследования этой корреляции нам кажется особенно интересным в связи с ожиданием появления новых качественных данных миссий Fermi и Planck.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Валерию Ларионову (СПбГУ) за полезные дискуссии при осуждении результатов данной работы. Мы благодарим NASA за возможность использования архива (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные WMAP. Мы также признательны авторам пакета HEALPix[4] [14], с помощью которого были преобразованы карты WMAP7 в коэффициенты $a_{\ell m}$. В работе использован пакет GLESP[5] [15, 16] для дальнейшего анализа данных CMB на сфере. Данная работа была поддержана грантом "Ведущие научные школы России" (школа С. Э. Хайкина) и грантами РФФИ 09-02-00298 и 08-02-00486. О.В.В. благодарит также за частичную поддержку Фонд Содействия Отечественной Науке (программа "Молодые доктора РАН") и Фонд "Династия".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Riccia, F. Fioreb, and P. Giommia, Nucl. Phys. B, Proc. Suppl. **69**, 618 (1999).
2. W. S. Paciesas, C. A. Meegan, G. N. Pendleton, et al. Astrophys. J., Suppl. Ser. **122**, 465 (1999), astro-ph/9903205.
3. L. L. R. Williams and N. Frey, Astrophys. J. **583**, 594 (2003).
4. A. Mészáros, L. G. Balázs, Z. Bagoly, and P. Veres, arXiv:0906.4034
5. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, Astrophys. Space Sci. **4**, 301 (1969).
6. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, Astrophys. J. **147**, 73 (1967).
7. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted (2010), arXiv:1001.4744.
8. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
9. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, Astrophysical Bulletin **64**, 263 (2009).
10. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, O. P. Naselsky, et al., arXiv0904.2517 (2009).
11. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **65**, accepted (2010).
12. J. M. Diego, M. Cruz, J. Gonzalez-Nuevo, et al., arXiv: 0901.4344 (2009).
13. V. Dikarev, O. Preuss, S. Solanki, et al., Astrophys. J. **705**, 670 (2009).
14. K. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **622**, 759 (2005).
15. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
16. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).

[4] `http://www.eso.org/science/healpix/`

МУЛЬТИПОЛЬНЫЕ ДОМИНАНТЫ В МОЗАИЧНЫХ КАРТАХ КОРЕЛЛЯЦИЙ ДАННЫХ WMAP*

О. В. Верходанов[1], М. Л. Хабибуллина[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Метод картографирования корреляций на полной сфере был применен для исследования свойств карты ILC, а также пылевой и синхротронной компонент фона. Обнаружена аномальная корреляция компонент с картой ILC в основной плоскости и полюсах эклиптической и экваториальной координатных систем. Кроме байеса в гистограмме пикселов корреляций, обнаружен доминирующий вклад квадруполя в спектр мощности карты мозаичных корреляций. Обсуждаются различные причины аномального сигнала.

Ключевые слова: радиоисточники

1. ВВЕДЕНИЕ

Практически сразу с появлением первых данных миссии WMAP [1–3] были обнаружены негауссовы проявления на низких гармониках: квадруполе и октуполе, выражающиеся в планарности и выравнивании обеих гармоник, на что указали Тегмарк и др. [4]. Ось, вдоль которой располагаются экстремумы этих мультиполей в карте WMAP, была названа впоследствии Осью Зла [5]. Следует сказать, что эта ось не является единственной выделенной осью в данных миссии. Естественная выделенная ось в данных WMAP лежит в плоскости Галактики. В следующих релизах данных миссии WMAP [6–9] существование Оси Зла было также подтверждено.

Были сделаны различные оценки значимости существования этой оси и высказано несколько гипотез о ее происхождении. В разных работах (например, [10,11]) исследовался вклад фоновых компонент и их влияние на выравнивание мультиполей ($\ell = 2$ и $\ell = 3$), и отмечалась малая вероятность влияния фона на ориентацию низких мультиполей. В работе [11], где для оценок эффекта применялись мультипольные векторы, также замечено, что положение осей квадруполя и октуполя соответствует геометрии и направлению движения Солнечной системы и перпендикулярно эклиптической плоскости и плоскости, задаваемой направлением на диполь. Случайность такого эффекта авторы оценивают как маловероятную на уровне достоверности, превышающим 98% и исключают влияние остатков вклада от фоновых компонент. В продолжение проводимых работ авторы [12] заключают, что характеристики низких мультиполей аномально сильно отличаются от случайных, что может быть обусловлено статистической неизотропностью Вселенной на больших масштабах, либо проблемами восстановления сигнала методом ILC (Internal Linear Combination — внутренняя линейная комбинация). Авторы [13] отмечают, что планарность квадруполя и октуполя не является статистически значимой. Они также подчеркивают, что остаточное излучение фонов в карте ILC не влияет существенно на уровень эффекта.

Для объяснения выделенности оси в ориентации мультиполей также развивались и космологические модели, в рамках которых можно было бы объяснить выравнивание квадруполя и октуполя. Разнообразные модели включают анизотропное расширение Вселенной, вращение и магнитное поле [14–16].

В других работах исследовался вклад эклиптической пыли в микроволновый фон. Авторы работы [17] построили комбинацию исходных данных каналов WMAP: $V + W - 2Q$, которую сгладили 7-градусной диаграммой. В эту комбинацию не входит CMB, но с ее помощью можно исследовать поведение крупномасштабного остаточного сигнала. Авторы показали присутствие в нем излучения, распределение которого коррелировано с положением эклиптической плоскости. В работе был исследован вклад зодиакальной пыли и показано, что уровень излучения этого вклада недостаточен для объяснения уровня остаточного сигнала комбинации карт. Кроме того, был оценен вклад неразрешенных источников, который также мог бы слу-

*Астрофизический бюллетель. 2010. 65(4). С. 413

жить объяснением наблюдаемого эффекта. Авторы признают этот вклад также недостаточным.

Авторы другой работы [18] использовали данные WMAP и инфракрасных наблюдений и рассчитали параметры пылинок, которые могли бы дать соответствующий вклад в микроволновой фон. Авторы считают, что силикатные шарики размером несколько миллиметров в зодиакальном облаке и транс–нептунианском поясе с оптической толщой порядка 10^{-7} могли бы объяснить дополнительное излучение на уровне $10\,\mu$K в микроволновом фоне в области эклиптики.

Мы исследовали проблему корреляционных свойств карт WMAP, учитывая факт [19], что ранее в различных областях распределения сигнала ILC уже были обнаружены повышенные корреляции. Кроме того, также известно [20–22], что большой вклад в негауссовость данных на различных мультиполях дают именно фоновые компоненты. Возвращаясь к работе [19], отметим, что распределение корреляционных коэффициентов в мозаичных площадках карты имело большой сдвиг для корреляций с пылевой компонентой фона. Это может быть обусловлено более сложной моделью распределения пыли, чем используемая в настоящее время при разделении компонент, и тогда эффект может проявиться в корреляции на других галактических широтах.

В данной работе мы продолжаем изучение обнаруженной корреляции [19] на различных угловых масштабах. Для исследования эффекта мы рассчитаем угловой спектр мощности мозаичной корреляционной карты и выделим в нем основные гармонические компоненты. Мы применим этот анализ для корреляций карты ILC как с пылевой компонентой, так и с синхротронным излучением.

2. МЕТОД МОЗАИЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

При исследования свойств карт на различных угловых масштабах используется их разложение по сферическим гармоникам (мультиполям):

$$\Delta S(\theta,\phi) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi)\,. \qquad (1)$$

Здесь $\Delta S(\theta,\phi)$ — вариации сигнала на сфере в полярных координатах, ℓ — номер мультиполя, m — номер моды мультиполя. Сферические гармоники определяются как

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

где $x = \cos\theta$, а $P_\ell^m(x)$ — присоединенные полиномы Лежандра. Для непрерывной функции $\Delta S(x,\phi)$ коэффициенты разложения $a_{\ell m}$ выражаются как

$$a_{\ell m} = \int_{-1}^{1} dx \int_0^{2\pi} \Delta S(x,\phi) Y^*_{\ell m}(x,\phi) d\phi\,, \qquad (3)$$

где $Y^*_{\ell m}$ обозначает комплексное сопряжение $Y_{\ell m}$.

Корреляционные свойства двух карт распределения сигнала на сфере на заданных масштабах описываются корреляционным коэффициентом для соответствующего мультиполя ℓ как

$$K(\ell) = \frac{1}{2} \frac{\sum\limits_{m=-\ell}^{l} t_{\ell m} s^*_{\ell m} + t^*_{\ell m} s_{\ell m}}{(\sum\limits_{m=-\ell}^{l} |t_{\ell m}|^2 \sum\limits_{m=-\ell}^{\ell} |s_{\ell m}|^2)^{1/2}},$$

где $t_{\ell m}$ и $s_{\ell m}$ — это вариации двух сигналов в гармоническом представлении. Величина коэффициента $K(\ell)$ позволяет проверить корреляцию гармоник на сфере, т.е. сравнить свойства карт в заданном угловом масштабе. Однако при поиске коррелированных областей, не повторяющихся в других областях сферы, этот подход замазывает такие одиночные площадки при общем осреднении по сфере внутри одной гармоники. В этом случае выделить коррелированные области уже практически не удается.

В работе [19] был предложен подход, реализованный во второй версии пакета GLESP [23], позволяющий обнаружить корреляции на исследуемых площадках определенного углового размера для двух карт. В этом методе каждому пикселу с номером p, стягивающему телесный угол Ξ_p, присваивается величина коэффициента кросс-корреляции $K(\Xi_p|\ell_{\max})$ данных обеих карт на подлежащей площадки. Т.е. для двух сигналов T и S мы строим карту корреляций, где в каждый пиксел p (p = 1,2,...,N_0, и N_0 — полное число пикселов на сфере) с углом Ξ_p, вычисляемый для карт на сфере с исходным разрешением, определяемым $\ell_{\max}$, записана величина

$$K(\Xi_p|\ell_{\max}) = \frac{\sum\limits_{p_{ij}\in\Xi_p} \sum (T(\theta_i,\phi_j) - \overline{T(\Xi_p)})(S(\theta_i,\phi_j) - \overline{S(\Xi_p)})}{\sigma_{T_p}\sigma_{S_p}}. \qquad (4)$$

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

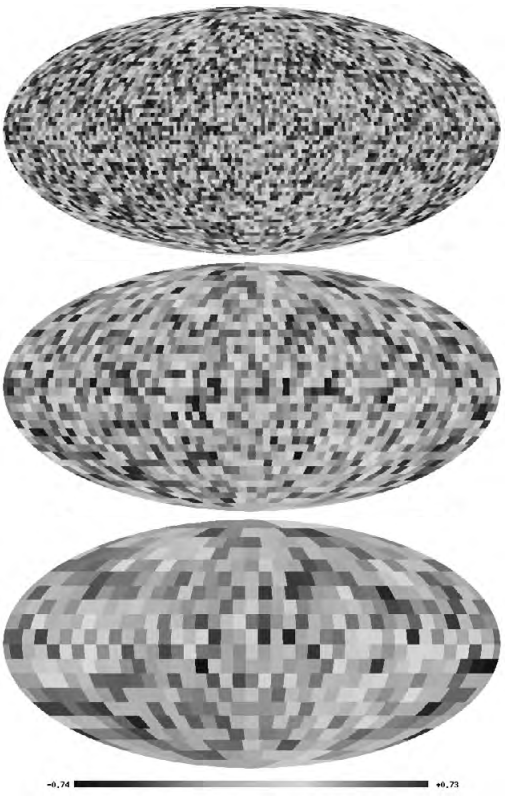


Рис. 1. Карты корреляционных коэффициентов на сфере, построенных для мозаичных корреляций карт ILC и пыли. Сверху вниз: карты для пикселизации со стороной пиксела 160, 300 и 540 минут дуги.

3. КОРРЕЛЯЦИИ КАРТЫ ILC И ПЫЛЕВОЙ ФОНОВОЙ КОМПОНЕНТЫ

В работе [19] был обнаружен значительный байес в распределении корреляционных коэффициентов для карт WMAP ILC и пыли. Рассмотрим это распределение внимательнее. Для этого построим мозаичные карты корреляций с пикселами со сторонами 160, 300 и 540 минут дуги с соответствующими максимальными мультиполями $\ell_{\max}$=33, 17 и 9 в соответствии с определением (4). Полученные карты показаны на рис. 1.

Распределение пикселов (корреляционных коэффициентов) для карт рис. 1 показано на рис. 2. Пунктирными, короткими и длинными штриховыми линиями на рис. 2 отмечены уровни $\pm\sigma$, $\pm2\sigma$ и $\pm3\sigma$ в распределении пикселов для корреляции

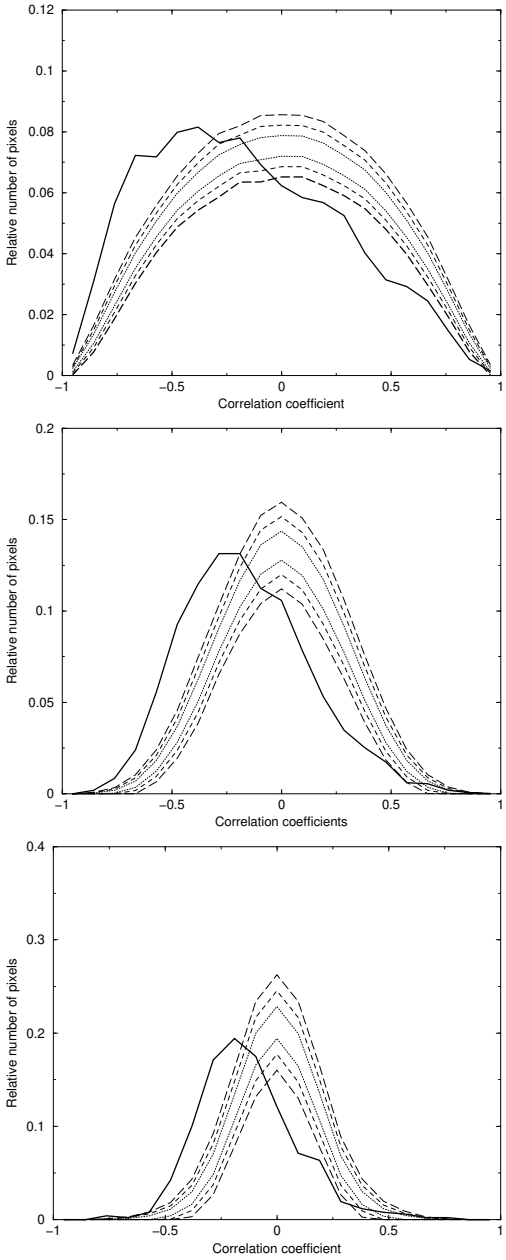


Рис. 2. Гистограммы распределения корреляционных коэффициентов для карт ILC и пыли. Сверху вниз: гистограммы для пикселизации со стороной пиксела 160, 300 и 540 минут дуги. Пунктиром, коротким и длинным штрихом отмечены уровни $\pm\sigma$, $\pm2\sigma$ и $\pm3\sigma$ в распределении пикселов для корреляции случайного сигнала, расчитанного для ΛCDM–космологической модели, и пыли.

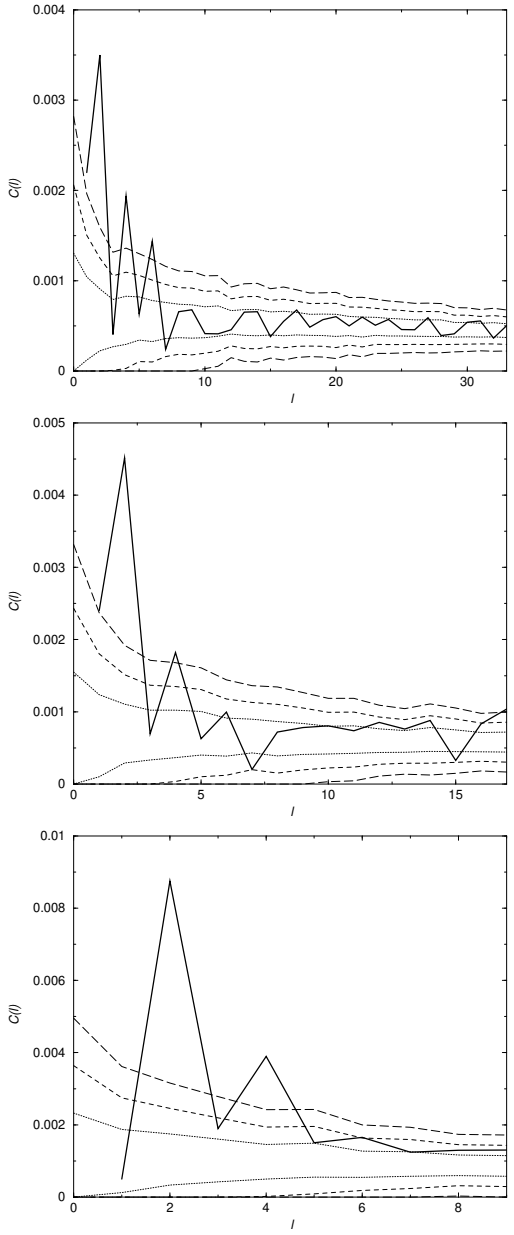


Рис. 3. Спектры мощности $C(\ell)$ карт корреляционных коэффициентов сигналов ILC и пыли. Сверху вниз: спектры мощности для пикселизации со стороной пиксела 160, 300 и 540 минут дуги. Пунктиром, коротким и длинным штрихом отмечены уровни $\pm\sigma$, $\pm2\sigma$ и $\pm3\sigma$ в разбросе величин сигнала для корреляции случайной карты и пыли.

случайного сигнала и пыли. Эти уровни были получены осреднением результатов вычислений для 200 смоделированных случайных карт со спектром мощности в космологии ΛCDM. Кроме сдвига распределения в отрицательные величины, наблюдается существенное искажение формы самого распределения, отличающего его от нормального. Медианные значения распределений для корреляционных пикселов $160'$, $300'$, и $540'$, соответственно -0.2187, -0.2326 и -0.2736. Следует заметить, что байес получаемого распределения подобен байесу, получаемому при статистических оценках качества восстановления сигнала квадруполя методом ILC [24].

Сдвиг распределения в отрицательную сторону задает монополь в карте корреляций. Он, скорее всего, связан с процедурой разделения компонент и наблюдается также в корреляциях одномерных сечений [25, 26]. Однако искажение формы может быть вызвано наличием в картах усиленных корреляций более высоких мультиполей. Для исследования этого явления построим угловой спектр мощности:

$$C(\ell) = \frac{1}{2\ell+1}\left[|a_{\ell 0}|^2 + 2\sum_{m=1}^{\ell}|a_{\ell m}|^2\right]. \qquad (5)$$

Спектры мощности карт с соответствующими $\ell_{\max}$=33, 17 и 9 показаны на рис. 3. Пунктирными, короткими и длинными штриховыми линиями здесь отмечены уровни σ, 2σ и 3σ в разбросе величин спектра для корреляции пыли и случайных карт. Сигнал монополя предварительно был удален. Из рис. 3. ясно видно, что для всех трех спектров мощность квадруполя значительно превышает мощность остальных гармоник. Используя разложение по формуле (1), выделим эту гармонику из данных карты корреляций. Результаты продемонстрированы на рис. 4.

Особенностью этого квадруполя является его чувствительность одновременно к двум выделенным системам координат: эклиптической и экваториальной, что демонстрируется рис. 5. Из рисунка видно, что холодные пятна вблизи галактических полюсов лежат в плоскости эклиптики, а горячие пятна в точности попадают в экваториальные полюса.

Отметим также четвертую гармонику в спектре мощности для данных корреляций с масштабом 160 минут дуги. Ее амплитуда тоже превышает уровень 3σ. Из карты этого мультиполя (рис. 6) видно, что данная корреляция определяется структурами в Галактической плоскости, что, в общем, является ожидаемым на масштабах 15°–20°.

Возвращаясь к квадруполю, покажем, что удаление области Галактической плоскости из вычис-

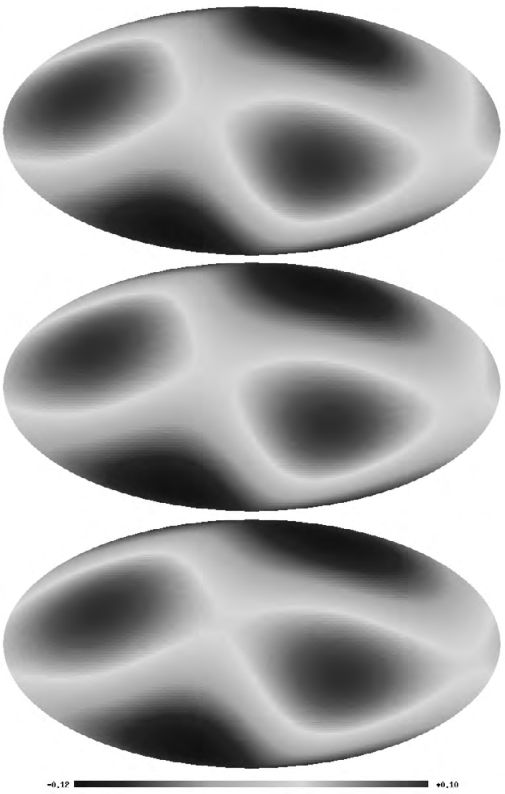


Рис. 4. Квадруполь, выделенный из карт корреляций карт ILC и пыли. Сверху вниз: карты для пикселизации корреляций внутри площадок со стороной 160, 300 и 540 минут дуги.

лений не влияет на положение этой гармоники. Для этой цели используем маску Kp0, которая доступна на сайте миссии WMAP[1] и применяется для экранирования излучения Галактической плоскости и точечных источников.

На рис. 7 показана карта корреляций сигналов пыли и ILC в площадках со стороной 160 минут дуги с наложенной маской Kp0. Там же показана гистограмма отсчетов вне области маски. Хотя полный спектр мощности в данном случае не имеет физического смысла, мы все равно его применяем для оценки статистических свойств сигнала, использовав при этом набор смоделированных карт с наложенной маской. Тогда на основе сравнительных характеристик можно провести статистический анализ. На рис. 7 приведен угловой спектр мощности, вычисленный на полной сфере, на которой в пикселы, попадающие в область маски Kp0, записаны нулевые значения. Пунктирной и штриховыми линиями показаны уровни σ, 2σ и 3σ в разбросе величин сигнала для корреляции случайной карты и пыли с наложенной маской. Отметим, что отношение амплитуды квадруполя в спектре в исследуемой карте корреляций к 3σ–уровню, ожидаемому из случайных карт, без использования маски равно 2.2, а в случае использования маски — отношение равно 5.5. Т.е. экранирование Галактической плоскости увеличивает значимость вклада квадрупольной гармоники в карту корреляций. На рис. 7 также показана карта квадруполя, ось максимумов которого оказалась развернута по отношению к показанной на рис. 4 из-за присутствия маски при спектральном анализе, а ось минимумов осталась без изменений.

[1] http://lambda.gsfc.nasa.gov

4. КОРРЕЛЯЦИИ КАРТЫ ILC И СИНХРОТРОННОЙ ФОНОВОЙ КОМПОНЕНТЫ

В работе [19] обсуждались корреляционные карты сигналов ILC и синхротронного излучения, в которых также визуально выделяется плоскость Галактики (рис. 8), но отсутствует ярко выраженное отклонение гистограммы от гауссова распределения (рис. 9), как это происходит для корреляций распределения сигнала ILC и излучения пыли (рис. 2). Но отметим, что для всех трех гистограмм распределения отсчетов, построенных для окон 160, 300 и 540 минут дуги, все же имеется отклонение от гауссова случая выше уровня 1σ.

Построим спектры мощности карт мозаичных корреляций для сигнала ILC и синхротронного излучения, таким же образом как и для карт пыли. Они приведены на рис. 10 для разных корреляционных окон. На каждом из графиков также показаны пределы разброса сигнала на уровнях $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$ и $\pm 3\sigma$, вычисленные по данным 200 корреляционных карт для случайного сигнала в ΛCDM–космологии. Монополь в картах для корреляционных окон 160 и 300 минут дуги предварительно удален.

Из анализа спектра видно, что, как и в случае пыли, имеется значительно выдающаяся гармоника $\ell = 2$. Для исследования ее ориентации построим ее карту (рис. 11).

На рис. 11 обращает на себя внимание положение гармоники, ориентация которой также не совпадает с Галактической плоскостью. И хотя горячие пятна существенно сдвинуты относительно максимумов карт корреляций с пылью (рис. 4), положение холодных пятен (минимумов) показывает замечательную чувствительность как к плоскости

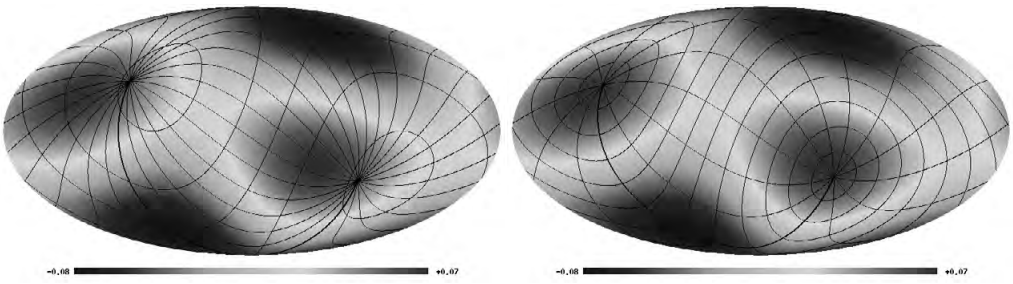


Рис. 5. Эклиптическая (слева) и экваториальная (справа) системы координат на карте квадруполя, построенной по данным с пикселизацией 160 минут дуги. Полюса координатных систем попадают на горячие пятна (светло-серые), экватор проходит через холодные пятна (темно-серые).

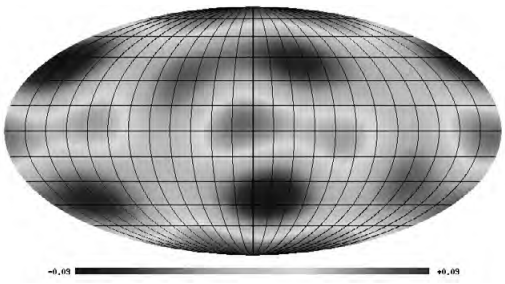


Рис. 6. Карта мультиполя 4 с наложенной галактической сеткой координат. Карта построена для корреляционного окна 160 минут дуги.

эклиптики (рис. 11, слева, квадруполь для масштаба 160 минут дуги), так и к экваториальной плоскости (рис. 11, справа, квадруполь для масштаба 540 минут дуги). Оба минимума в обеих картах практически лежат на соответствующей нулевой широте.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Устойчивое наличие осей квадруполя, соединяющих холодные и горячие пятна, расположенные в одних и тех же областях неба для различных окон корреляции карт ILC и пылевой компоненты в сочетании с спектром мощности, многократно превышающем 1σ, говорит о высоком уровне негауссовости низких мультиполей сигнала WMAP. Отличие этой работы от других, в которых также показана негауссовость низких мультиполей WMAP (см. Введение), заключается не только в применяемом методе, но еще и в двух особенностях: (1) показано, что при чистке данных WMAP методом ILC пылевая компонента дает сильную антикорреляцию выделяемому CMB, проявляющуюся как в распределении корреляционных коэффициентов, так и в угловом спектре мощности. Синхротронная компонента проявляется в данном подходе существенно лишь в спектре мощности; (2) распределение корреляционных коэффициентов позволяет говорить об особом сигнале, “знающем” не только об эклиптической системе координат, но скорее даже об экваториальной.

Обратим внимание, что два отрицательных пятна, обнаруженные в квадруполе карты корреляций, составлены из отрицательных величин, что говорит о противоположном поведении выделенной ILC карты и фоновых компонент в этих областях. Отрицательные области квадруполя строго соответствуют положению зон положительного остаточного сигнала, обнаруженных в работе [10]. Этот факт подтверждает выделенность этих областей карты WMAP. Важным моментом, с нашей точки зрения, является положение этих пятен, которое совершенно не кажется случайным. Координаты минимумов холодных пятен квадруполя близки к координатам (0,0) и (180°,0) как в эклиптической, так и в экваториальной системах координат, а положение горячих пятен (полюса либо в эклиптической, либо в экваториальной систем) чувствительно к размеру выбранного корреляционного масштаба. Мы продемонстрировали этот эффект нанесением координатной сетки на карту квадруполя (рис. 5 и 11).

Отметим, что уверенно сказать, чем вызвана чувствительность к системе координат, пока нельзя. Можно отметить несколько потенциальных эффектов, могущих сыграть свою роль в усилении сигнала в эклиптике:

- наличие пылевой компоненты в плоскости эк-

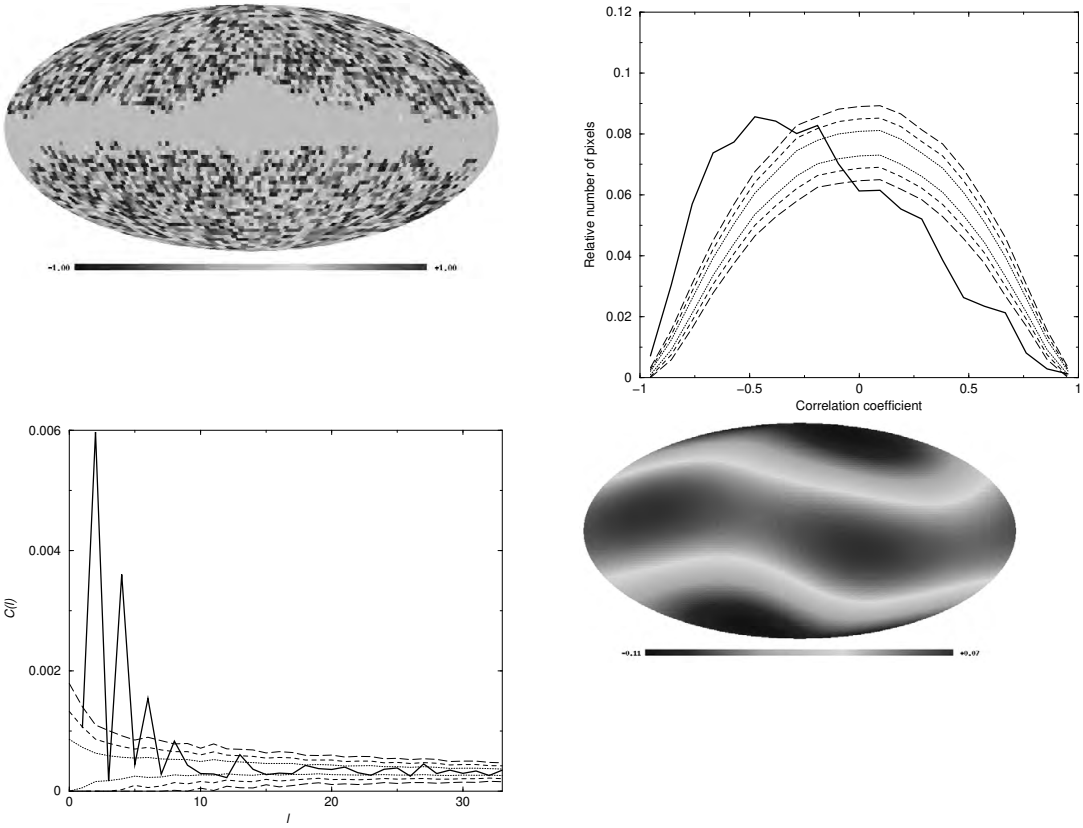


Рис. 7. Карта корреляций сигналов ILC и пыли для корреляционного окна 160 минут дуги и ее статистические диаграммы. На карту наложена маска Kp0. Диаграммы рассчитывались с учетом маски. Вверху слева: карта корреляций для пикселов со стороной 160 минут дуги. Вверху справа: гистограмма распределения пикселов в этой карте вне маски Kp0. Пунктиром, коротким и длинным штрихом отмечены уровни σ, 2σ и 3σ в разбросе величин сигнала для корреляции случайной карты и пыли с наложенной маской. Внизу слева: спектр мощности. Пунктирными и штриховыми линиями показан разброс, оцененный как на предыдущем рисунке. Внизу справа: карта квадруполя.

липтики; несмотря на слабость вклада зодиакальной пыли [10], не исключено пока влияние силиконовых конденсатов [18];

- наличие микроволнового фона, определяемого солнечным ветром; результаты исследований в этом направлении, представленные в виде карт распределения сигнала на полной сфере, пока отсутствуют; кроме того, подобный фон должен быть переменным в связи с активностью Солнца;
- остаточный шум, связанный с неравномерной чувствительностью в пикселе WMAP в зависимости от удаленности от плоскости эклиптики; проведенная мозаичная корреляция и моделирование для шумовой карты WMAP продемонстрировали очень низкие корреляционные характеристики с картой ILC (рис. 12);
- Влияние огромных пылевых поясов у планет–гигантов на эффекты разделения компонент микроволнового излучения, остатки которого выделяются в плоскости эклиптики. Открытое недавно инфракрасным телескопом NASA Spitzer [2] [27] гигантское пылевое кольцо размером более градуса должно дать неучтенный вклад в излучение в плоскости эклиптики в результате множественных прохождений через диаграмму направленности антенны WMAP. Уровень такого вклада в микроволновом диапазоне не оценивался.

Удивительным остается обнаружение в корреляциях экваториальной системы координат, наблю-

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

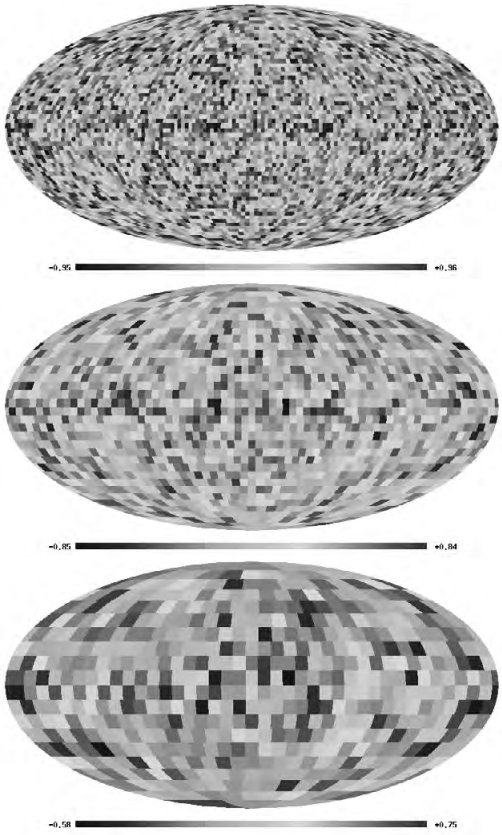


Рис. 8. Карты корреляционных коэффициентов на сфере, построенные для мозаичных корреляций сигнала ILC и синхротронного излучения. Сверху вниз: карты для пикселизации со стороной пиксела 160, 300 и 540 минут дуги.

даемой в положении горячих и холодных пятен квадруполя. Возможность ее физического проявления в точке Лагранжа L2 кажется сомнительным. Нет никаких данных о существовании у Земли гигантского пылевого кольца, подобного обнаруженным у Сатурна, что наблюдалось бы и с Земли, и со спутников; нет подтверждений существования гигантского хвоста магнитосферы Земли, протянувшегося до L2, в которой могли бы существовать области излучения микроволн. Не исключен, но не понятен в данном случае эффект систематики, возможно, связанный с процессом наблюдений. Если считать, что негауссовы отклонения характеристик низких мультиполей могут быть связаны с проблемой разделения компонент, включая плохо изученное излучение плоскости эклиптики, то вопрос, каким образом данные корреляции оказываются чувствительны к экваториаль-

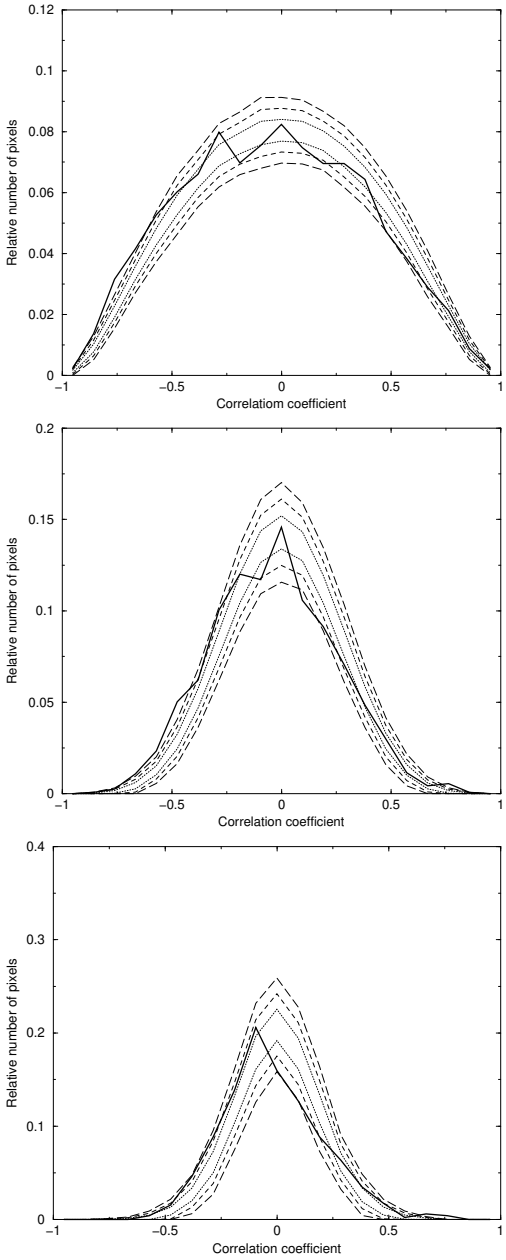


Рис. 9. Гистограммы распределения корреляционных коэффициентов для карт ILC и синхротронного излучения. Сверху вниз: гистограммы для пикселизации со стороной пиксела 160, 300 и 540 минут дуги. Пунктиром, коротким и длинным штрихом отмечены уровни $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$ и $\pm 3\sigma$ в распределении пикселов для корреляции случайного сигнала и синхротронного излучения. Случайный сигнал рассчитывался в ΛCDM-космологической модели.

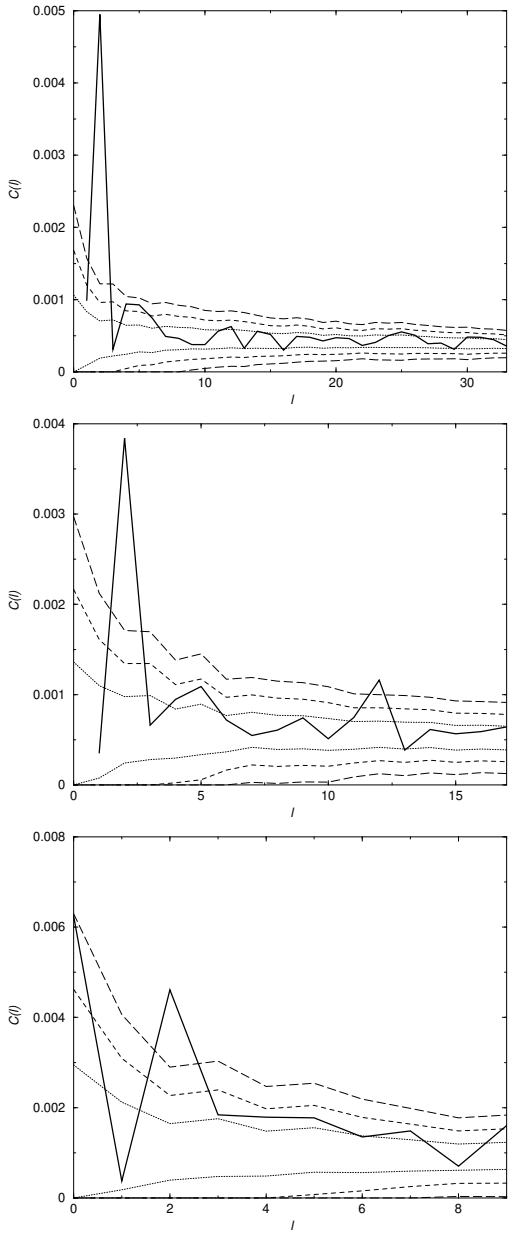


Рис. 10. Спектры мощности $C(\ell)$ карт корреляционных коэффициентов сигналов ILC и синхротронного излучения. Сверху вниз: спектры мощности для пикселизации со стороной пиксела 160, 300 и 540 минут дуги. Пунктиром, коротким и длинным штрихом отмечены уровни $\pm\sigma$, $\pm2\sigma$ и $\pm3\sigma$ в разбросе величин сигнала для корреляции случайной карты и пыли и синхротронного излучения.

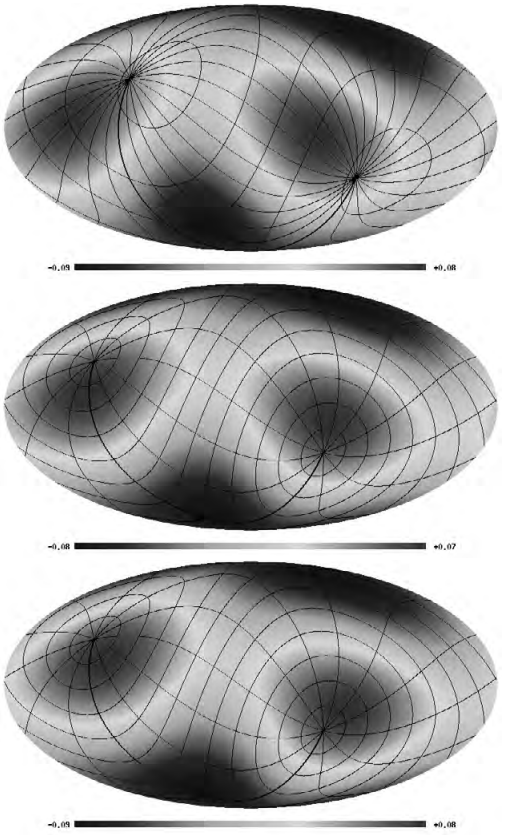


Рис. 11. Квадруполь, выделенный из карт корреляций карт ILC и синхротронного излучения. Сверху вниз: карты для пикселизации корреляций внутри площадок со стороной 160, 300 и 540 минут дуги. На первую карту наложена сетка эклиптической системы координат, на вторую и третью — экваториальная. Полюса координатных систем попадают на горячие пятна (светло-серые), экватор проходит через холодные пятна (темно-серые).

ной системе, требует дополнительного изучения.

В этом плане представляют интерес ожидаемые данные миссии Planck, которые, благодаря лучшей чувствительности и разрешению, позволят построить и исследовать мозаичные карты корреляций в области эклиптической и экваториальной плоскостей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны П.Д. Насельскому за полезную дискуссию. Мы благодарим NASA за возможность использования архива (NASA

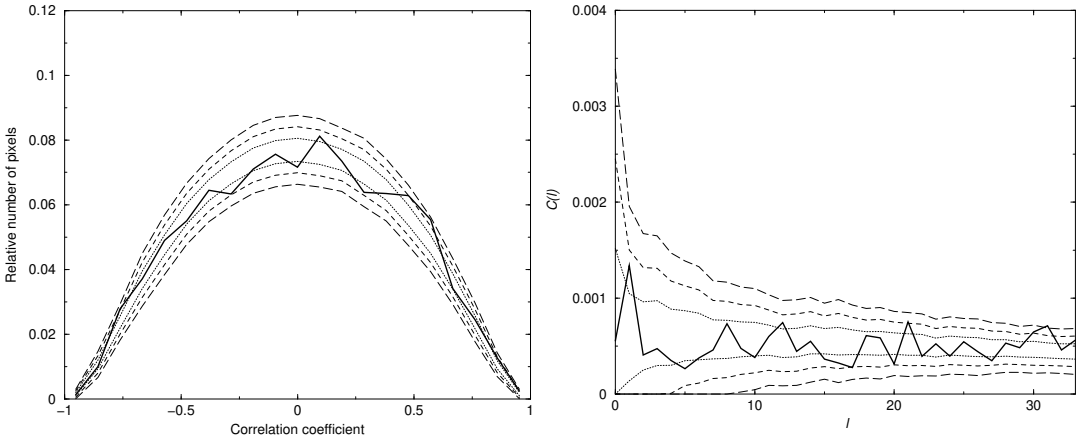


Рис. 12. Слева: гистограмма пикселов для карты мозаичных корреляций ILC и шума. Справа: спектр мощности этой карты. Корреляции вычислялись внутри площадок со стороной 160 минут дуги. Пунктиром, коротким и длинным штрихом отмечены уровни σ, 2σ и 3σ в распределении пикселов для корреляции случайного и шумового сигналов.

Legacy Archive), откуда были взяты данные WMAP. Мы также признательны авторам пакета HEALPix[3] [28], с помощью которого были преобразованы карты WMAP в коэффициенты $a_{\ell m}$. В работе использован пакет GLESP[4] [29, 30] для дальнейшего анализа данных CMB на сфере. Данная работа была поддержана грантом "Ведущие научные школы России" и грантом РФФИ 09-02-00298. О.В.В. благодарит также за частичную поддержку Фонд Содействия Отечественной Науке (программа "Молодые доктора РАН") и Фонд "Династия".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett M. Halpern, G. Hinshaw et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. C. L. Bennett R. S. Hill, G. Hinshaw et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0302208.
3. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 175 (2003), astro-ph/0302209.
4. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa and A. Hamilton, Phys. Rev. D **68**, 123523 (2003), astro-ph/03022496.
5. K. Land and J. Magueijo, Phys. Rev. Lett. **95**, 071301 (2005).
6. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
7. D. N. Spergel et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 377 (2007), astro-ph/0603449.
8. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009), arXiv:0803.0732.
9. E. Komatsu, J. Dunkley, M. R. Nolta et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 330 (2009), arXiv:0803.0547.
10. A. Gruppuso and C. Alessandro, J. Cosmol. Astropart. Phys. **08**, 004 (2009).
11. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, Mon. Not. R. Astron. Soc. **367**, 79 (2006).
12. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, Mon. Not. R. Astron. Soc. **399**, 295 (2009).
13. C.-G. Park, C. Park and J. R. Gott III, Astrophys. J. **660**, 959 (2007), astro-ph/0608129.
14. T. R. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., Astron. Astrophys. **460**, 393 (2006).
15. M. Demianski and A. G. Doroshkevich, Phys. Rev. D **75l**, 3517 (2007).
16. T. Koivisto and D. F. Mota, J. Cosmol. Astropart. Phys. **06**, 018 (2008).
17. J. M. Diego, M. Cruz, J. Gonzalez-Nuevo, et al., arXiv: 0901.4344 (2009).
18. V. Dikarev, O. Preuss, S. Solanki, et al., Astrophys. J. **705**, 670 (2009).

[3] http://www.eso.org/science/healpix/
[4] http://www.glesp.nbi.dk

19. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina and E. K. Majorova, Astrophysical Bulletin **64**, 263 (2009).
20. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **599**, L53 (2003), astro-ph/0310542.
21. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
22. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **62**, 203 (2007).
23. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, O. P. Naselsky, et al., arXiv0904.2517 (2009).
24. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov and M. T. B. Nielsen, Astrophysical Bulletin **63**, 216 (2008), arXiv:0707.1484.
25. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Yu. N. Parijskij, Astrophysical Bulletin **63**, 95 (2008).
26. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Yu. N. Parijskij, In *"Practical Cosmology", V.II, Proc. Internat. Conf. "Problems of Practical Cosmology"*, Ed. by Yu. Baryshev, Igor N. Taganov, and P. Teerikorpi (Russian Geograph. Soc., St.Petersburg, 2008), p. 239.
27. W. Clavin, `http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2009-19/release.shtml` (2009).
28. K. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **622**, 759 (2005).
29. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. **D 14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
30. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).

СТАТИСТИКА ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КАРТЫ WMAP ILC В НАПРАВЛЕНИИ НА ДАЛЕКИЕ РАДИОГАЛАКТИКИ*

О. В. Верходанов[1], М. Л. Хабибуллина[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Для 2442 радиогалактик каталога, скомпилированного по данным архивов NED, SDSS, CATS, с красными смещениями $z > 0.3$ мы провели анализ амплитуды флуктуаций температуры микроволнового фона (CMB) на карте ILC в релизе седьмого года наблюдений миссии WMAP в точках, соответствующих направлению на эти объекты. Мы определили дипольную компоненту фона и проверили гипотезу Кашлинского о существовании "темного" потока, определяемого для оцененной дипольной компонеты CMB WMAP по величине анизотропии CMB в направлении на скопления галактик. Мы показали, что амплитуда этого диполя $T_{\max} = 0.012$ мК находится внутри σ-интервала, оцененного путем моделирования Монте Карло для гауссовых флуктуаций сигнала CMB в ΛCDM-модели. Низкая амплитуда диполя говорит о невозможности по данным WMAP подтвердить эту гипотезу. Кроме того, мы исследовали статистику амплитуды флуктуаций микроволнового сигнала в направлении на радиогалактики. Обнаружено ослабление абсолютного значения средней величины сигнала в соответствующих областях.

Ключевые слова: радиоисточники — теоретическая и наблюдательная космология

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование свойств крупномасштабной структуры, отражающихся в статистике сигнала космического микроволнового фона (Cosmic Microwave Background—CMB), представляет особый интерес в связи с появлением новых высокоточных наблюдений в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [1–4].

Используя данные о скоплениях галактик и величину флуктуаций сигнала CMB в направлении на их центры, вызванного эффектом Сюняева–Зельдовича (СЗ) [5], можно оценить космологические параметры (постоянную Хаббла H_0 и параметр плотности Ω_0) [6]. Кроме того, одна из составляющих эффекта СЗ—кинематический эффект СЗ, обусловленный собственным движением скопления как целого по отношению к системе отсчета CMB,—открывает возможности исследования крупномасштабных потоков материи. В частности, в работах [7, 8] описывается исследование крупномасштабных "темных" потоков в движении скоплений галактик, выполненное на основе данных WMAP5 и каталога, построенного по рентгеновским данным и содержащего свыше 1000 скоплений. Авторы рассчитали диполь по значениям пикселов CMB, определяемый, по их мнению, кинематическим эффектом СЗ и демонстрирующий постоянную скорость, по крайней мере, в масштабе 800 Мпк.

Отметим, что, несмотря на малую чувствительность WMAP к эффекту СЗ из-за сравнительно плохого разрешения финальной карты выделенного сигнала CMB (предельная сферическая гармоника—мультиполь—в первых релизах WMAP для ILC-карты CMB есть $\ell_{\max} \sim 100$ или в терминах разрешения—$\theta \sim 55'$ а в релизе 7 года $\ell_{\max} \sim 150$ ($\theta \sim 35'$), в то время как СЗ-эффект для большинства существенно проявляется на малых масштабах: $\theta < 10'$), обсуждаемый эффект представляет несомненный интерес в плане его проявления в данных продолжающейся миссии Planck[1].

Также отметим, что, несмотря на ограничения по разрешению (лучшее разрешение $12.6'$—на канале W с частотой 94 ГГц) и чувствительности карт WMAP, предпринимались различные попытки измерить эффект СЗ статистически как в популяционном осреднении ("stacking") (см., например, работы последнего времени [9,10]), так и напрямую для отдельных ярких скоплений, таких как Кома [10], где эффект наблюдается. Диего и Партридж [9] использовали три ка-

*Астрофизический бюллетень. 2011. 66(2). С. 199

[1]http://www.rssd.esa.int/Planck/

нала Q (43 ГГц, FWHM = 0.51°), V (61 ГГц, 0.35°) и W (94 ГГц, 0.22°) и получили осредненные профили в направлении на известные скопления. В частности, кроме наличия искомого сигнала и роста его амплитуды с частотой, авторы обнаружили, что величина сигнала меньше, чем ожидалось по рентгеновским данным, что они связали с присутствием точечного источника в скоплении. Команда WMAP [10] провела аналогичное исследование, использовав два канала: V и W. Они также применили осреднение разных участков в направлении на известные скопления с рентгеновским излучением и увидели эффект. Кроме того, они обнаружили, что эффект прослеживается вплоть до масштабов $\theta = 1.05°$. Сигнал на масштабе $\theta = 0.58°$ рассматривается как истинный, а на $\theta = 1.05°$ как статистическая флуктуация. При этом авторы [10] заключили, что видимый эффект для осредненных источников согласуется с ожидаемым из рентгеновских наблюдений. Подчеркнем, что проведенные оценки сделаны для среднего по небу источника, дающего эффект СЗ. Последние эксперименты, такие как Атакамский [11] и Planck [12], уже позволяют выделить и увидеть это эффект напрямую.

Несмотря на то, что для большинства скоплений эффект СЗ в данных WMAP напрямую не виден, а оценивается статистически, подход, предлагаемый в [7, 8], с нашей точки зрения, заслуживает внимания. Мы развиваем его в данной работе, используя для анализа амплитуду флуктуаций температуры в точках, соответствующих направлению на далекие радиогалактики нашего каталога. Для обнаружения возможного "темного" потока нам нужно оценить сигнал в направлении на далекие радиогалактики. Полезным моментом является тот факт, что сигнал CMB на карте флуктуаций ILC выделяется с использованием каналов, на которых эффект СЗ, если он есть, будет иметь отрицательный сигнал. Удачно, что угловой масштаб эффекта СЗ, обнаруженного командой WMAP [10], соответствует разрешению карты ILC 7 года наблюдений.

В стандартной схеме формирования радиогалактик, радиоисточник загорается в результате слияния (мерджинга) галактик, образования аккреционного диска и джетов, наблюдаемых в радио и других диапазонах длин волн. Как правило (см. обзоры в [13, 14]), самые мощные радиогалактики, видимые на больших красных смещениях, отождествляются с гигантскими эллиптическими галактиками, являющимися в основном центральными галактиками скоплений и образованными путем мерджинга. Это свойство (радиоизлучение) может быть использовано для поиска далеких скоплений и протоскоплений галактик. Так, например, в работе [15] представлены результаты программы, проводимой с помощью телескопа VLT, по поиску формирующихся скоплений галактик возле мощных радиогалактик на красных смещениях $2 < z < 5.2$ с радиопотоками $B_{2.7\,\text{ГГц}} > 10^{33}$ эрг с^{-1} Гц^{-1} ср^{-1}. Авторы отобрали 150 объектов и изучили поля вокруг девяти из них. В полях отбирались галактики, излучающие в Lyα (так называемые Lyα-эмиттеры), у которых измерялось красное смещение. С использованием данных о пространственной плотности объектов делался вывод об их принадлежности к протоскоплению. Размер таких протоскоплений составляет, по крайней мере, 1.75 Мпк. В работе показано, что 75% радиогалактик с $z > 2$ ассоциируются с протоскоплениями. Отсюда можно получить оценку, что приблизительно $3{\times}10^{-8}$ формирующихся скоплений попадает в интервал $2 < z < 5.2$ на сопутствующий куб со стороной 1 Мпк с активным радиоисточником. Но вероятно, что в заданном диапазоне красных смещений число протоскоплений может быть больше, т.к. активный радиоисточник может просто не наблюдаться.

Используя каталог далеких (например, $z > 0.3$) радиогалактик, можно отследить положения скоплений и протоскоплений галактик, которые, в свою очередь, могут повлиять на флукутации реликтового фона. Для этой цели хорошо подходит подготовленная ранее нами выборка радиогалактик [16–18], которую мы и применяем в нашем исследовании.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

2.1. Входные массивы

Выборка радиогалактик с $z > 0.3$ [16–20] была построена с помощью инструментария и архивов баз данных NED[2], CATS[3] [21, 22], SDSS[4] [23] с целью применения в различных статистических и космологических тестах [13, 24, 25], в которых требуется анализ большой выборки объектов одной природы. Для построения первичного списка объектов использовалась база данных NED, из которой выбирались объекты с параметрами, основные из которых — красное смещение ($z > 0.3$) и морфологические свойства радиогалактики. Исходный каталог содержал 3364 объекта. Такая выборка галактик загрязнена объектами с неполной информаций, либо объектами с другими свойствами. Поэтому особое внимание было уделено чистке исходной выборки от лишних источников, к которым мы отнесли галактики (1) с красными сме-

[2] http://nedwww.ipac.caltech.edu
[3] http://cats.sao.ru
[4] http://www.sdss.org

щениями, определяемыми фотометрическим методом; (2) со свойствами квазаров по имеющимся данным литературы. Окончательный каталог содержит 2442 источника со спектроскопическими красными смещениями, фотометрическими величинами и плотностями потоков в радиодиапазоне, размерами радиоисточников, а также радиоспектральными индексами, которые вычислялись по результатам кросс-идентификации с радиокаталогами, хранящимися в CATS, в диапазоне частот от 325 МГц до 30 ГГц. Положение 2442 радиогалактик на сфере показано на рис. 1.

В качестве карты CMB мы использовали карту распределения анизотропии микроволнового фона, восстановленную из многочастотных наблюдений методом внутренней линейной комбинации (ILC—Internal Linear Combination) фоновых компонент [1] в программе наблюдения космической миссии WMAP[5] (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Для построения карты WMAP использовались данные в пяти полосах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W). Карта ILC содержит информацию о распределении микроволнового фона для не очень высоких гармоник ($\ell \le 150$). Тем не менее, это наиболее проверенная и используемая карта CMB в настоящее время. Для анализа данных мы используем распределение сигнала $\Delta T(\theta,\phi)$, описывающего анизотропию температуры на сфере, с двумя предельными значениями (по угловому разрешению) мультиполей $\ell_{\max} \le 150$ ($\theta \ge 36'$) и $\ell_{\max} \le 20$ ($\theta \ge 260'$) в соответствии с разложением на сферические гармоники:

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

где сферическая гармоника

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

$x = \cos\theta$, $P_\ell^m(x)$ — присоединенные полиномы Лежандра, ℓ и m — номер мультиполя и его моды соответственно. Для разложения по сферическим гармоникам мы использовали пакет GLESP[6] [26].

2.2. Гистограммы сигнала в пикселах CMB

Для анализа гауссовости распределения в первом порядке и сравнения с моделью мы взяли амлитуду флуктуаций сигнала CMB в пикселах карты, на которые проецируются радиогалактики (рис. 2), и построили гистограммы ее распределения (рис. 3). Одним из правил отбора радиогалактик в нашей выборке было наличие спектроскопического красного смещения, измеряемого, как правило, у объектов вне плоскости Галактики, поэтому отсутствие источников в центральной полосе рис. 2 (плоскость Галактики) является селекционным эффектом. Размер пиксела карт, используемых для анализа, при разрешении $\ell_{\max} \le 150$ составляет $36' \times 36'$, и при $\ell_{\max} \le 20$—$260' \times 260'$, соответственно. Анализ был проведен для карт с $\ell_{\max} \le 150$, т.к. данные ILC в релизе WMAP7 представлены с лучшим разрешением. На рис. 3 приведены соответствующие гистограммы распределения амплитуды флуктуаций микроволнового фона карты ILC в пикселах, соответствующих направлению на радиогалактики каталога. На гистограммах приведен 1σ-разброс, рассчитанный двумя методами по статистике пикселов: (1) для данных 100 реализаций карты микроволнового фона в ΛCDM–космологической модели с однородными и изотропными случайными гауссовыми полями, приводящими к соответствующим флуктуациям CMB, и (2) для 100 реализаций случайного расположения 2442 точек на самой карте ILC WMAP7. Величина бина гистограммы равна 0.02 мК.

Отметим особенности распределений, показанных на рис. 3. Все распределения величины вариации сигнала в исследуемых пикселах близки к нормальным. Максимум распределения N находится строго в области нулевого значения амплитуды флуктуаций. Его величина превышает средний ожидаемый уровень более, чем на 3σ для карт с разрешением $\ell_{\max} \le 150$ и порядка 2σ с $\ell_{\max} \le 20$ для оценок разброса, вычисленных методом Монте-Карло для гауссовых флуктуаций фона в ΛCDM-космологии (левые графики рисунка), а также выше 2σ для оценок, полученных в случайно взятых пикселах карты ILC. Приведенные оценки сведены в таблицу. Кроме того, как для разрешения $\ell = 150$, так и для разрешения $\ell = 20$ отношение $(T_{\max}/T_{\min})^{\rm lcdm} > (T_{\max}/T_{\min})^{\rm ilc}$, что говорит о меньшей дисперсии вариации сигнала на карте, чем ожидается в модели ΛCDM.

2.3. Оценка диполя

Используя величину флуктуации температуры в пикселах на карте с разрешением $\ell = 150$, мы оценили методом наименьших квадратов соответствующий им диполь в виде

$$T(l,b) = T_x \cos(l)\cos(b) + T_y \sin(l)\cos(b) + T_z \sin(b)\,,$$

где (l,b) — галактические координаты: долгота и широта, $T(l,b)$ — величина флуктуации температу-

[5] http://lambda.gsfc.nasa.gov
[6] http://www.glesp.nbi.dk

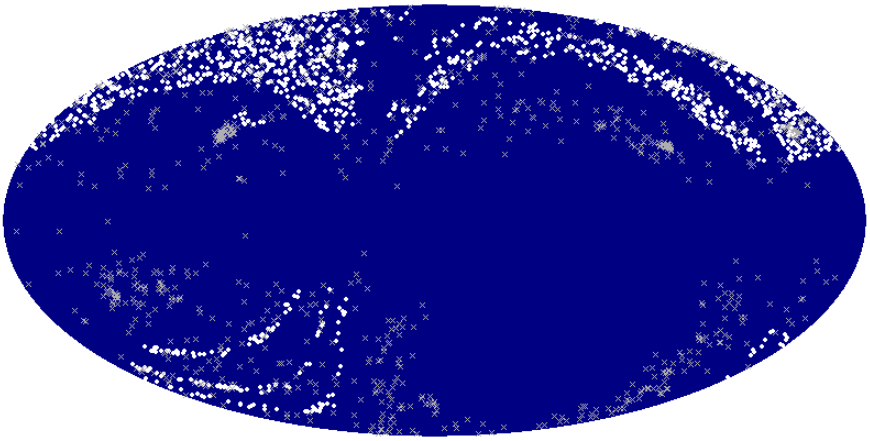


Рис. 1. Положение отобранных радиоисточников на небесной сфере в галактических координатах. Белыми кружками отмечены объекты SDSS, серыми крестиками — остальные источники.

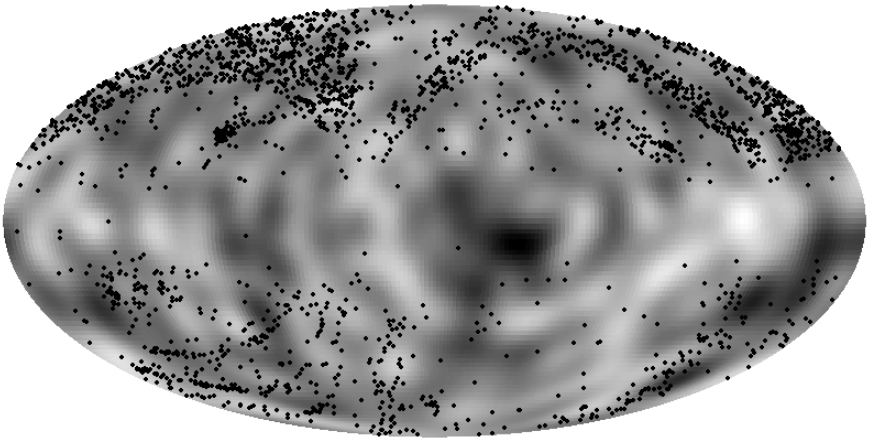


Рис. 2. Положение отобранных радиогалактик (черные кружки) на карте CMB WMAP с разрешением $\ell_{\max} = 20$ в галактических координатах. Темные пятна на карте соответствуют холодному сигналу, светлые — горячему.

ры CMB в мЯн, снятая в пикселах расположения радиогалактик, и (T_x,T_y,T_z) — компоненты диполя, которые получились равными соответственно (0.0116, 0.0036, 0.0026).

Отсюда имеем для экстремумов: $T_{\rm extrem} = \pm\sqrt{T_x^2+T_y^2+T_z^2}$, $b = \pm\arctan(T_z/\sqrt{T_x^2+T_y^2})$, $l = \arctan(T_y/T_x)$, или в максимуме $T_{\max} = 0.0124$ мК с координатами $(l_{\max}, b_{\max}) = (17^\circ.307, 11^\circ.844)$ и в минимуме $T_{\min} = -0.0124$ мК с координатами $(l_{\min}, b_{\min}) = (197^\circ.307, -11^\circ.844)$. Положение диполя на сфере показано на рис. 4. Несмотря на то, что оцененный диполь визуально "тяготеет" к центру Галактики, значимость его положения, а также реальность существования нам представляется сомнительной в виду малости его амплитуды: $T_{\max} = 0.012$ мК. Такая величина находится внутри σ-разброса от среднего, т.е. внутри шума, оцененного путем моделирования 50 реализаций сигнала CMB в ΛCDM-модели и определения параметров диполя в каждой из реализаций для координат каталога радиогалактик. По результатам моделирования имеем среднюю оценку величины параметров $(T_x,T_y,T_z) = (0.003\pm0.016, 0.001\pm0.018, -0.002\pm0.010)$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы исследовали свойства сигнала CMB WMAP7 в площадках далеких ($z > 0.3$) радиогалактик.

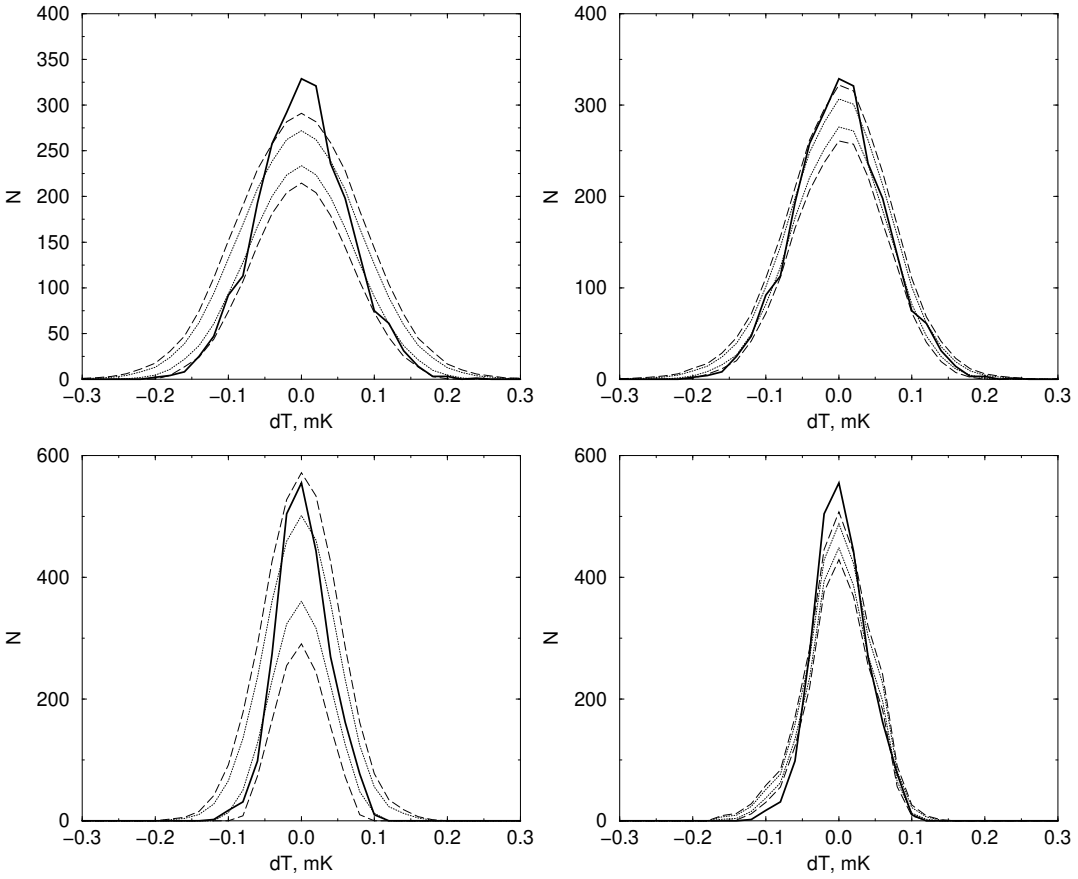


Рис. 3. Гистограммы распределения величины (толстая сплошная линия) сигнала микроволнового фона на карте ILC, измеренные в пикселах, соответствующих направлению на радиогалактики. Вверху: гистограммы для пикселов карт с разрешением $\ell_{\max} \leq 150$. Внизу: гистограммы для пикселов карт с разрешением $\ell_{\max} \leq 20$. Слева: пунктирными и штриховыми линиями показаны уровни 1σ и 2σ-разбросов соответственно, рассчитанных по данным 100 реализаций ΛCDM космологической модели. Справа: пунктирными и штриховыми линиями показаны уровни 1σ и 2σ-разбросов соответственно, рассчитанных по данным 100 реализаций случайного расположения точек на карте ILC WMAP седьмого года.

В целом, распределение сигнала в площадках соответствует нормальному распределению. Причем, в этом распределении амплитуда гистограммы оказывается выше ожидаемой (более чем на σ-разброс) как для ΛCDM-космологической модели, так и для случайного позиционирования объектов на карте ILC WMAP. Т.е. в пикселах, соответствующих направлению на далекие радиогалактики, доминируют малые (стремящиеся к нулю) величины флуктуаций, что приводит к возрастанию амплитуды гистограммы выше ожидаемой величины. Отсутствие сдвига в положении максимума гистограммы говорит либо об отсутствии какого либо сигнала в данных пикселах, либо о компенсации эффекта СЗ радиоизлучением галактики (см., например, [9]). Теоретически можно было бы ожидать сдвиг либо в сторону отрицательно сигнала в случае эффекта СЗ, либо — в положительную сторону в случае существования оставшегося сигнала от радиоисточника после разделения компонент. При наличии обоих факторов мы бы видели увеличение ширины гистограммы по сравнению с простыми моделями возмущения фона. Однако наблюдается обратный эффект: полученное распределение сигнала CMB WMAP7, измеренного в областях расположения радиогалактик на сфере, у́же, чем ожидается для случайных гауссовых флуктуаций и чем наблюдается в среднем в карте ILC. Кроме того, дисперсия распределения s_0 меньше, чем ожидаемая в моделях, что также го-

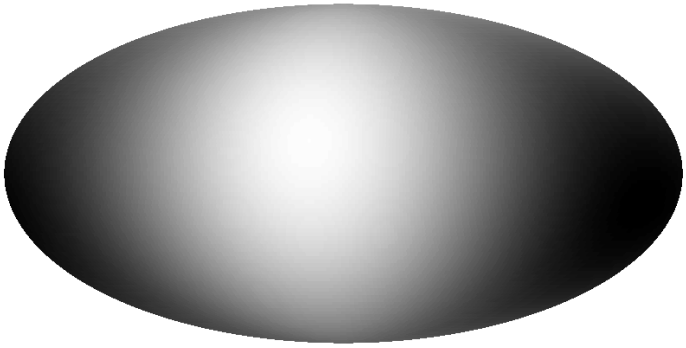


Рис. 4. Положение диполя на сфере, определенного методом наименьших квадратов по значениям пикселов CMB в местах расположения далеких радиогалактик, в галактических координатах.

Таблица 1. Параметры нормального распределения (амплитуда N и параметр ширины $s_0 = \theta_{0.5}(8\ln 2)^{-1/2}$), соответствующего распределению амплитуды флуктуаций температуры CMB в пикселах расположения радиогалактик для карт с разрешением $\ell = 150$ и $\ell = 20$. Оценки распределения минимума и максимума температуры при σ-разбросе получены при моделировании флуктуаций фона в 100 реализациях случайного сигнала в ΛCDM космологической модели (отмечено как lcdm) и при моделировании 100 реализаций случайного разброса положений радиогалактик на карте ILC (отмечено как ilc).

Распределение величины	Амплитуда N	s_0, мК
$T(\ell = 150)$	319.2	0.060
$T_{\min}(\ell = 150)^{\rm lcdm}$	232.7	0.072
$T_{\max}(\ell = 150)^{\rm lcdm}$	271.0	0.082
$T_{\min}(\ell = 150)^{\rm ilc}$	276.1	0.064
$T_{\max}(\ell = 150)^{\rm ilc}$	304.4	0.068
$T(\ell = 20)$	552.6	0.035
$T_{\min}(\ell = 20)^{\rm lcdm}$	362.4	0.041
$T_{\max}(\ell = 20)^{\rm lcdm}$	501.1	0.049
$T_{\min}(\ell = 20)^{\rm ilc}$	438.8	0.041
$T_{\max}(\ell = 20)^{\rm ilc}$	474.5	0.043

ворит об увеличенном числе пикселов с нулевым сигналом в полях радиогалактик. И если соотношение $(T_{\max}/T_{\min})^{\rm lcdm} > (T_{\max}/T_{\min})^{\rm ilc}$ можно объяснить заниженным значением амплитуды квадруполя ILC, то причина эффекта ослабления сигнала в зонах радиогалактик пока непонятна.

Мы также попытались проверить эффект существования диполя в данных CMB в области скоплений галактик, обнаруженный в работах [7, 8]. Он определяется, как предполагают авторы, кинематическим эффектом СЗ и связан с “темным потоком” материи. Для проверки этого явления мы построили диполь с использованием значений в пикселах положения радиогалактик и обнаружили, что его амплитуда находится ниже σ-уровня шума модельных вариаций. Заметим, что размер пиксела карты ILC в общем не позволяет значимо исследовать эффект СЗ. Кроме того, ясно, что ненулевой диполь практически всегда может быть определен для конечной выборки пикселов с ненулевыми значениями, что и демонстрируют модели. Хотя мы не исключаем возможности, что для близких скоплений галактик флуктуации фона могут показать наличие общего движения, отличного от известного кинематического диполя CMB, но для далеких объектов, как в нашем случае, будет доминировать Хаббловский поток. Этот эффект можно будет проверить после опубликования карт миссии Planck.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны П. Д. Насельскому за полезные дискуссии, С. А. Трушкину за ценные замечания, позволившие улучшить текст, и О. Насоновой за помощь при расчетах в пакете MATLAB. При исследовании использовалась база данных внегалактических объектов NED Авторы также применяли базу данных радиоастрономических каталогов CATS [27], систему обработки радиоастрономических данных FADPS[7] [28, 29] и пакет GLESP для анализа данных микроволнового излучения на сфере [30, 31]. Работа была поддержана грантами "Ведущие научные школы России" (школа С. М. Хайкина) и РФФИ (проекты No 09-02-00298, 08-02-00486). О.В.В. также благодарит за частичную поддержку Фонд Дмитрия Зимина "Династия".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
3. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009), astro-ph/0803.0732.
4. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., submitted (2010), arXiv:1001.4744.
5. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, Astrophys. Space Sci. **4**, 301 (1969).
6. G. De Zotti, R. Ricci, D. Mesa, et al., Astron. Astrophys. **431**, 893 (2005), astro-ph/0410709.
7. A. Kashlinsky, F. Atrio-Barandela, H. Ebeling, et al., Astrophys. J. **712**, 81 (2010), astro-ph/0910.4958.
8. F. Atrio-Barandela, A. Kashlinsky, H. Ebeling, et al., Astrophys. J. **719**, 77 (2010), astro-ph/1001.1261.
9. J. M. Diego and B. Partridge, Mon. Not. R. Astron. Soc. **402**, 1179 (2010).
10. E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 18 (2011), astro-ph/1001.4538.
11. A. D. Hincks, V. Acquaviva, P. A. R. Ade, et al. Astrophys. J., Suppl. Ser. **191**, 423 (2010).
12. N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys., submitted (2011), astro-ph/1101.2043.
13. О. В. Верходанов и Ю. Н. Парийский, *Радиогалактики и космология*, (Физ.Мат.Лит., Москва, 2009).
14. G. Miley and C. De Breuck, Astron. Astrophys. Rev **15**, 67 (2008).
15. B. P. Venemans, H. J. A. Röttgering, G. K. Miley, et al., Astron. Astrophys. **461**, 823 (2007).
16. M. L. Khabibullina and O. V.Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 123 (2009), astro-ph/0911.3741.
17. M. L. Khabibullina and O. V.Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 276 (2009), astro-ph/0911.3747.
18. M. L. Khabibullina and O. V.Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 340 (2009), astro-ph/0911.3752.
19. О. В. Верходанов и М. Л. Хабибуллина, Письма в АЖ **36**, 9 (2010), astro-ph/1003.0577.
20. М. Л. Хабибуллина и О. В. Верходанов, Астрон. ж. **88**, 333 (2011).
21. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, ASP Conf. Ser. **125**, 322 (1997), astro-ph/9610262.
22. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005), astro-ph/0705.2959.
23. D. P. Schneider, P. B. Hall, G. T. Richards, et al., Astron. J. **134**, 102 (2007).
24. O. V. Verkhodanov and Yu. N. Parijskij, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **55**, 66 (2003).
25. O. V. Verkhodanov and Yu. N. Parijskij, in *Proc. 14th Internat. School, "Particles and Cosmology"*, Ed. by S. V. Demidov, V. A. Matveev, and V. A. Rubakov (INR, Moscow, 2008), p. 109.
26. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
27. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Data Sci. J. **8**, 34 (2009), astro-ph/0901.3118.
28. O. V. Verkhodanov, ASP Conf. Ser. **125**, 46 (1997).
29. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
30. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
31. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Int. J. Mod. Phys. D, accepted (2011), astro-ph/0904.2517.

[7] `http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html`

НЕГАУССОВОСТЬ СТАТИСТИКИ ПИКОВ В КОНТРАСТНЫХ ПЯТНАХ WMAP ILC*

О. В. Верходанов[1], А. А. Басова[2]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Санкт-Петербургский Государственный университет, Астрономическое отделение

Проводится исследование статистики изолированных максимумов и минимумов в области трех контрастных пятен в данных WMAP7 ILC. Показана негауссовость распределения сигнала в этих областях. Продемонстрировано, что негауссовы свойства связаны с проявлением низких гармоник ($\ell \leq 20$). Обсуждаются возможные причины этой негауссовости.

Ключевые слова: радиоисточники

1. ВВЕДЕНИЕ

Самой известной и широко используемой картой космического микроволнового фона (Cosmic Microwave Background — CMB) является карта распределения анизотропии реликтового излучения, восстановленная из многочастотных наблюдений методом внутренней линейной комбинации (ILC — Internal Linear Combination) фоновых компонент [1]. Карта построена по данным наблюдений, проведенных с помощью спутника WMAP[1] (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [1–4], в пяти частотных полосах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W). В результате анализа данных WMAP первого, третьего, пятого и седьмого годов кроме карт анизотропии и поляризации CMB, получены карты фоновых компонент (синхротронного и свободно-свободного излучения, излучения пыли), а также рассчитаны их спектры мощности.

Полная карта микроволнового фона неба на сравнительно низких мультиполях ($\ell \leq 150$) чрезвычайно интересна для исследования гауссовости распределения фонового сигнала. Предоставление данных в общее пользование привело к большому числу работ по исследованию статистики сигнала в различных диапазонах мультиполей. Как было отмечено в ряде работ [5–7], имеются серьезные аргументы, говорящие о том, что в данной карте на различных угловых масштабах присутствует остаточный вклад фоновых компонент, который, в частности, и дает обнаруживаемую негауссовость. Этот вклад может проявляться в обнаруженной ранее связи в квадруполе между очищенной картой микроволнового фона и галактическими компонентами излучения [8–10]. Негауссовость сигнала в данных WMAP, кроме фазового анализа [5, 6, 11], была также обнаружена другими методами на различных угловых масштабах: с помощью функционалов Минковского [12], вейвлет–анализа [13], корреляционных функций [14], как асимметрия в распределении сигнала [15], а также другими методами.

Одним из способов проверки гауссовости карты является статистика пиков, вычисляемая как в отдельных областях сферы, так и на полной карте. Детальный разбор поведения этой статистики рассмотрен в книге [16], в которой также рассматривается поведение функционалов Минковского, рассчитываемых для данных CMB. Поведение статистики пиков по интегральным характеристикам близко к функционалу Минковского третьего рода — генусу.

В данной работе мы изучаем такую статистику для анализа поведения сигнала CMB в области холодных и горячих пятен. Для анализа структуры сигнала и его амплитуды использовалась программа `SExctractor`[2] [17], разработанная в Institut de Astrophysique de Paris и Observatoire de Paris. `SExtractor` является программой, в результате работы которой строится каталог объектов, выделяемых на астрономическом изображении. Программа позволяет определять параметры объектов: амплитуду, положение, размер и ориентацию, и, таким образом, может быть использована для под-

*Астрофизический бюллетень. 2011. 66(4). С. 436
[1]`http://lambda.gsfc.nasa.gov`
[2]`http://terapix.iap.fr/soft/sextractor`

счета числа положительных и отрицательных пиковых значений флуктуаций температуры неба на выбранной площадке выше или ниже заданного уровня.

Для проверки получаемой статистики мы также рассчитали 100 реализаций случайного гауссова поля космического микроволнового фона в космологической модели ΛCDM. Для этих реализаций мы повторили анализ статистики сигнала в выбранных участках неба, что и для карты ILC, и получили оценки допустимого уровня дисперсии подсчетов положительных и отрицательных пиков. Кроме того, мы использовали саму карту ILC для оценки и сравнения статистики пиков в случайных зонах, но при той же реализации шума. Карта ILC была построена с разрешением $\ell_{\max} = 150$ согласно представленному релизу данных WMAP7 [4]. Ниже мы приводим результаты нашего анализа.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ЗОНЫ

Для исследования статистики сигнала мы выбрали области неба, известные как Холодное Пятно I и Холодное Пятно II [18], а также область со скоплением положительных пиков, которую мы будем называть горячей зоной (рис. 1). Галактические координаты углов исследуемых областей следующие: горячая зона — ($b_1 = -30°$, $l_1 = 195°$, $b_2 = 30°$, $l_2 = 255°$), Холодное Пятно I — ($b_1 = -30°$, $l_1 = -15°$, $b_2 = 10°$, $l_2 = -50°$), Холодное Пятно II — ($b_1 = -70°$, $l_1 = 195°$, $b_2 = -45°, l_2 = 220°$), а также случайное поле — ($b_1 = 10°$, $l_1 = 10°, b_2 = 50°, l_2 = 60°$).

Холодное Пятно II, известное просто как Холодное Пятно (CS — Cold Spot), демонстрирует негауссовы свойства. На CS, видимое на картах исходного сигнала и CMB, обратили внимание как на пятно, отклоняющееся от гауссовой статистики при применении вейвлет–анализа уже в данных первого года наблюдений WMAP [19–22]. Кроме того, Рудник и др. [23], используя карты NVSS, обнаружили в области CS понижение пространственной плотности радиоисточников. Отсюда они сделали предположение о существовании гигантского войда размером порядка 140 Мпк на красном смещении $z < 1$, вызывающего гравитационную аномалию, приводящую к интегральному эффекту Сакса-Вольфа [24] и проявляющуюся как CS. Были предложены также экзотические объяснения эффекта, такие как текстура — топологический дефект во время фазового перехода в ранней Вселенной [25,26] или анизотропная космологическая модель Бьянки VII_h [27], в которой могут образовываться такие пятна в микроволновом фоне. Позднее было показано, что на данной карте на различных угловых масштабах присутствует остаточный вклад галактических фоновых компонент, который и дает обнаруживаемую негауссовость. Этот вклад может изменять свойства низких мультиполей $\ell \leq 20$ реликтового излучения, приводя к неустойчивому их отделению от мешающих компонент [10]. В частности, влиянием этих мультиполей могут быть объяснены особенности CS, такие, как отклонение статистики кластеров пиков колебаний сигнала на карте вокруг пятна [28] — увеличение числа положительных пиков. Независимое изучение свойств пятна, обнаруженного в обзоре NVSS [29] в окрестности CS, и подсчеты радиоисточников в нем показали, что исследуемое Холодное Пятно, гигантские размеры и существование которого трудно объяснить в рамках космологической ΛCDM–модели, может быть простым статистическим отклонением, вызванным систематическими эффектами [30]. Также не были обнаружены особенности и при подсчетах внегалактических источников в этой области в различных диапазонах длин волн, что может говорить в пользу некосмологических объяснений этой аномалии [31].

Холодное Пятно I, центральное пятно в карте, проявляется в квадруполе и октуполе и включает центр Галактики. Оно является одним из проявлений аномалий низких мультиполей. Особенности его обсуждаются в работе [18], и там же делается вывод, что существование пятна такой глубины и такого размера не противоречит ΛCDM–космологической модели, а появление пятна подобного размера возле Галактического центра имеет вероятность порядка 5%. Во избежание путаницы ниже по тексту будем называть Холодное Пятно I “холодной зоной”.

Рядом с холодной зоной на тех же галактических широтах находится горячая зона, в которой располагается кластер положительных пиков в пределах Галактических долгот $195° < l < 255°$ [31].

Обратим внимание, что все три особенности влияют на форму октуполя, показанную на рис. 2, и, кроме того, связаны с проблемой “четырех пальцев”, наблюдаемых в южном галактическом полушарии [18].

Кроме трех обозначенных зон, мы случайным образом выбрали поле, расположенное в более однородном по отношению к распределению дисперсии сигнала северном полушарии между галактической плоскостью и Северным галактическим полюсом, и назвали его случайным полем. Данная область будет использована для сравнительных исследований.

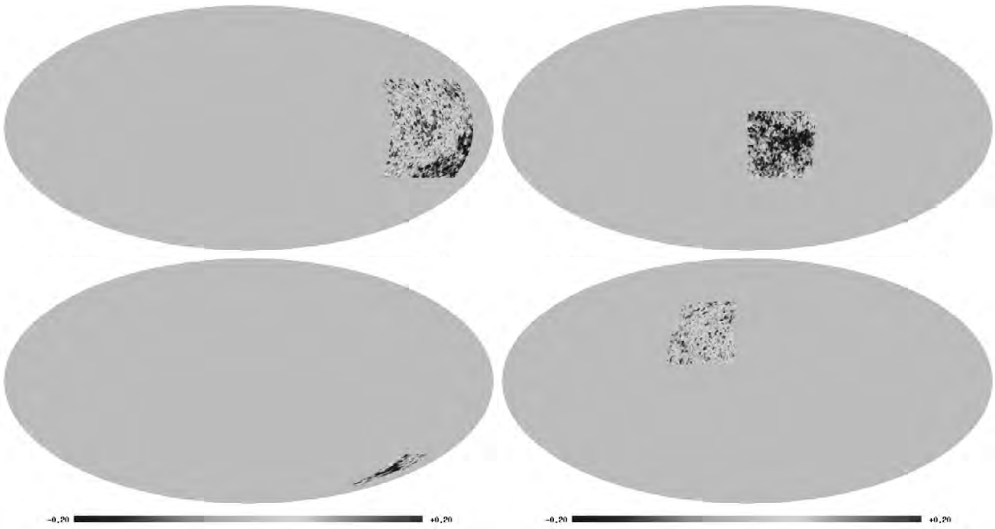


Рис. 1. Исследуемые зоны на карте ILC WMAP7 в Галактической системе координат. Сверху вниз слева направо показаны зоны с координатами углов: горячая зона ($b_1 = -30^\circ$, $l_1 = 195^\circ$,$b_2 = 30^\circ, l_2 = 255^\circ$), холодная зона ($b_1 = -30^\circ$, $l_1 = -15^\circ$, $b_2 = 10^\circ, l_2 = -50^\circ$), Холодное Пятно ($b_1 = -70^\circ$, $l_1 = 195^\circ$,$b_2 = -45^\circ$,$l_2 = 220^\circ$), случайное поле ($b_1 = 10^\circ$, $l_1 = 10^\circ, b_2 = 50^\circ, l_2 = 60^\circ$).

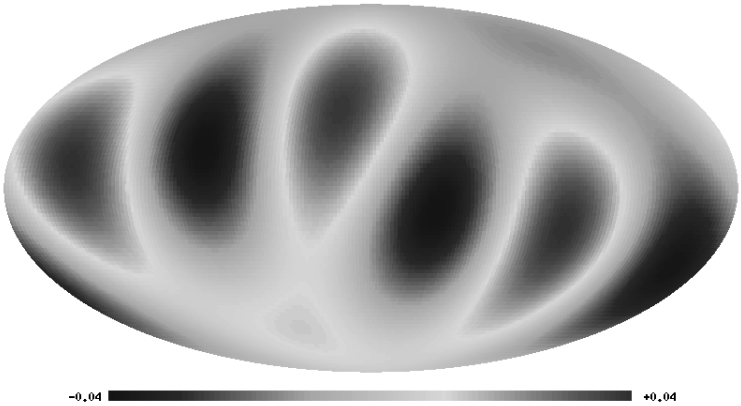


Рис. 2. Карта октуполя ILC WMAP7 в галактической системе координат.

3. АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ПИКОВ

Статистика пиков, а именно число пиков выше определенного порога, является одним из методов оценки гауссового сигнала. Используя соответствующие оценки, можно перейти к одному из функционалов Минковского — генусу, определяемому как разность между числом изолированных максимумов и числом изолированных минимумов. В данной работе мы совершать переход к генусу не будем, так как диаграммы простых подсчетов уже являются показательной характеристикой распределений сигнала в выбранных площадках.

Анализ данных мы проводим для различных комбинаций сферических гармоник с дальнейшим выделением исследуемых областей из карты. Сферические гармоники мы получаем стандартным гармоническим разложением карты флуктуаций на сфере:

$$\Delta T(\theta,\phi) = \sum_{\ell=1}^{\ell_{\max}} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi)\,, \qquad (1)$$

где $\Delta S(\theta,\phi)$ — флуктуации температуры на сфере в полярных координатах, ℓ — номер мультиполя, m — номер моды мультиполя, $\ell_{\max}$ — максимальный номер мультиполя, в идеале равный бесконечности. Карты с конечным разрешением $\ell_{\max}$ генерировались из коэффициентов при сферических гармониках $a_{\ell m}$ утилитой '`cl2map`' пакета GLESP [32]. Сферические гармоники определены как

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

где $P_\ell^m(x)$ — присоединенные полиномы Лежандра. Для непрерывной функции $\Delta T(x,\phi)$ коэффициенты разложения $a_{\ell m}$ выражаются как

$$a_{\ell m} = \int_{-1}^{1} dx \int_0^{2\pi} \Delta T(x,\phi) Y^*_{\ell m}(x,\phi) d\phi\,, \qquad (3)$$

где $Y^*_{\ell m}$ обозначает комплексное сопряжение $Y_{\ell m}$.

Параметры положительных и отрицательных пиков (в нашем случае достаточно одного — амплитуды) определялись гаусс-анализом на двумерных картах с помощью программы `SExctractor` [17]. Карты отрицательного сигнала при анализе инвертировались. В каждой из площадок предварительно вычитался тренд, задаваемый параметрами режима работы программы по умолчанию. Свойства обнаружителя типа гаусс-анализа (вероятность ложной тревоги и вероятность правильного обнаружения в зависимости от порога детектирования) обсуждались ранее в [33]. В нашем случае, когда имеется механизм моделирования эксперимента в рамках заданной космологической модели и сравнения свойств для каждого порога в рамках одной гипотезы распределения, статистические характеристики обнаружителя уже не столь важны. Отметим также, что программа `SExctractor` тестировалась и применялась также для выделения радиоисточников в миссии Planck [34]. В нашей работе подсчеты экстремумов $N(T)$ были сделаны для карт с параметром разрешения $\ell_{\max} = 150$ в уравнении (1). Размер бина δt гистограммы брался равным 0.3. И таким образом были заданы уровни $\Delta T_k = k\delta t$, для которых соответствующие подсчеты максимумов и минимумов T_p на площадке Ω, выделенной из карты $\Delta T(\theta,\phi)$, вычислялись как

$$N(T_{p_k}) = \sum_{\Omega} (T_p > \Delta T_k)\,. \qquad (4)$$

Результаты построения распределения числа пиков в исследуемых областях приведены на рис. 3. Серым цветом показаны подсчеты пиков для гауссового поля в ΛCDM–космологической модели, полученные аналогичной операцией на картах с тем же разрешением и в тех же координатах. Ширина полосы соответствует разбросу 1σ, оцененному по 100 реализациям случайного процесса.

Как видно из рис. 3, для всех трех исследуемых зон наблюдается существенное проявление негауссовости как в форме распределения, так и в положении пиков. В области горячей зоны (рис. 3, слева сверху) наблюдается значительное увеличение количества положительных пиков, образующих кластер на данной площадке и дающих хвост в распределении. При этом положение максимума в распределении на диаграмме сохраняется, что говорит о гауссовости распределения слабого сигнала. Для холодной зоны (рис. 3, справа сверху) и Холодного Пятна (рис. 3, слева снизу) распределения смещены в сторону отрицательного сигнала. В холодной зоне имеется хвост, вызванный увеличением числа отрицательных пиков, отсутствующий в области Холодного Пятна. Тестовая случайная зона демонстрирует полное совпадение с ΛCDM-моделью.

Для проверки, являются ли данные отклонения от нормального распределения свойствами сигнала в исследуемых областях, или они характерны для для шумовых свойств карты, мы сделали оценки статистики пиков для 100 случайных положений исследуемых площадок на карте ILC аналогично методике, предложенной в [35] и построили соответствующие гистограммы (рис. 4). Подобный подход позволяет использовать шум самой карты для анализа значимости отклонений от ожидаемой (гауссовой) статистики. Разброс величин в гистограмме пиков для случайных положений площадок больше, чем получаемый в результате моде-

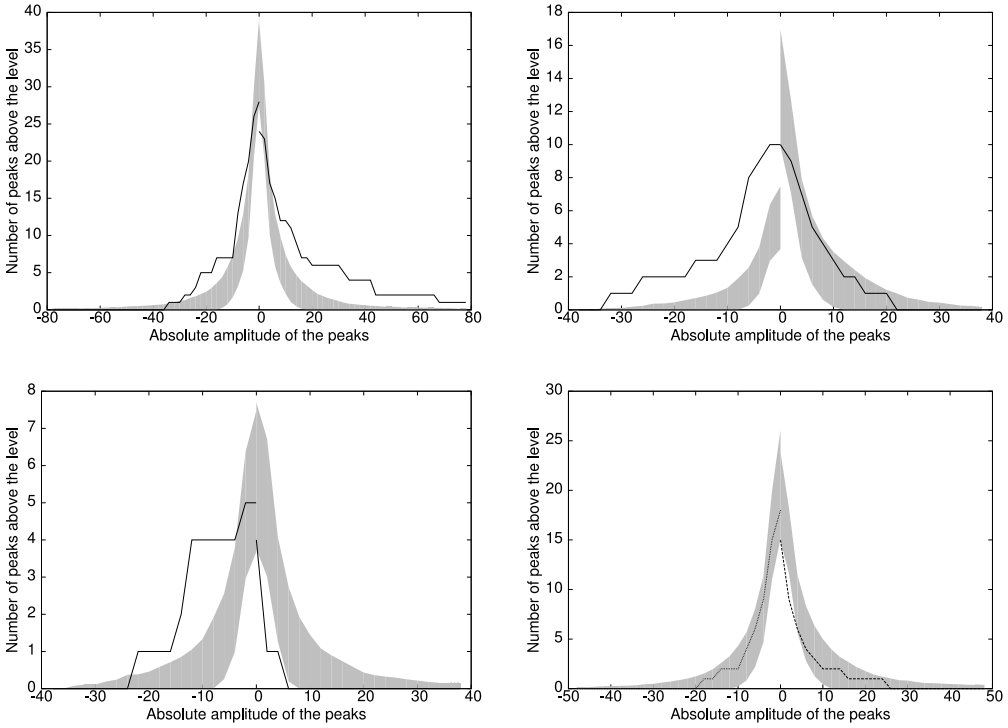


Рис. 3. Статистика пиков в исследуемых зонах на карте ILC WMAP7 в Галактической системе координат с разрешением $\ell_{\max} \leq 150$. Сверху вниз слева направо показаны распределения для горячей зоны, холодной зоны, Холодного Пятна и случайного поля. Черным цветом отмечены подсчеты для карты WMAP7 ILC. Серым цветом показан 1σ разброс допустимых значений, оцененный в 100 реализациях случайного гауссова поля в модели ΛCDM.

лирования шума для ΛCDM–космологии, на что также было обращено внимание в [35]. В результате увеличения этого разброса гистограмма пиков для холодной зоны находится практически внутри ожидаемого разброса 1σ. Для остальных областей отклонения остаются существенными.

В работе [28] было показано, что в области Холодного Пятна основной вклад в негауссовость в пространстве мультиполей дают низкие гармоники ($\ell \leq 20$), удаление которых возвращает статистику сигнала к гауссову распределению. Мы провели разделение по гармоникам и исследовали флуктуации карты в выделенном диапазоне мультиполей ($20 < \ell \leq 150$), задав соответствующие граничные значения в гармоническом разложении:

$$\Delta T(\theta,\phi) = \sum_{\ell=21}^{150} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi)\,, \qquad (5)$$

На рис. 5 приведены карты гармоник в двух диапазонах $\ell \leq 20$ и $20 < \ell \leq 150$. На рис. 6 показаны распределения пиков в трех исследуемых зонах на картах с $20 < \ell \leq 150$.

Анализ графика (рис. 6) показывает, что для карт с $\ell > 20$ распределение пиков соответствует нормальной статистике. Это говорит о том, что основные негауссовы свойства привносятся в карту низкими мультиполями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели анализ трех выделяющихся областей на карте микроволнового фона WMAP7 ILC: двух холодных областей, включая Холодное Пятно, и одной горячей зоны. Методом подсчета изолированных максимумов и минимумов в этих зонах показано, что статистика значимо отклоняется от ожидаемой в моделях ΛCDM с гауссовыми искажениями сигнала. После разделения по гармоникам для карты с $\ell > 20$ статистика пиков в исследуемых зонах становится гауссовой. Этот факт указывает на то, что негауссова компонента содержится в мультиполях с $\ell \leq 20$, что согласуется

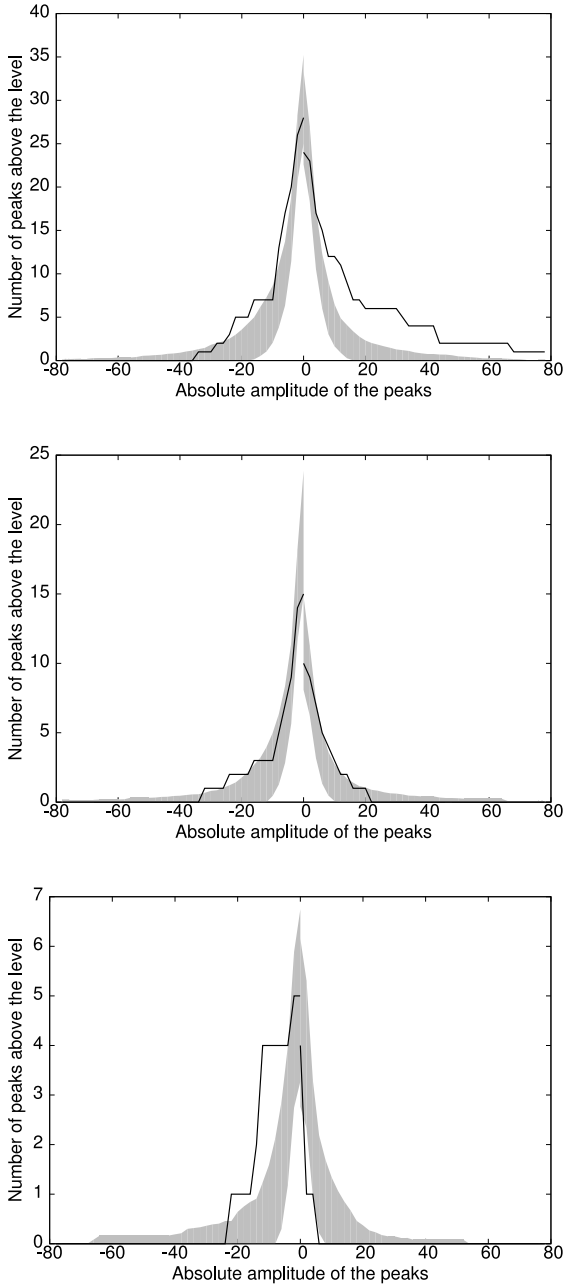


Рис. 4. Статистика пиков в исследуемых зонах на карте ILC WMAP7 в Галактической системе координат с разрешением $\ell_{\max} \leq 150$. Сверху вниз показаны распределения для горячей зоны, холодной зоны и Холодного Пятна. Черным цветом отмечены подсчеты для карты WMAP7 ILC. Серым цветом показан 1σ разброс допустимых значений, оцененный в 100 случайных положений тех же площадок на самой карте ILC.

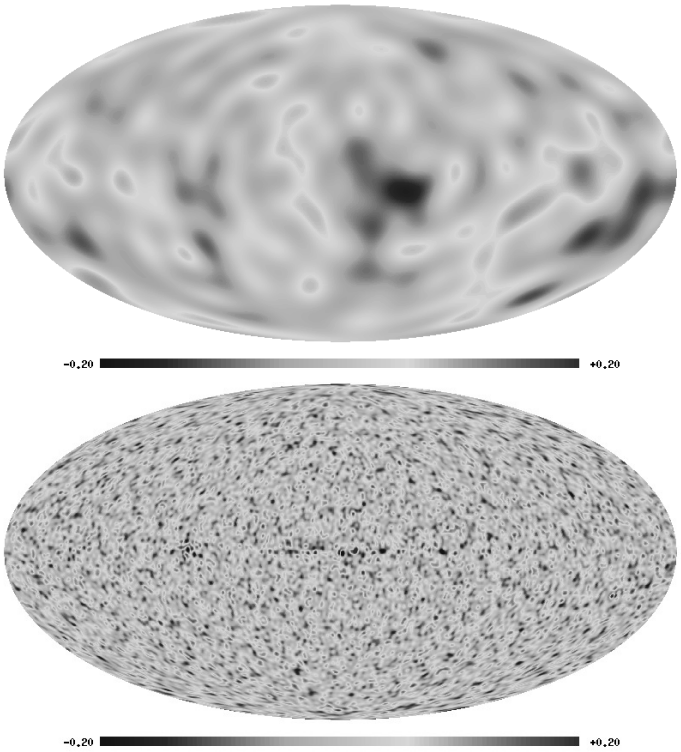


Рис. 5. Карты мультиполей двух в диапазонах $\ell \leq 20$ (вверху) и $20 < \ell \leq 150$ (внизу) для сигнала WMAP7 ILC.

с выводами [28], полученными кластерным анализом окружающего сигнала для Холодного Пятна. Граница $\ell \leq 20$ задается размерами радиоизлучающих областей в плоскости нашей Галактики, и естественным предположением является гипотеза об остаточном негауссовом вкладе Галактики в выделенном микроволновом фоне. В пользу этого может говорить положение холодной и горячей зон, пересекающих Галактический экватор. Однако вопрос остается открытым, так как эти же зоны плюс Холодное Пятно задают форму октуполя (рис. 2), который оказывается чувствительным к плоскости эклиптики. Отметим, что в отличие от квадруполя, положение октуполя (его фазовые характеристики) меняются слабо в зависимости от типа обработки (он сохраняется, в частности, и при разделении сигнала с учетом однородности выборки в пиксельном домене [36]). Если этот эффект имеет физическую природу, то можно говорить о дополнительном микроволновом излучении Солнечной системы (пыль или солнечный ветер), проявляющемся в положении исследуемых зон. Связано ли это с физическими свойствами или является результатом обработки данных WMAP, станет понятно с появлением открытых архивов (или раньше) и исследованиями миссии Planck.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем благодарность за возможность использования доступного архива NASA (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные WMAP. Мы также признательны за использование пакета HEALPix[3] [37], с помощью которого были преобразованы карты WMAP в коэффициенты $a_{\ell m}$. В работе использован пакет GLESP[4] второй версии [38, 39] для дальнейшего анализа данных СМВ на сфере. Работа частично поддержана грантом РФФИ No 09-07-00159. О.В.В. также благодарит за поддержку Фонд Дмитрия Зимина “Династия”.

[3] http://healpix.jpl.nasa.gov/
[4] http://www.glesp.nbi.dk

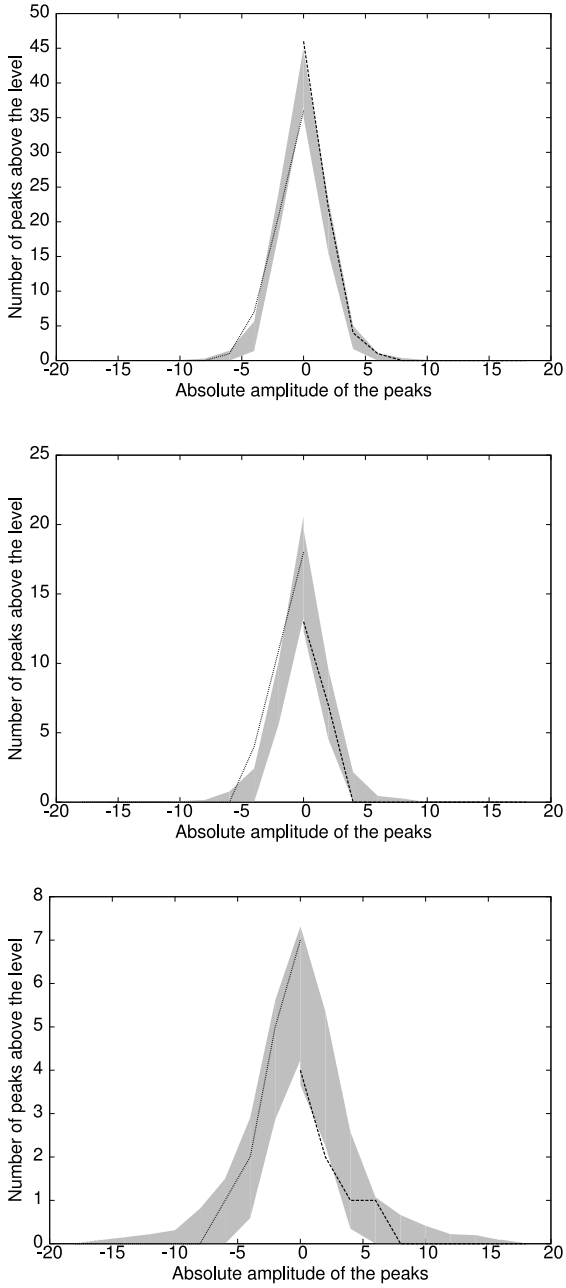


Рис. 6. Статистика пиков в исследуемых зонах на карте ILC WMAP7 в Галактической системе координат с разрешением $20 < \ell_{\max} \leq 150$. Сверху вниз показаны распределения для горячей зоны, холодной зоны и Холодного Пятна. Черным цветом отмечены подсчеты для карты WMAP7 ILC. Серым цветом показан 1σ разброс допустимых значений, оцененный в 100 реализациях случайного гауссова поля в модели ΛCDM.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
3. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009), arXiv:0803.0732.
4. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser., **192**, 14 (2010), arXiv:1001.4744.
5. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. J. Way, Astrophys. J. **590**, L65 (2003), astro-ph/0303643.
6. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **599**, L53 (2003), astro-ph/0310542.
7. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
8. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Int. J. Mod. Phys. D **17**, 179 (2008), astro-ph/0609409.
9. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **62**, 218 (2007).
10. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, Astrophysical Bulletin **63**, 216 (2008), arXiv:0707.1484.
11. P. Coles, P. Dineen, J. Earl, and D. Wright, Mon. Not. R. Astron. Soc. **350**, 989 (2004), astro-ph/0310252.
12. H. K. Eriksen, D. I. Novikov, P. B. Lilje, et al., Astrophys. J. **612**, 64 (2004).
13. J. D. McEwen, M. P. Hobson, A. N. Lasenby, and D. J. Mortlock, Mon. Not. R. Astron. Soc. **359**, 1583 (2005).
14. R. Tojeiro, P. G. Castro, A. F. Heavens, and S. Gupta, Mon. Not. R. Astron. Soc. **365**, 265 (2006).
15. F. K. Hansen, P. Cabella, D. Marinucci, and N. Vittorio, Astrophys. J. **607**, L67 (2004).
16. П. Д. Насельский, Д. И. Новиков, И. Д. Новиков, *Реликтовое излучение* (Наука, Москва, 2003).
17. E. Bertin and S. Arnouts, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **117**, 393 (1996).
18. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al. Astrophys. J., Suppl. Ser., **192**, 17 (2010), arXiv:1001.4758.
19. P. Vielva, E. Martinez-Gonzlez, R. B. Barreiro, et al., Astrophys. J. **609**, 22 (2004), astro-ph/0310273.
20. L. Cayon, J. Jin, and A. Treaster, Mon. Not. R. Astron. Soc. **362**, 826 (2005).
21. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, and L. Cayon, Mon. Not. R. Astron. Soc. **356**, 29 (2005).
22. M. Cruz, L. Cayon, E. Martinez-Gonzalez, et al., Astrophys. J. **655**, 11 (2007), astro-ph/0603859.
23. L. Rudnick, S. Brown, and L. R. Williams, Astrophys. J. **671**, 40 (2007), arXiv:0704.0908.
24. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, Astrophys. J. **147**, 73 (1967).
25. M. Cruz, N. Turok, P. Vielva, et al., Science **318**, 1612 (2007), arXiv:0710.5737.
26. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **390**, 913 (2008), arXiv:0804.2904.
27. T. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., Astrophys. J. 629, L1 (2005), astro-ph/0503213.
28. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., Astrophysical Bulletin **65**, 101 (2010).
29. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
30. K. M. Smith and D. Huterer, (2008), arXiv:0805.2751.
31. D. I. Soloviov and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **65**, 121 (2010).
32. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
33. O. V. Verkhodanov and V. L. Gorokhov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **39**, 155 (1996).
34. P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al., Astron. Astrophys., submitted (2011), arXiv:1101.2041.
35. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **66**, 183 (2011), arXiv:1108.4377.
36. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, Phys. Rev. D, **83**, 043002 (2011), arXiv:1008.4094.
37. K. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **622**, 759 (2005).
38. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
39. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, O. P. Naselsky, et al., Int. J. Mod. Phys. D **20**, 1053 (2011), arXiv:0904.2517.

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

О. В. Верходанов[1], Я. В. Найден[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

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

Ключевые слова: космология: реликтовое излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

Один из самых обсуждаемых результатов миссии WMAP[1] [1–7] — необычные (негауссовы) свойства низких пространственных гармоник (мультиполи $2 \leq \ell \leq 20$). На самые низкие мультиполи: квадруполь ($\ell = 2$) и октуполь ($\ell = 3$), выравненные вдоль плоскости (свойство планарности) и относительно друг друга, сразу после публикации первого релиза данных WMAP обратили внимание Тегмарк и др. [8]. Ось, вдоль которой располагаются экстремумы этих мультиполей в карте WMAP, была названа впоследствии Осью Зла [9]. Следует сказать, что эта ось не является единственной выделенной осью в данных миссии. Естественная выделенная ось в данных WMAP совпадает с плоскостью Галактики. В следующих релизах данных миссии WMAP [4–6] существование Оси Зла было также подтверждено. Были сделаны различные оценки значимости существования этой оси и высказано несколько гипотез о ее происхождении. В разных работах (например, [10, 11]) исследовался вклад фоновых компонент и их влияние на выравнивание мультиполей ($\ell = 2$ и $\ell = 3$), и отмечалась маловероятность влияния фона на ориентацию низких мультиполей. В работе [10], где для оценок эффекта применялись мультипольные вектора, также замечено, что положение осей квадруполя и октуполя соответствует геометрии и направлению движения Солнечной системы и перпендикулярно эклиптической плоскости и плоскости, задаваемой направлением на диполь. Случайность такого эффекта авторы оценивают как маловероятную на уровне достоверности более 98% и исключают влияние остатков вклада от фоновых компонент.

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

*Астрофизический бюллетель. 2012. 67(1). С. 1

[1]`http://lambda.gsfc.nasa.gov`

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

Другим методом, основанном на корреляциях в пиксельном пространстве, применяемом для анализа качества восстановленного сигнала, стало картографирование мозаичных корреляций фоновых излучений [18–20]. В результате анализа мозаичных карт был обнаружен байес в распределении пиксельных корреляционных коэффициентов в картах CMB (Cosmic Microwave Background) и пылевой компоненты, и было показано, что низкие мультиполи "знают" не только об эклиптической системе координат, но и об экваториальной [19, 20]. Выделенность эклиптической системы также было продемонстрирована при поиске неоднордности карты микроволнового фона по угловому спектру мощности [21, 22]. Природа выделенности "земных" систем координат остается невыясненной, хотя в ряде работ обсуждались, кроме случайной выделенности систем и обусловленностью топологией Вселенной, более "физичные" подходы. Отметим среди них возможную связь положения осей квадруполя и октуполя, соответствующих геометрии и направлению движения Солнечной системы и перпендикулярных эклиптической плоскости и плоскости, задаваемой направлением на диполь карты ILC [10]; возможное наличие пылевой компоненты в плоскости эклиптики, где несмотря на слабость вклада зодиакальной пыли [11], не исключено пока влияние силикатных конденсатов [23]; наличие микроволнового фона, определяемого солнечным ветром или влияние хвоста магнитосферы Земли [19]; результаты исследований в этом направлении, представленные в виде карт распределения сигнала на полной сфере, пока отсутствуют; кроме того, подобный фон должен быть переменным в связи с активностью Солнца [19]; возможен также и остаточный шум, связанный с неравномерной чувствительностью в пикселе WMAP в зависимости от удаленности от плоскости эклиптики. Одним из возможных эффектов, обсуждавшимся в [19] и проявляющимся в низких мультиполях, может быть открытое недавно инфракрасным телескопом NASA Spitzer[2] [24] гигантское пылевое кольцо размером более градуса, которое должно дать вклад в излучение в плоскости эклиптики в результате множественных прохождений через диаграмму направленности антенны WMAP. Уровень такого вклада в микроволновом диапазоне не оценивался.

В данной работе мы исследуем мозаичные карты корреляций каталога слабых источников (FSC) [25] обзора IRAS [26], субмиллиметровых объектов миссии Planck[3] [27] и карты ILC WMAP релиза семи лет наблюдений [6]. Обнаруженный в [19] байес в корреляциях пыли и микроволнового фона на низких пространственных частотах представляет интерес для исследований в далеком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах, где положение источников излучения может быть признаком наличия облаков холодного газа [28], пылевых формирований или других протяженных объектов галактической среды. Именно поэтому наличие корреляций в положении слабых источников IRAS и протяженных объектов 2MASS с распределенным излучением микроволнового фона WMAP может дать дополнительную информацию об обнаруженном эффекте. Появление каталога субмиллиметровых объектов миссии Planck позволяет расширить диапазон корреляционных исследований в субтерагерцовую область. Ниже мы кратко опишем применяемый подход в построении карты мозаичных корреляций, дадим описание используемым данным и исследуем свойства аномальных гармоник корреляционных карт данных ILC WMAP и источников субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов.

2. МОЗАИЧНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

2.1. Данные

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

Карта ILC WMAP. В качестве карты CMB мы использовали карту распределения анизотропии микроволнового фона, восстановленную из многочастотных наблюдений методом внутренней линейной комбинации фоновых компонент семилетнего релиза данных [6]. Для построения этой карты использовались данные миссии WMAP в пяти наблюдательных полосах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W).

[2] http://science.nasa.gov/headlines/y2009/07oct

[3] http://www.rssd.esa.int/Planck/

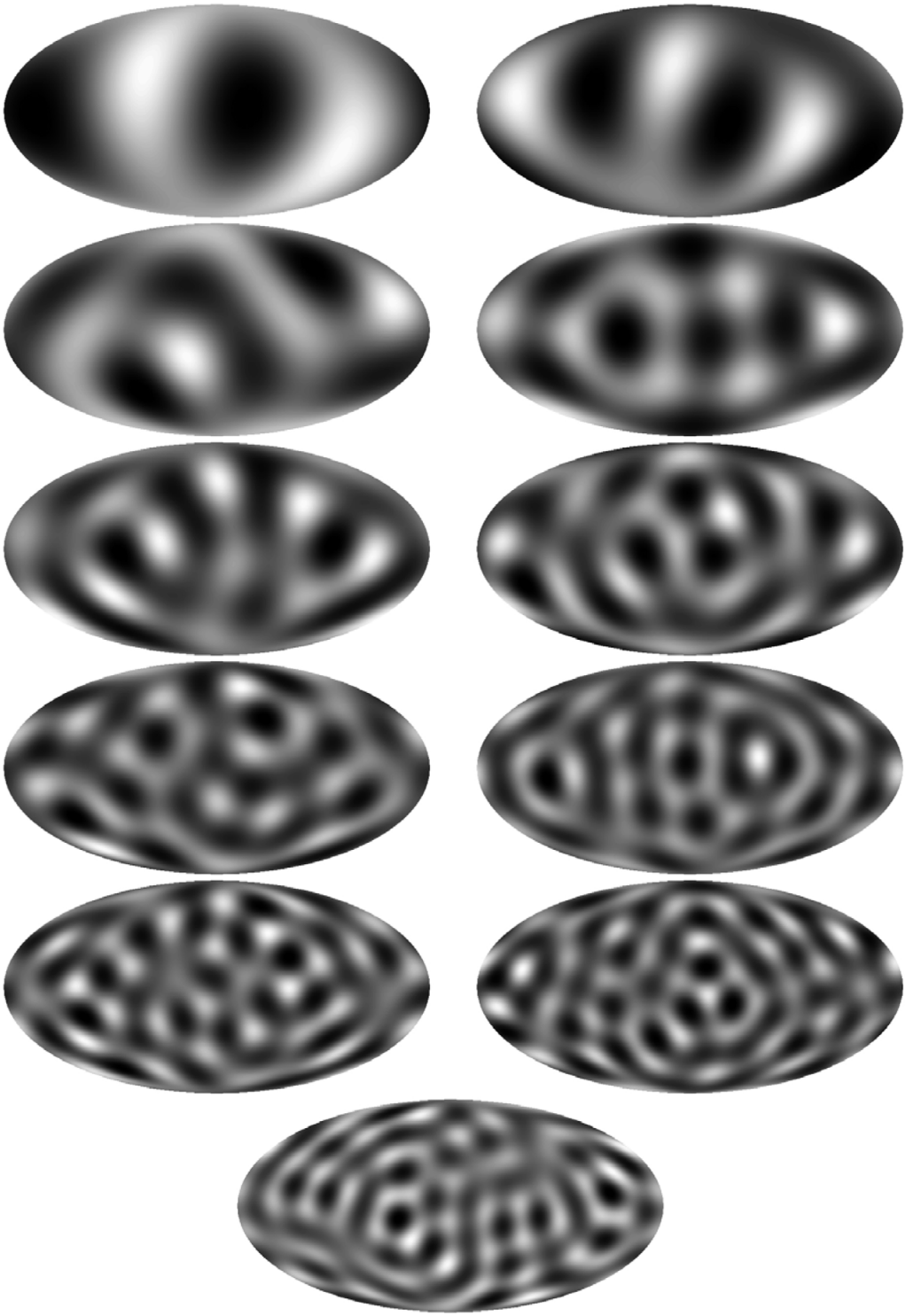


Рис. 1. Карты низких мультиполей данных ILC WMAP: рост ℓ справа налево сверху вниз, $2 \leq \ell \leq 12$.

Таблица 1. Вероятности случайного появления мощных гармоник в корреляциях исследуемых каталогов с картами случайного гауссова поля CMB в космологии ΛCDM.

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

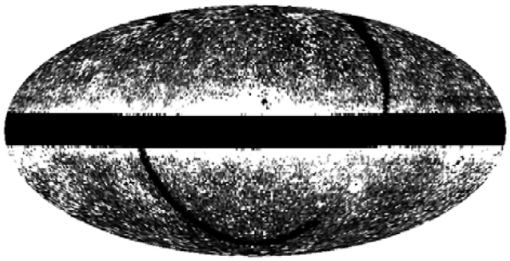


Рис. 2. Положение объектов каталога FSC на сфере в галактических координатах. Показаны источники на длине волны 100 мк. Полоса в плоскости Галактики $|b| < 10^\circ$ экранирована.

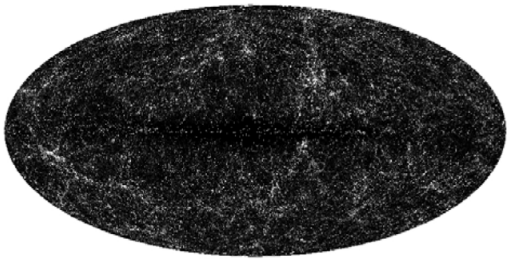


Рис. 3. Положение объектов каталога 2MASX на сфере в галактических координатах.

Карта ILC содержит информацию о распределении микроволнового фона для не очень высоких гармоник ($\ell \le 150$). Тем не менее, это наиболее проверенная и используемая карта CMB в настоящее время. В результате анализа данных получены карты не только анизотропии, но и поляризации CMB, фоновых компонент (синхротронного и свободно-свободного излучения, излучений пыли), а также рассчитаны их угловые спектры мощности C_ℓ. При анализе карты ILC для разложения по сферическим гармоникам мы использовали пакет GLESP[4] [29], где в соответствии с разложением вариаций температуры по мультиполям (сферическим гармоникам) имеем:

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

сферическая гармоника

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

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

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

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

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

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

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

[4] http://www.glesp.nbi.dk

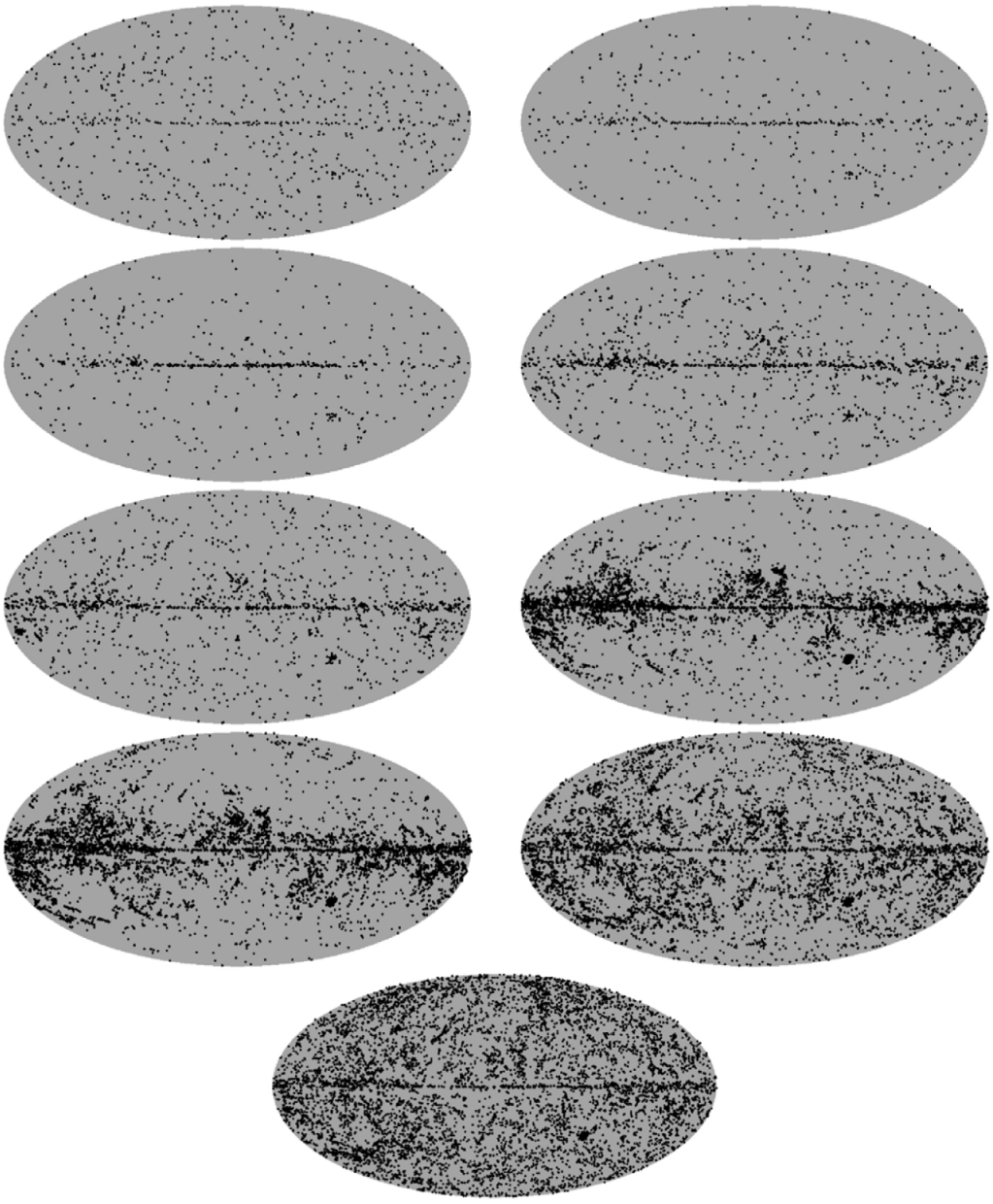


Рис. 4. Положение источников каталога Planck на сфере в галактических координатах. Справа налево сверху вниз источники на частотах 30 ГГц (705 объектов), 44 (452), 70 (599), 100 (1381), 143 (1764), 217 (5470), 353 (6984), 545 (7223) и 857 ГГц (8988 объектов).

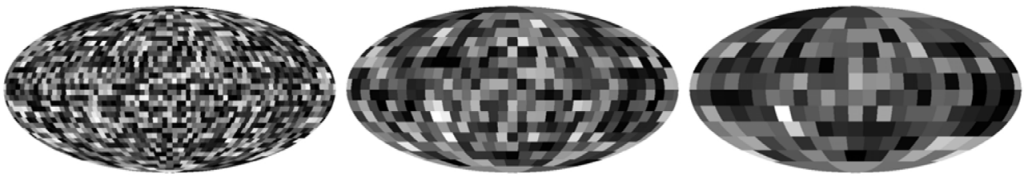


Рис. 5. Карты мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога 2MASX для различных окон (300′, 600′, 900′) на сфере в галактических координатах.

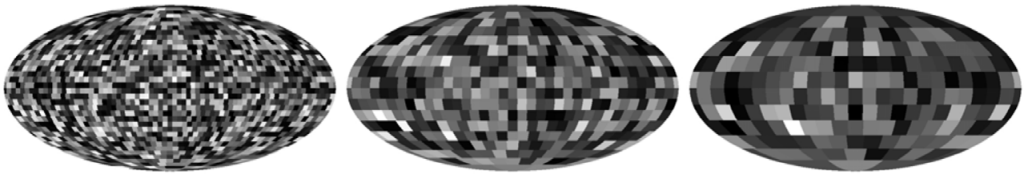


Рис. 6. Карты мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога FSC на 100 мк для различных окон (300′, 600′, 900′) на сфере в галактических координатах.

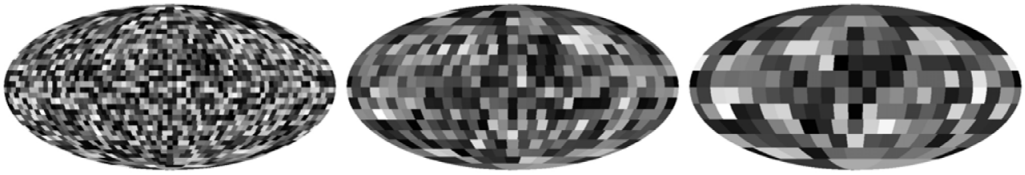


Рис. 7. Карты мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога Planck на 217 ГГц для различных окон (300′, 600′, 900′) на сфере в галактических координатах.

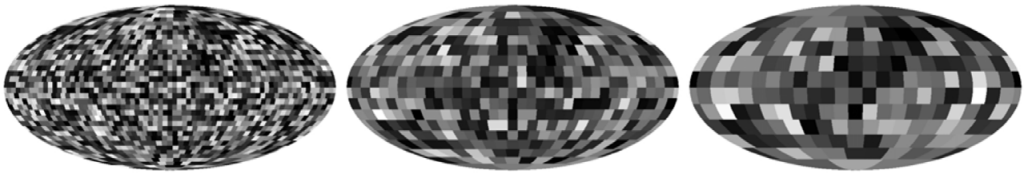


Рис. 8. Карты мозаичных корреляций ILC WMAP и каталога Planck на 857 ГГц для различных окон (300′, 600′, 900′) на сфере в галактических координатах.

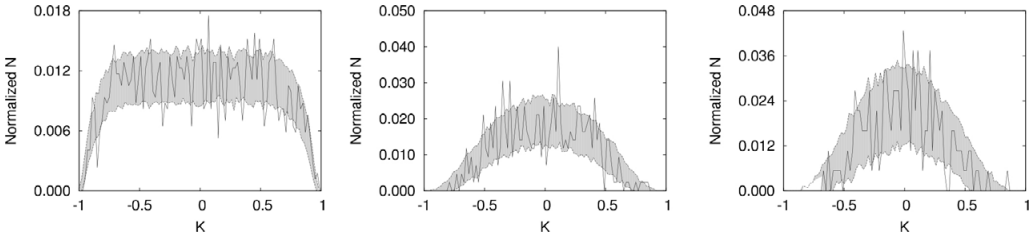


Рис. 9. Нормированные гистограммы распределения значения пикселов карты корреляций данных FSC (на 100 мк) и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — 300′, 600′, 900′). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$-разброса при корреляциях данных FSC с картой флуктуаций фона, ожидаемых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

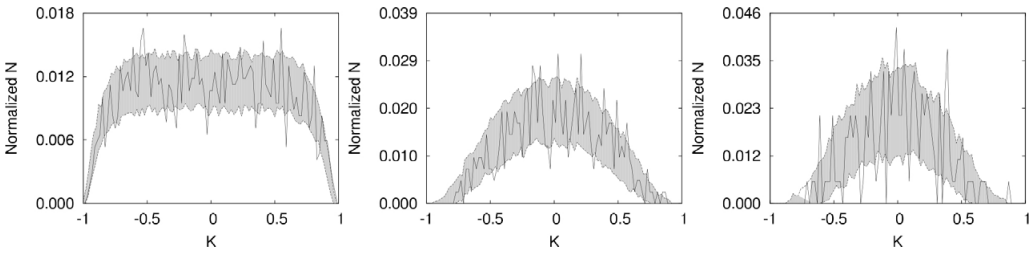


Рис. 10. Нормированные гистограммы распределения значения пикселов карты корреляций данных 2MASX (плотности потока в фильтре Ks) и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — 300′, 600′, 900′). Пунктирная линия отмечает границы $\pm1\sigma$-разброса при корреляциях данных 2MASX с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений в ΛCDM-космологической модели.

небе показано на рис. 4.

2.2. Процедура корреляции

Для построения карты корреляций мы использовали подход, предложенный в работах [18, 20] и процедурно реализованный во второй версии пакета GLESP [41] (утилита '`difmap`'), позволяющий обнаружить корреляции на исследуемых площадках определенного углового размера для двух карт. В этом методе каждому пикселу с номером p, стягивающему телесный угол Ξ_p, ставится в соответствие величина коэффициента кросс-корреляции данных обеих карт на подлежащей площадке. Таким образом, для двух сигналов T и S строится карта корреляций, у которой каждый пиксел p ($p = 1,2,...,N_0$, и N_0 — полное число пикселов на сфере) с углом Ξ_p, вычисляемый для карт на сфере с исходным разрешением, определяемым $\ell_{\max}$, есть

$$K(\Xi_p|\ell_{\max}) =$$

$$= \frac{\frac{1}{N}\sum\limits_{p_{ij}\in\Xi_p}(T(\theta_i,\phi_j)-\overline{T(\Xi_p)})(S(\theta_i,\phi_j)-\overline{S(\Xi_p)})}{\sigma_{T_p}\sigma_{S_p}}.$$

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

Перед процедурой корреляции мы сглаживали карты гауссианой с полушириной $\theta = 3$, 5 и 10° в гармоническом пространстве для приведения их к одному разрешению.

2.3. Карты корреляций и их спектры

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

На рис. 9, 10 и 11 показаны нормированные гистограммы пикселов мозаичных карт для каталогов FSC, 2MASX и Planck на различных угловых масштабах. Пунктирной линией отмечены границы $\pm1\sigma$–разброса значений гистограмм соответствующих корреляционных карт с гауссовым случайным полем в ΛCDM–космологической модели.

На рис. 12, 13 и 14 показаны угловые спектры мощности C_ℓ мозаичных карт для каталогов 2MASX, FSC и Planck на различных угловых масштабах. Пунктирной линией отмечены границы $\pm1\sigma$–разброса значений C_ℓ у соответствующих корреляционных карт с гауссовым случайным полем в ΛCDM–космологической модели.

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

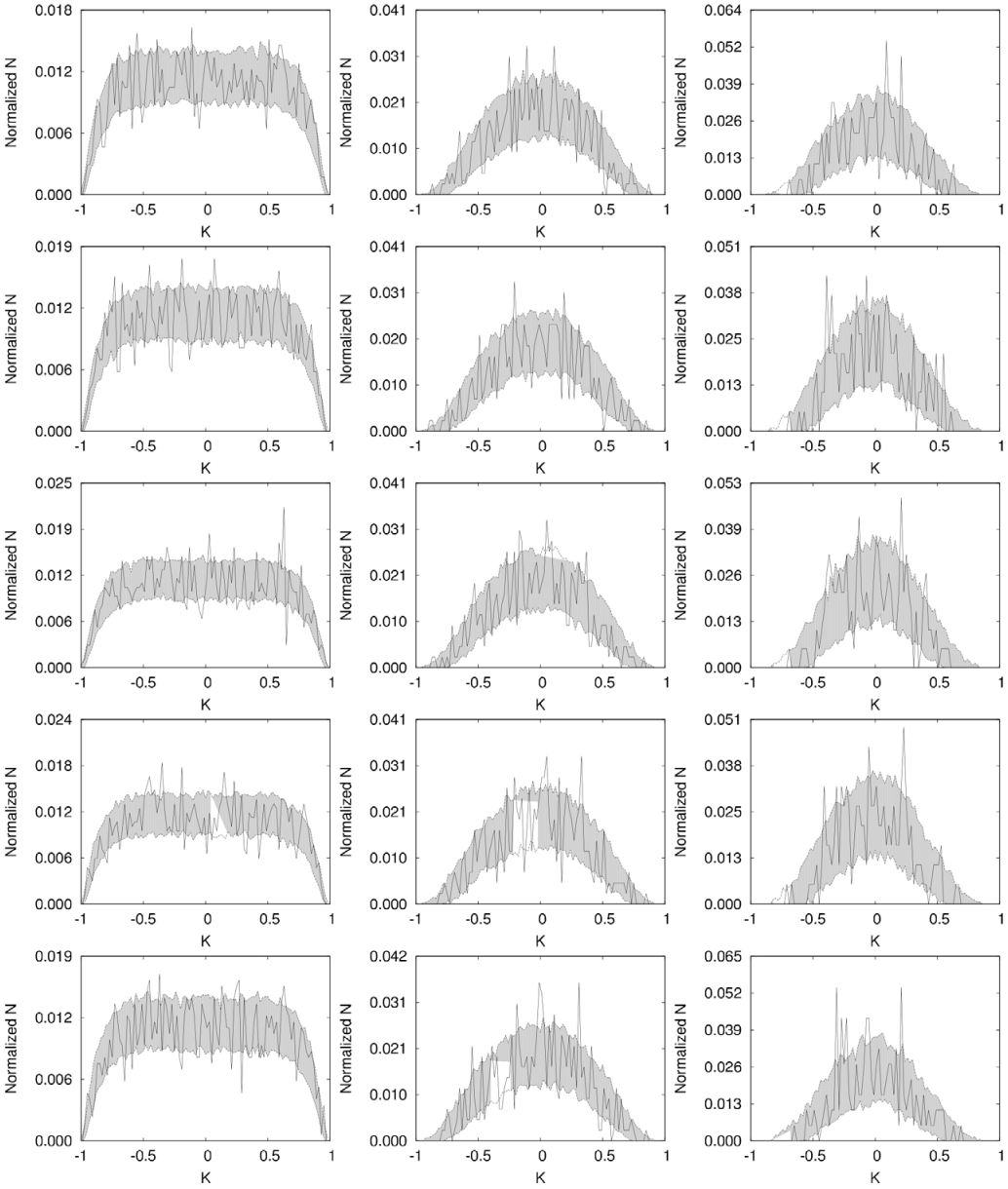


Рис. 11. Нормированные гистограммы распределения пикселов карты корреляций данных Planck и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — $300'$, $600'$, $900'$; сверху вниз — данные для частотных каналов на 30, 44, 70, 100, 143 ГГц). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$-разброса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

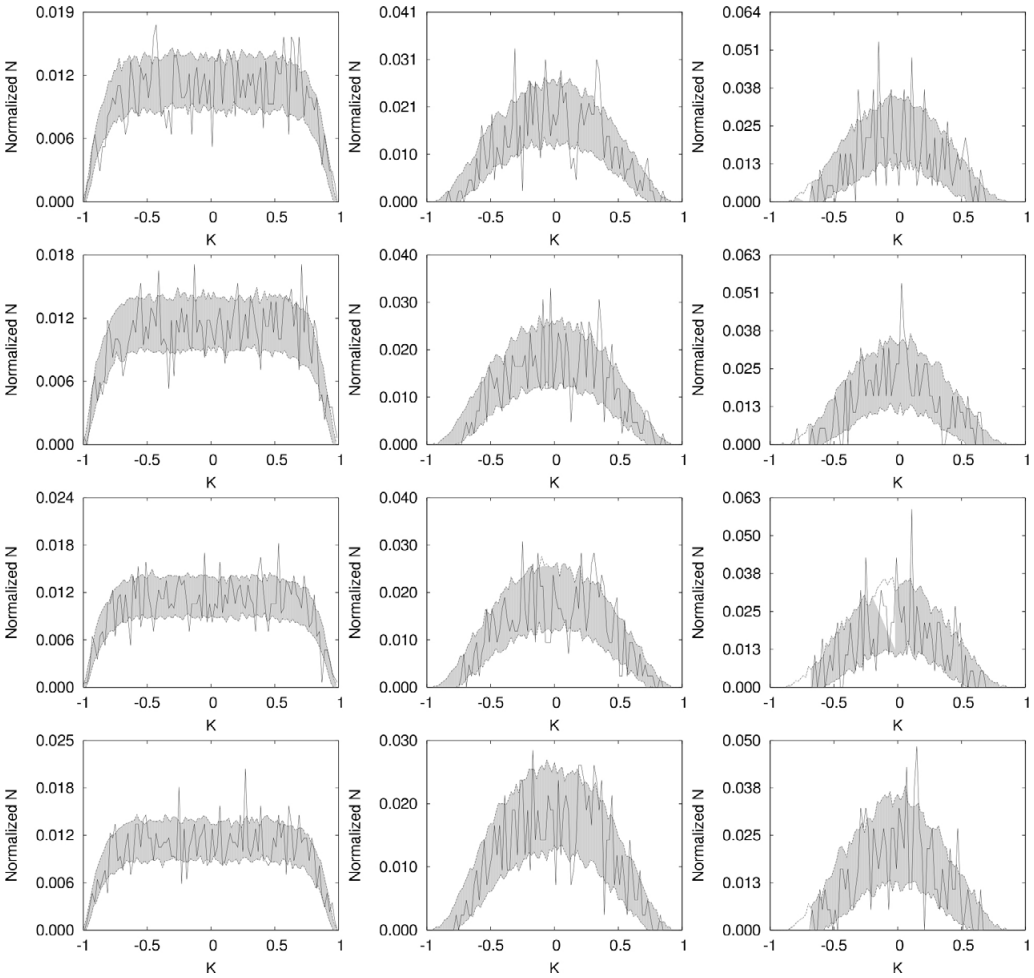


Рис. 11: продолжение. Данные для 217, 353, 545, 857 ГГц.

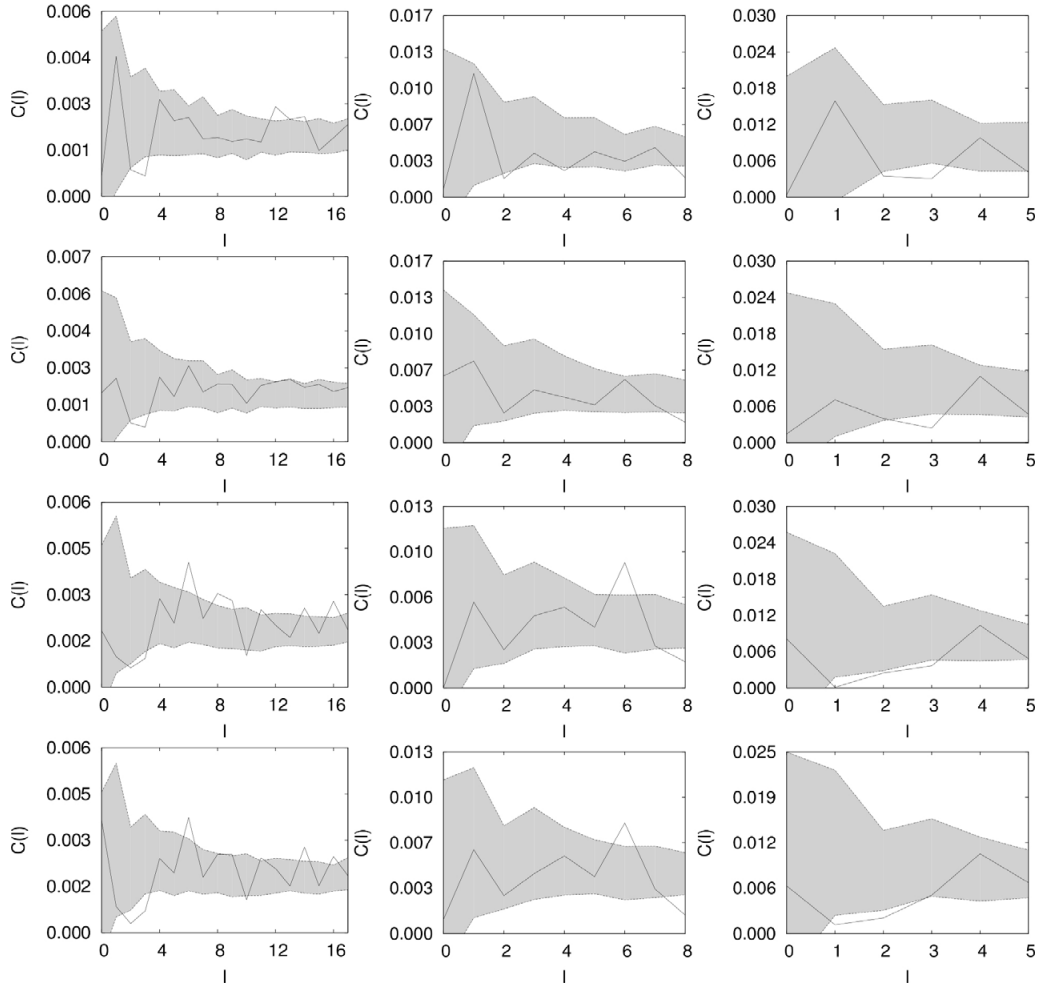


Рис. 12. Угловые спектры мощности карты корреляций данных FSC и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — $300'$, $600'$, $900'$; сверху вниз — для данных FSC на 100, 60, 25 и 12 мк соответственно). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$-разброса при корреляциях данных FSC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

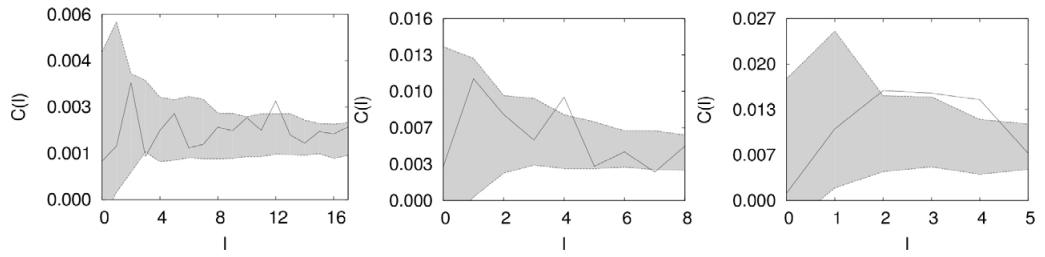


Рис. 13. Угловые спектры мощности карты корреляций данных 2MASX и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — $300'$, $600'$, $900'$). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$-разброса при корреляциях данных 2MASX с картой флуктуаций фона, ожидаемых для гауссова поля возмущений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

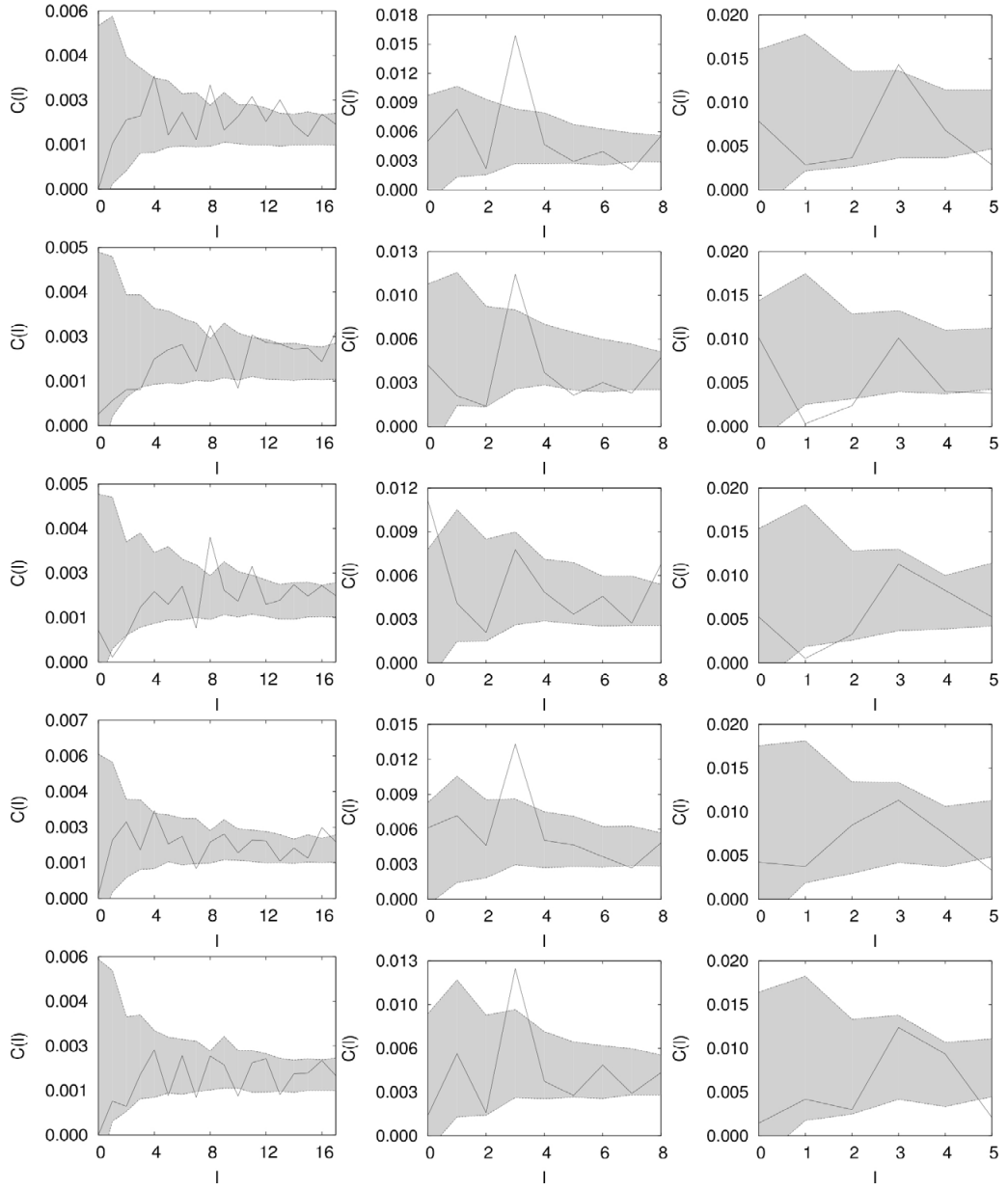


Рис. 14. Угловые спектры мощности карты корреляций данных Planck и ILC WMAP для различных корреляционных окон (слева направо — 300′, 600′, 900′; сверху вниз — данные для частотных каналов на 30, 44, 70, 100, 143 ГГц). Пунктирная линия отмечает границы $\pm 1\sigma$-разброса при корреляциях данных Planck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

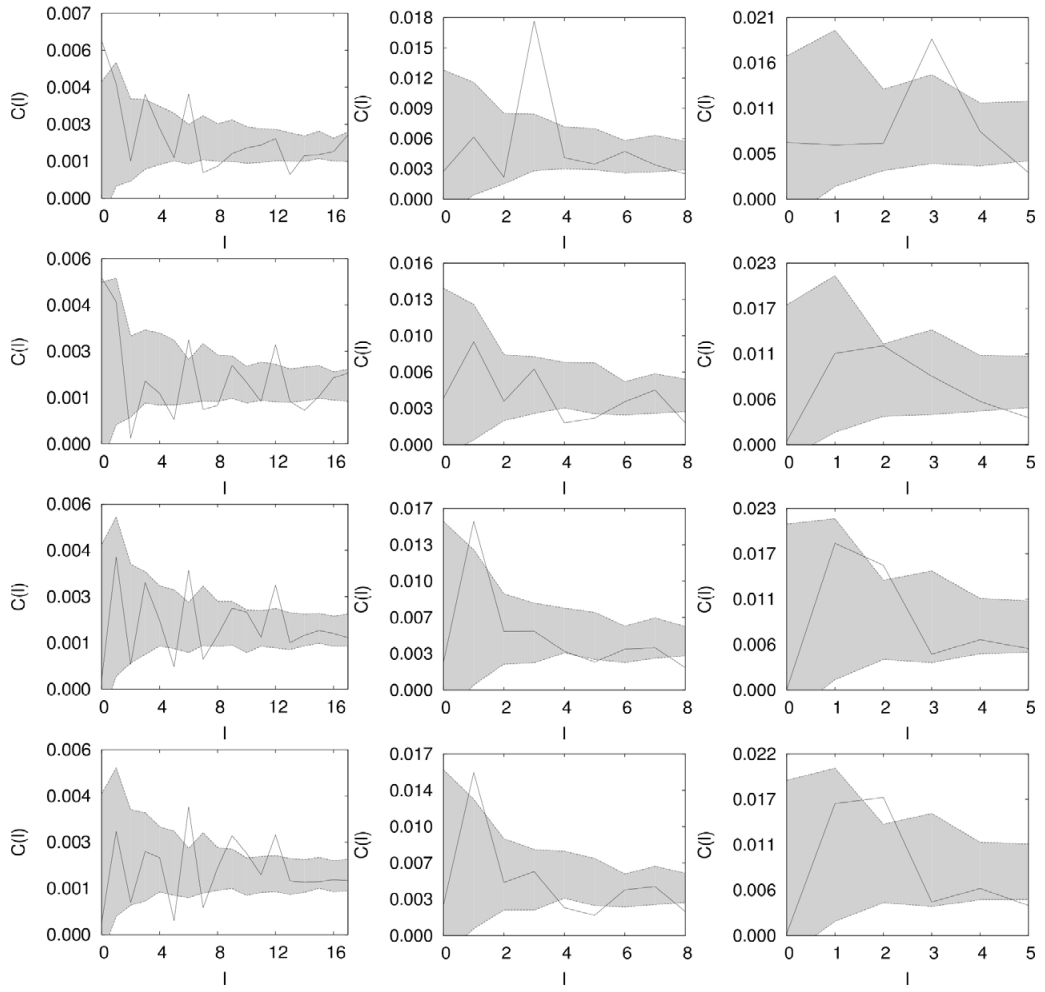


Рис. 14: продолжение. Данные для 217, 353, 545, 857 ГГц.

2.4. Мощные гармоники

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

Существенным моментом в распределении сигнала этой гармоники является наличие на карте двух выделенных седловидных точек, в которые попадают эклиптические полюса, а также избегание контрастными пятнами плоскости эклиптики, в результате чего эта плоскость лежит в области минимального по амплитуде сигнала. В то же время два самых холодных пятна мультиполя (на Севере и Юге, рис. 15) строго лежат на нулевом склонении в экваториальной системе координат.

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

Отметим 12-ую гармонику при корреляциях с размером пиксела $w = 300'$ и 7-ую гармонику для карты корреляций с $w = 600'$. На карте 12-ого мультиполя (рис. 16) максимальные по амплитуде пики располагаются на оси Галактической плоскости, а полюса экваториальной системы координат лежат в седловидных точках. На карте 7-го мультиполя, кроме седловидных точек в полюсах, экваториальная система выделяется также симметрией пятен. На корреляционных масштабах $900'$ существует еще один пик на $\ell = 4$ (рис. 13), о котором речь пойдет ниже при обсуждении свойств этих карт.

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

Корреляции с источниками каталога Planck позволяют исследовать их распределение на сфере на различных длинах волн. Можно сразу выделить две гармоники, проявляющиеся более чем в половине частотных каналах Planck и имеющие одинаковые распределения на сфере в этих каналах. Это мультиполь $\ell = 6$ карты с корреляционным окном $w = 300'$, выдающийся над уровнем 1σ в угловом спектре мощности на частотах 30, 100, 217, 343, 545 и 857 ГГц (рис. 14), а также чрезвычайно мощный мультиполь $\ell = 3$ (октуполь) карты, полученной с корреляционным окном $w = 600'$, видимый на частотах 30, 44, 100, 143, 217 ГГц. Карта восьмой гармоники (рис. 17) показывает практически строгую симметрию относительно плоскости Галактики. Свойства карт мультиполей $\ell = 6$ и $\ell = 3$ кажутся нам интересными, и мы их обсудим в следующем разделе. Двенадцатая гармоника имеет выделенную концентрацию пиков (уменьшение) в экваториальной плоскости, тем самым подчеркивая концентрацию коррелированного сигнала вне этой плоскости.

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

3. ОБСУЖДЕНИЕ

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

Гармоника $\ell = 6$ имеет схожие свойства (положение) и в данных ILC WMAP (рис. 1), и в данных корреляций с FSC IRAS (рис. 15), и в корреляциях с источниками Planck (рис. 17). Одна из особенностей этой гармоники — ее чувствительность к эклиптической системе координат, что отмечено в предыдущем разделе. Схожесть мультиполей $\ell = 6$ карты ILC и карты FSC *vs* ILC, а также подтверждение в картах источников Planck *vs* ILC приводит к мысли о существовании структуры излучения, связанной с плоскостью эклиптики на масштабах, соответствующих $\ell = 6$ ($\Xi \sim 13.5°$). Таким образом, возможно, что часть инфракрасных и субмиллиметровых источников из используемых каталогов отражает особенности структур таких размеров. Проявление экваториальной системы координат в корреляциях можно связать с подавлением сигнала в экваториальной плоскости, вызванном экранированием излучения облаками заряженных частиц, фокусируемых магнитным полем Земли. Такое подавление сигнала, в частности, демонстрируется 12-ой гармоникой в мозаич-

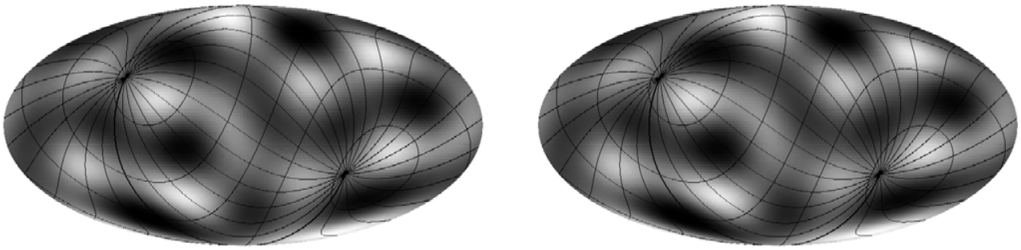


Рис. 15. Карта шестой гармоники корреляционного сигнала FSC (25 мк) и WMAP ILC с размером пиксела 600′. Слева — с наложением эклиптической сетки координат, справа — экваториальной.

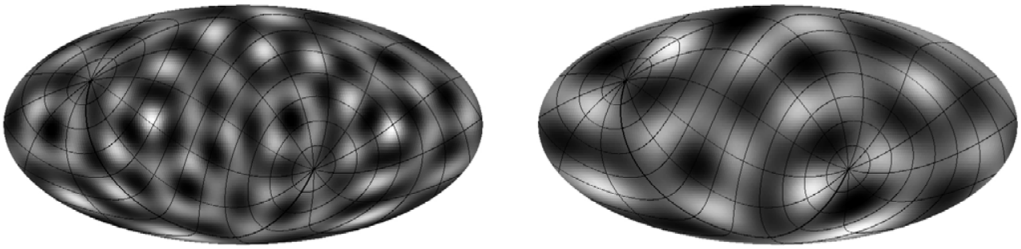


Рис. 16. Карты 12-ой (слева) и 7-ой (справа) гармоник корреляционного сигнала 2MASX и WMAP ILC с размерами пикселов 300′ и 600′, соответствующих пикам на рис. 13. На карты наложена экваториальная сетка координат.

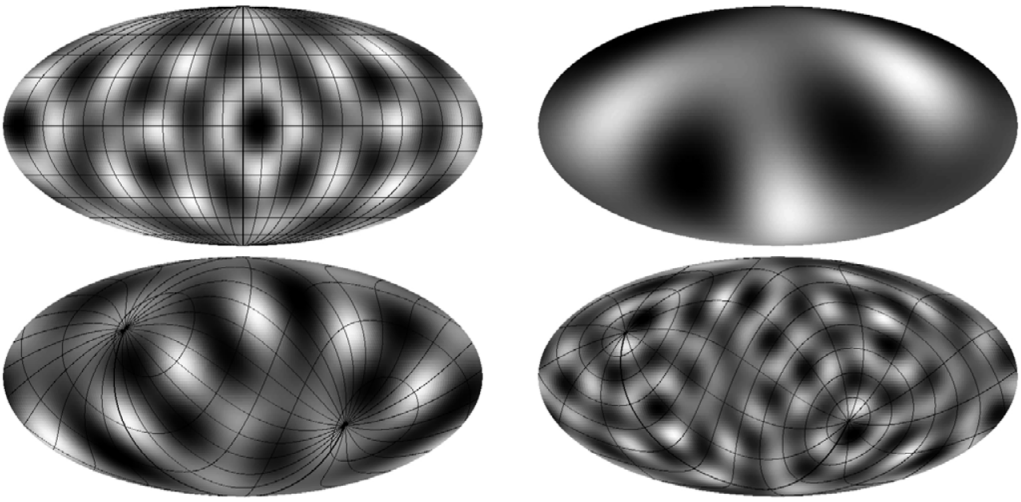


Рис. 17. Слева направо сверху вниз: карты 8-ой (на канале 70 ГГц, $w = 600'$), 3-ей (217 ГГц, $w = 600'$), 6-ой (857 ГГц, $w = 300'$) и 12-ой (857 ГГц, $w = 300'$) гармоник корреляционного сигнала Planck и WMAP ILC, соответствующих аномальным пикам на рис. 14.

ной карте Planck *vs* ILC (рис. 17).

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

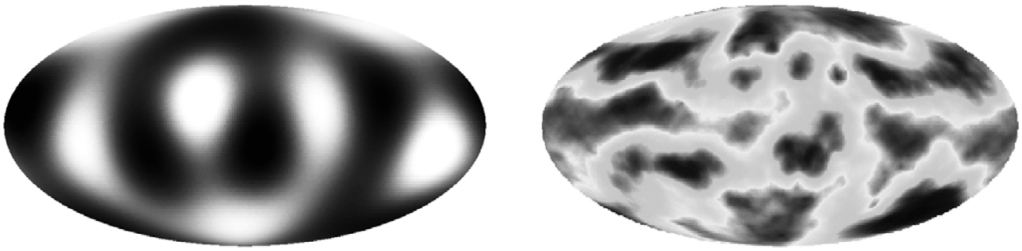


Рис. 18. Карта 4-ого мультиполя карты корреляций положения источников Planck и сигнала ILC WMAP (справа) и эффекта Сакса-Вольфа из работы [32] (слева).

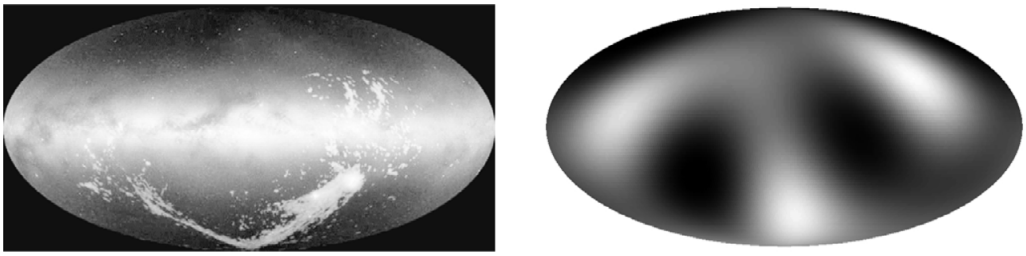


Рис. 19. Слева: карта Магелланова Потока (в Южном галактическом полушарии) по данным наблюдений на 21 см на радиотелескопах Грин Бэнк и Аресибо. Рисунок воспроизведен из работы [33]. Справа: карты 3-ей (217 ГГц, $w = 600'$), гармоники корреляционного сигнала Planck и WMAP ILC, соответствующей аномальному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

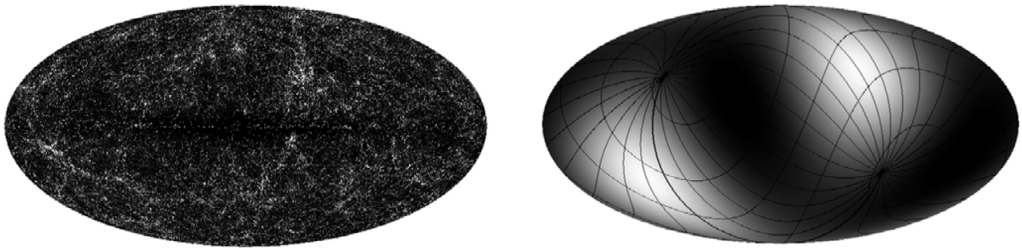


Рис. 20. Слева: карта источников на 857 ГГц с суммированием в пикселах по плотностям потока. Справа: квадруполь сглаженной карты. На карту наложена эклиптическая сетка координат.

2MASX и выделенностью плоскости Галактики в ILC WMAP), которые мы обнаружили в данном исследовании.

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

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

Таким образом, мы исследовали совместные свойства распределения CMB ILC WMAP и источников каталогов FSC IRAS, 2MASX и Planck методом мозаичных корреляционных карт. Мы обнаружили, что шестому мультиполю сигнала ILC WMAP соответствует 6-ой мультиполь в картах корреляций источников FSC *vs* ILC и Planck *vs* ILC. Это может быть обусловлено наличием структур размером $\sim 13.5°$, связанных с эклиптикой и про-

являющихся в распределении микроволнового фона ILC WMAP и положении источников каталогов FSC и Planck, но не данных 2MASX. Данные 2MASX *vs* ILC демонстрируют структуры, определяемые, скорее всего, Галактикой. В распределении источников Planck и данных ILC WMAP проявляются также корреляционные свойства, соответствующие Магеллановому Потоку, что могло бы отражать положение облаков водорода в субмиллиметровом диапазоне, хотя подобный сигнал не наблюдается [18,34] на 21 см при построении карты мозаичной корреляции между ILC WMAP и обзором NVSS [35].

БЛАГОДАРОСТИ

Авторы благодарны NASA за предоставленный архив с данными WMAP. В данной работе авторы использовали базу данных CATS[5] [36, 37], систему обработки радиоастрономических данных FADPS[6] [38,39] и пакет GLESP [40,41] для анализа данных на сфере. Работа была поддержана грантом РФФИ (No 09-02-00298). О.В.В. также благодарит за поддержку Фонд Дмитрия Зимина "Династия". Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
2. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0302208.
3. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 175 (2003), astro-ph/0302209.
4. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
5. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009), astro-ph/0803.0732.
6. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 14 (2011), arXiv:1001.4744.
7. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 17 (2011), arXiv:1001.4758.
8. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, Phys. Rev. D **68**, 123523 (2003), astro-ph/03022496.
9. K. Land and J. Magueijo, Phys. Rev. Lett. **95**, 071301 (2005).
10. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, Mon. Not. R. Astron. Soc. **367**, 79 (2006).
11. A. Gruppuso and C. Alessandro, JCAP **08**, 004 (2009).
12. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, Mon. Not. R. Astron. Soc. **399**, 295 (2009).
13. C.-G. Park, C. Park, and J. R. Gott III, Astrophys. J. **660**, 959 (2007), astro-ph/0608129.
14. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **62**, 203 (2007).
15. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, Astrophysical Bulletin **63**, 216 (2008), arXiv:0707.1484.
16. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, Phys. Rev. D **83**, 3002 (2011), arxiv:1008.4094.
17. O. V. Verkhodanov and A. A. Basova, Astrophysical Bulletin **66**, 407 (2011).
18. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, Astrophysical Bulletin **64**, 263 (2009).
19. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **65**, 390 (2010).
20. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S. V. Karpov, Astrophysical Bulletin **65**, 238 (2010), arXiv:1009.3720.
21. M. Hansen, A. M. Frejsel, J. Kim, et al. arXiv:1103.6135 (2011).
22. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **66**, 345 (2011).
23. V. Dikarev, O. Preuss, S. Solanki, et al., Astrophys. J. **705**, 670 (2009).
24. W. Clavin, `http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2009-19/release.shtml` (2009).
25. C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., *Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases*, IRAS Faint source catalog (1988).
26. C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., *Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases*, V.1: Explanatory supplement (1988).
27. Planck Collaboration: P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al., Astron. Astrophys. **536A**, 7 (2011), arXiv:1101.2041.

[5] `http://cats.sao.ru`
[6] `http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html`

28. Planck Collaboration: P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al., Astron. Astrophys. **536A**, 19 (2011), arXiv:1101.2029.
29. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
30. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. Van Dyk, et al., *Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release* (2002), `http://www.ipac.caltech.edu/2mass`.
31. 2MASS team, *2MASS Second Incremental Data Release Catalogs and Tables* (2002).
32. F.-X. Dupe, A. Rassat, J.-L. Starck, and M. J.Fadili, (2010), arXiv:1010.2192.
33. D. L. Nidever, S. R. Majewski, B. W. Butler, and L. Nigra, Astrophys. J. **723**, 1618 (2010), arXiv:1009.0001.
34. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, E. K. Majorova, and Yu. N. Parijskij, Astrophysical Bulletin **63**, 366 (2008), arXiv:0902.0281.
35. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
36. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005), arXiv:0705.2959.
37. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Data Sci. J. **8**, 34 (2009), arXiv:0901.3118.
38. O. V. Verkhodanov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne, ASP Conf. Ser., **125**, 46 (1997).
39. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
40. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
41. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Int. J. Mod. Phys. D, **20**, 1053 (2011), arXiv:0904.2517.

О ДВУХ НИЗКИХ ГАРМОНИКАХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ КАРТ МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА*

О. В. Верходанов[1], Т. В. Кешелава[2], Я. В. Найден[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Московский государственный университет, Москва, 119991 Россия

Мы проанализировали две мощные корреляционные гармоники ($\ell = 3$ и $\ell = 6$), обнаруженные при корреляции сигнала ILC WMAP с данными субмиллиметрового и инфракрасных диапазонов каталогов FSC IRAS и Planck. Рассчитаны фазы мод этих мультиполей. В пятнах гармоник проведены подсчеты источников из обзоров NVSS, FIRST, FSC IRAS и Planck. Фазы корреляционных гармоник близки на разных наблюдательных частотах как для $\ell = 3$, так и для $\ell = 6$. Мы не исключаем, что часть слабого сигнала в данных ILC WMAP, проявляющегося в сильных корреляционных свойствах исследуемых мультиполей, может быть обусловлена внегалактическими источниками излучения.

Ключевые слова: космология: реликтовое излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей статье [1] (Работа I) мы исследовали карты мозаичных корреляций данных микроволнового фона (Cosmic Microwave Background — CMB) WMAP[1] [2–5] и положений инфракрасных и субмиллиметровых источников. Самой известной и широко используемой картой микроволнового фона является карта WMAP (рис. 1) (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), показывающая распределение анизотропии реликтового излучения и построенная по многочастотным наблюдениям методом внутренней линейной комбинации ILC (ILC — Internal Linear Combination) фоновых компонент [2–5] по измерениям сигнала в пяти частотных полосах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W).

Для получения положения инфракрасных и субмиллиметровых источников в Работе I также использовались каталоги слабых источников (FSC) [6] обзора IRAS [7], каталог протяженных источников 2MASX [8] обзора всего неба 2MASS (2 Micron All-Sky Survey) [9] и каталог субмиллиметровых объектов миссии Planck[2] [10]. Для анализа данных каталогов применялись процедуры селекции базы данных CATS [11, 12] и пикселизации в пакете GLESP [13].

С помощью распределения величины сигнала в пикселах и угловых спектров мощности были исследованы статистические свойства карт корреляций ILC CMB с каталогами субмиллиметровых и ИК-обзоров. Обнаружено одинаковое поведение ряда гармоник в картах корреляций с объектами каталогов FSC IRAS, 2MASX и Planck. Среди них выделяются две гармоники: мультиполь $\ell = 6$ (рис. 2) и октуполь $\ell = 3$ (рис. 3), которые могут отражать реальное распределение источников излучения, "просочившихся" в карту микроволнового фона. Гармоника $\ell = 6$ возникает на карте корреляции сигнала CMB WMAP и положения объектов каталога FSC. Гармоника $\ell = 3$ (рис. 3) — для корреляций карты WMAP и положений источников обзора Planck.

В Работе I было продемонстрировано, что положение пятен для ряда мультиполей выделяется

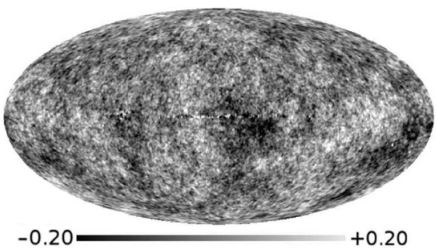


Рис. 1. Карта ILC CMB по данным наблюдений седьмого года миссии WMAP в галактической системе координат.

*Астрофизический бюллетень. 2012. 67(3). С. 257
[1]http://lambda.gsfc.nasa.gov
[2]http://www.rssd.esa.int/Planck/

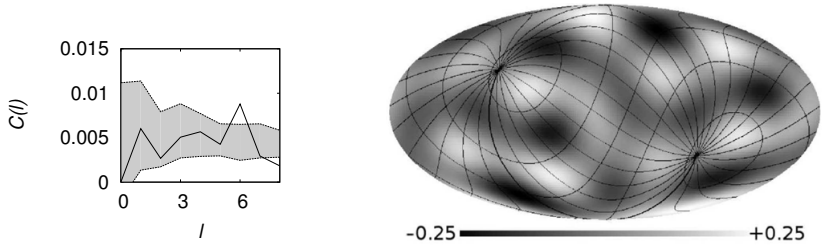


Рис. 2. Слева: угловой спектр мощности карты корреляций между сигналом WMAP ILC и положениями объектов FSC на длине волны 25 μm. Серым цветом отмечен 1σ-разброс величины $C(\ell)$, рассчитанный по 200 случайным гауссовым моделям CMB в ΛCDM-космологии. Справа: карта шестой гармоники корреляционного сигнала между положением источников FSC (μm) и распределением излучения WMAP ILC со стороной квадратного пиксела $600'$. На карту наложена эклиптическая сетка координат.

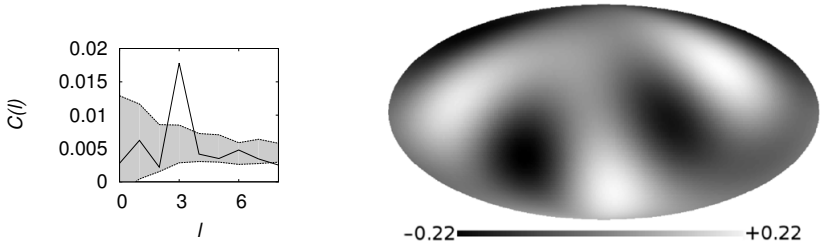


Рис. 3. Слева: угловой спектр мощности карты корреляций между сигналом WMAP ILC и положением на небесной сфере объектов Planck на частоте 217 ГГц. Серым цветом отмечен 1σ-разброс величины $C(\ell)$, рассчитанный по 200 случайным гауссовым моделям CMB в ΛCDM-космологии. Справа: карта третьей гармоники корреляционного сигнала между положением источников миссии Planck (217 ГГц) и WMAP ILC со стороной квадратного пиксела $600'$.

симметрией и амплитудой в эклиптической и экваториальной системах координат, что представляет интерес для более детального изучения. Следует сказать, что кроме названных гармоник, $\ell = 3$ и $\ell = 6$, были также отмечены гармоники $\ell = 8$ и $\ell = 12$ на некоторых корреляционных картах.

В данной работе мы исследуем проекционные свойства положения на сфере радиоисточников, попадающих в область пятен соответствующих гармоник ($\ell = 3$ и $\ell = 6$), имеющих наибольшую амплитуду.

2. АНАЛИЗ ГАРМОНИК

Для анализа пятен гармоник на корреляционных картах мы используем 5 каталогов: NVSS [14], FIRST [15], слабых источников (FSC) [6] обзора IRAS [7], каталог протяженных источников и субмиллиметровых объектов миссии Planck [10].

Обзор NVSS [14] был проведен с большой антенной решеткой (VLA) на частоте 1.4 ГГц в период с 1993 по 1996 г.г. и покрыл все небо выше склонения $\delta = -40°$ (33 884$\square°$ или 82% небесной сферы). Каталог содержит 1.8×10^6 источников, и, согласно описанию, является полным на 99% до интегральных плотностей потоков $S_{1.4\ \text{ГГц}} = 3.5$ мЯн, и полным на 50% до плотностей потоков 2.5 мЯн. Обзор проводился в D-конфигурации радиотелескопа VLA, и размер по половинной мощности синтезированной диаграммы направленности (разрешение) составил около $45''$.

Обзор FIRST [15] также проводился на телескопе VLA на частоте 1.4 ГГц, но в B-конфигурации. Он покрывает северную и частично южную галактические полярные шапки и имеет разрешение порядка $5''$. Согласно авторам, полнота обзора на уровне 2.5 мЯн составляет 95%, а на уровне 1 мЯн — 80%. Каталог содержит 771 076 источников и покрывает 8565$\square°$ (7954$\square°$ на северном полюсе и 661$\square°$ — на южном), что составляет 21% небесной сферы.

Инфракрасный астрономический спутник IRAS (Infrared Astronomical Satellite) провел в 1983 г. обзор небесной сферы на четырех длинах волн: 12, 25, 60 и 100 μm (соответственно 25, 12, 5 и 3 ТГц). В результате был получен каталог точечных источников (PSC), содержащий около 246 000 объ-

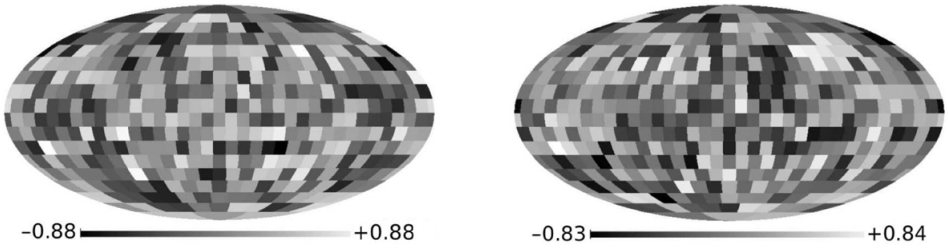


Рис. 4. Карты корреляций сигнала ILC с картой положений источников FSC IRAS на длине волны 25 μm (слева) и объектов Planck на частоте 217 ГГц (справа). Размер стороны пиксела на карте корреляционного сигнала — 10°.

ектов [7]. Обзор слабых источников IRAS (с галактическими широтами $|b| > 10°$) имеет лучшую чувствительность (примерно на 1 зв. величину) по сравнению с PSC. Каталог источников этого обзора (FSC — Faint Source Catalog), содержащий около 236 000 объектов, для слабейших источников имеет достоверность порядка 99% на 12 и 25 μm и 80% на 60 и 100 μm. Отметим, что около 20% "ложных" объектов, согласно [6], являются результатом излучения инфракрасных циррусов.

Используемая версия каталога источников, обнаруженных миссией Planck [10], получена в результате картографирования полной сферы плюс 60% всего неба за второй год миссии. Полный каталог содержит источники, зарегистрированные в девяти частотных каналах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 857 ГГц. Соответствующие пределы обнаружения на уровне 10σ составили 0.49, 1.0, 0.67, 0.5, 0.33, 0.28, 0.25, 0.47 и 0.82 Ян для широт $|b| > 30°$. 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.

Для анализа распределения источников мы проводим их подсчеты в областях диаметром 30° с центрами в горячих и холодных пятнах гармоник корреляционных карт.

При вычислении карты мозаичных корреляций [16, 17] (назовем ее $\mathbf{M}_c$) между сигналом ILC $\Delta T(\theta,\phi)$ и картами положений источников каталогов FSC и Planck $\Delta S(\theta,\phi)$ на сфере каждому пикселу (назовем его M-пикселом) с номером p ($p = 1,2,...,N_0$, где N_0 — полное число пикселов на сфере) присваивается значение корреляционного коэффициента. Этот коэффициент вычисляется корреляцией данных в области неба, стягиваемой M-пикселом карты $\mathbf{M}_c$, из соответствующих площадок карт ΔT и ΔS. Т.е. коэффициент рассчитывается внутри телесного угла Ξ_p, стягиваемого данным M-пикселом. В результате такой процедуры, проведенной на всем небе, строится мозаичная карта $\mathbf{M}_c$ с более низким разрешением, где каждый M-пиксел отражает уровень корреляции исследуемых карт в заданном угловом размере. Т.е. для двух карт с исходным разрешением, задаваемым $\ell_{\max}$, имеем

$$K(\Xi_p|\ell_{\max}) = \Bigg(\sum_{p_{ij}\in\Xi_p}\sum \Big(\Delta T(\theta_i,\phi_j) - \overline{\Delta T(\Xi_p)}\Big)\Big(S(\theta_i,\phi_j) - \overline{S(\Xi_p)}\Big)\Bigg) \Big/ \sigma_{\Delta T_p}\sigma_{S_p}\,, \tag{1}$$

где $\Delta T(\theta_i,\phi_j)$ — анизотропия температуры CMB в пикселе с координатами (θ_i,ϕ_j), $S(\theta_i,\phi_j)$ — сигнал со второй карты в той же площадке, $\overline{\Delta T(\Xi_p)}$ и $\overline{S(\Xi_p)}$ — средние значения в M-пикселе Ξ_p, полученные из карт с большим разрешением $\ell_{\max}$, $\sigma^2_{\Delta T_p}$ и $\sigma^2_{S_p}$ — соответствующие дисперсии. Квадратное окно корреляций Ξ_p задавалось равным $10° \times 10°$. Пример карт корреляций показан на рис. 4.

При выделении гармоник из карт использовалось разложение вариаций сигнала ΔS по мультиполям в полярной системе координат (θ,ϕ):

$$\Delta S(\theta,\phi) = \sum_{\ell=1}^{\infty}\sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi)\,, \tag{2}$$

где $Y_{\ell m}(\theta,\phi)$ — сферическая гармоника (мультиполь) с номером ℓ, и m — номер моды мультиполя. Угловой спектр мощности карты вычисляется с использованием коэффициентов $a_{\ell m}$ при сферических гармониках как

$$C(\ell) = \frac{1}{2\ell+1}\left[|a_{\ell 0}|^2 + 2\sum_{m=1}^{\ell}|a_{\ell m}|^2\right]. \tag{3}$$

Уровень доверительных интервалов вычисляется моделированием методом Монте-Карло для стандартной космологической модели ΛCDM.

2.1. Корреляционный мультиполь $\ell = 6$

Особенности мультиполя $\ell = 6$, выделенного на корреляционных картах (рис. 2): его положение и амплитуда, проявляются, как в самой карте ILC, так и в корреляциях сигнала ILC с положениями источников каталогов FSC и Planck (рис. 5).

Несмотря на различие карт 6-го мультиполя, все они имеют схожую структуру: мощная гармоника начинается в южном левом галактическом квадранте ($b < 0°$, $0° < l < 180°$), поднимается в северное полушарие и спускается в южный правый квадрант ($b < 0°$, $180° < l < 360°$). Некоторые фазовые характеристики этих гармоник оказываются также близкими. Мы рассчитали фазы $\psi_{\ell m}$, используя комплексное представление $a_{\ell m} = |a_{\ell m}| \exp(i\psi_{\ell m})$, а также нашли средний угол мультиполя, использовав тригонометрические моменты [18]:

$$\begin{aligned} \mathbf{Si}(\ell) &= \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \sin \phi_{\ell,m} \,, \\ \mathbf{Ci}(\ell) &= \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} \cos \phi_{\ell,m} \,. \end{aligned} \tag{4}$$

и рассчитав средний угол для заданного мультиполя ℓ как арктангенс отношения средних значений синуса и косинуса для мультиполя:

$$\Theta(\ell) = \arctan\left(\frac{\mathbf{Si}(\ell)}{\mathbf{Ci}(\ell)}\right) . \tag{5}$$

Они приведены в таблице 1.

Как видно из этой таблицы, схожие структуры на картах разных корреляций объясняются близкими значениями фаз ψ_{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.

Для исследования одной из возможных причин расположения экстремумов 6-го мультиполя ILC мы провели подсчеты источников в районе пятен и приводим результаты в таблице 2. Особенностями мультиполя $\ell = 6$ ILC являются: (1) попадание пятна No. 6 точно на положение Большого Магеллланова облака; (2) практически симметричное положение пятен No. 6, 8, 18 и 19 относительно плоскости и центра Галактики (рис. 6 и 7).

Эффект симметрии усиливается также превышением более чем в полтора раза числа источников в пятнах No. 6 (что и ожидается для БМО), 18 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 [19], а обзор FIRST покрывает лишь небольшую часть сферы.

2.2. Корреляционный мультиполь $\ell = 3$

Октуполь (гармоника $\ell = 3$) карты корреляций сигнала ILC с положениями источников Planck (см. рис. 3) является доминирующей по амплитуде гармоникой для данных Planck на частотах 30, 44, 100, 143, 217 ГГц (рис. 8) с превышением уровня разброса 3σ, получаемого при моделировании гауссова сигнала CMB. Гармоника начинается в северном левом ($b > 0°$, $0° < l < 180°$) галактическом квадранте, спускается в южную полусферу и поднимается в северное полушарие ($b > 0°$, $180° < l < 360°$). Октуполь перестает быть видимым относительно модельных угловых спектров мощности на частотах 545 и 857 ГГц. Кроме того, на высоких частотах значительно меняются и фазовые характеристики (рис. 9 и таблица 3). Также отметим, что на более высоких частотах, как, например, в данных IRAS, такого пика также нет.

В таблице 3 приведены фазовые характеристики корреляционного октуполя. На частотах 30–353 ГГц фазы мод близки по своим значениям (см. соответствующие столбцы, особенно для мод $m = 2$ и $m = 3$). Также обращает на себя внимание уменьшение среднего угла Θ с ростом частоты (кроме, величины Θ на 217 ГГц) и изменение структуры гармоники, задаваемой положением ярких пятен (пример см. на правой картинке рис. 9, для которой $\Theta < \pi$).

В таблице 4 приведены подсчеты источников в областях пятен корреляционного октуполя, за исключением плоскости Галактики. Отметим, что в южном полушарии ($b < 0°$) пятна содержат больше источников каталогов Planck, чем северные пятна. Вообще, между северной и южной полусферами распределение источников Planck неравномерно: при $b < 0°$ на юге находится 53% объектов из списка на 30 ГГц, 55% на 44 ГГц, 55% на 70 ГГц, 54% на 100 ГГц, 52% на 143 ГГц, 56% на 217 ГГц, 56% на 343 ГГц, 55% на 545 ГГц и 50% на 857 ГГц. Из приведенных цифр видно, что на всех частотах

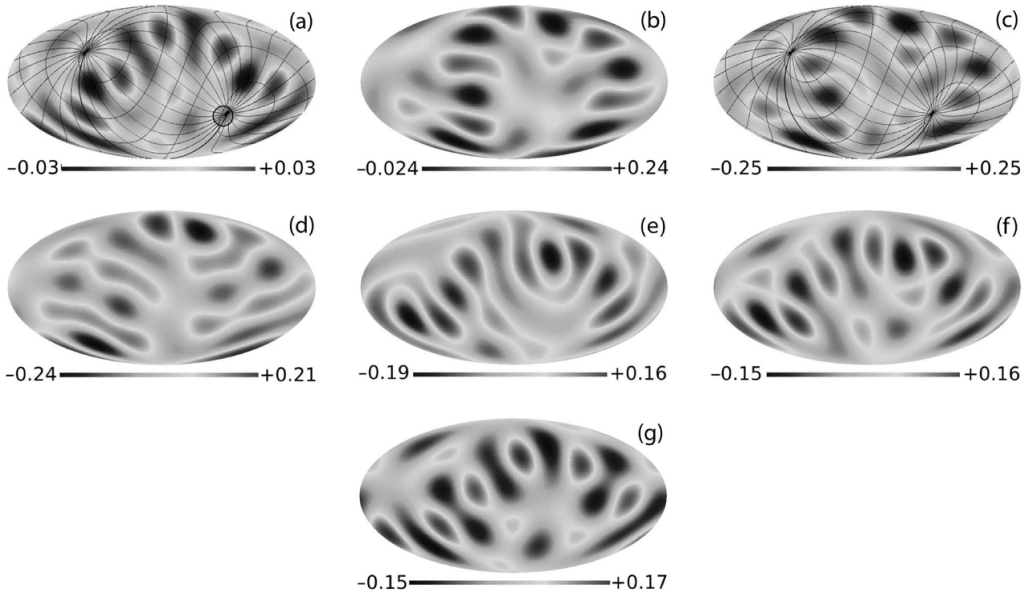


Рис. 5. 6-й мультиполь карты ILC (a) и карт корреляций: FSC IRAS vs ILC для длин волн 12 μm (b), 25 μm (c), 60 μm (d); положений источников Planck и ILC для частот 217 ГГц (e), 353 ГГц (f) и 545 ГГц (g). Изображения построены в галактической системе координат. На карты (a) и (c) нанесена сетка эклиптической системы координат. Черной окружностью на карте ILC (a) отмечено пятно, совпадающее с положением Большого Магелланова Облака ($b = 280\overset{\circ}{.}421$, $l = -32\overset{\circ}{.}932$) размером $10\overset{\circ}{.}75 \times 9\overset{\circ}{.}17$.

Таблица 1. 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, 25 и 60 μm) и с положением объектов Planck на частотах (217, 353 и 545 ГГц). В первом столбце приведены названия карт ($\mathbf{M}_c$ —карта корреляций). В последнем столбце приведены величины средних углов (в радианах) 6-го мультиполя исследуемых карт, согласно уравнению (5).

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
$\mathbf{M}_c$(FSC, 60 μm)	2.674	5.578	3.364	0.656	5.166	4.433	4.662
$\mathbf{M}_c$(FSC, 25 μm)	2.249	5.480	3.321	3.073	0.086	5.100	4.167
$\mathbf{M}_c$(FSC, 12 μm)	2.238	5.908	3.376	2.385	6.235	4.528	3.410
$\mathbf{M}_c$(Planck, 217 ГГц)	2.332	1.196	3.674	0.356	4.170	1.767	2.105
$\mathbf{M}_c$(Planck, 353 ГГц)	1.541	0.883	4.684	0.211	4.319	1.447	0.660
$\mathbf{M}_c$(Planck, 545 ГГц)	6.072	5.005	3.698	0.256	4.679	1.615	5.449

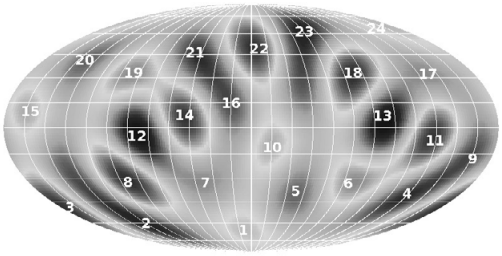


Рис. 6. Номера исследуемых зон (горячих и холодных пятен) для 6-го мультиполя карты WMAP ILC. На карту наложена галактическая координатная сетка.

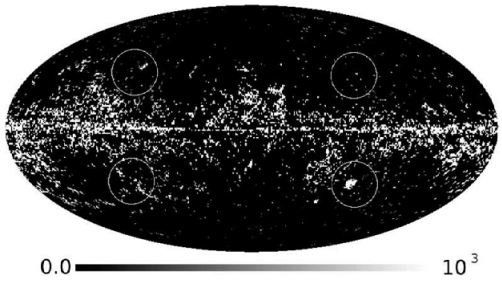


Рис. 7. Симметричные области пятен из 6-го мультиполя WMAP ILC, наложенные на карту с источниками Planck на частоте 353 ГГц.

Таблица 2. Количество объектов, обнаруживаемых в горячих и холодных пятнах 6-го мультиполя ILC, из каталогов FIRST, NVSS, Planck и FSC IRAS. Номера пятен, соответствующих рис. 6, 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 $10\overset{\circ}{.}75 \times 9\overset{\circ}{.}17$). 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

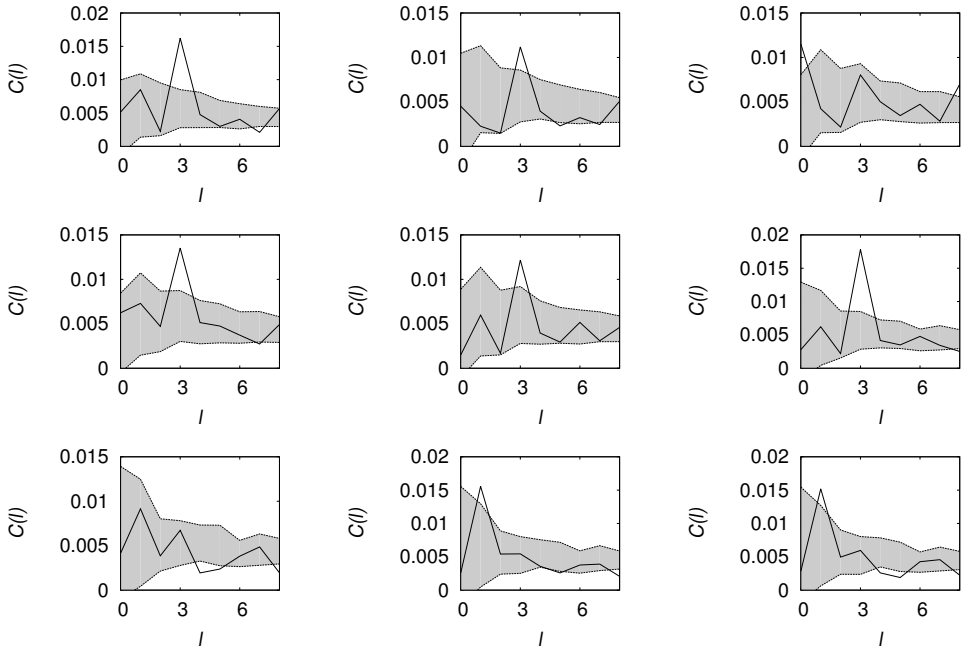


Рис. 8. Слева направо сверху вниз: угловые спектры мощности карт корреляций ILC с картами положений источников Planck на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 847 ГГц. Размер окна корреляций — $10^\circ \times 10^\circ$.

Рис. 9. Мультиполь $\ell = 3$ карт корреляций ILC с картой положений источников Planck на частотах 30 (слева), 217 (в центре) и 847 ГГц (справа) в галактической системе координат. На правую карту наложена сетка экваториальной системы координат. Ее полюса попадают на особые (седловидные) точки.

(кроме 857 ГГц), где имеется доминирование южной полусферы по числу источников, наблюдается и пик в спектре мощности.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы проанализировали две мощные корреляционные гармоники, обнаруженные в Работе I при корреляции сигнала ILC WMAP с данными субмиллиметрового и инфракрасных диапазонов. Были рассчитаны фазы мод мультиполя и проведены подсчеты источников в пятнах гармоник.

Фазовый анализ подтверждает, что гармоника $\ell = 6$ сигнала ILC WMAP имеет схожие свойства с мультиполем $\ell = 6$ в картах корреляций с данными FSC IRAS и Planck. Чувствительность корреляционной гармоники к эклиптической системе координат может быть связана, в частности, с близким положением Большого Магелланова Облака к южному эклиптическому полюсу, а также бóльшим числом субмиллиметровых и ИК-источников, попадающих в экстремумы мультиполя. Мы не исключаем, что часть сигнала в 6-ой гармонике ILC WMAP обусловлена либо этими, либо связанными с ними источниками излучения (например, галактическими облаками, искажающими CMB).

Самая мощная гармоника в изучаемых мозаичных картах, $\ell = 3$ (рис. 8), при корреляциях с источниками Planck имеет очень близкие фазы мод для всех рабочих частот миссии, кроме 545 и 847 ГГц. Это говорит об общей природе этой гар-

Таблица 3. 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 5) октуполя исследуемых карт.

ν, ГГц	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

Таблица 4. Количество объектов, обнаруживаемых в горячих и холодных пятнах 3-го мультиполя карты корреляций сигнала ILC с картой положений объектов Planck на частоте 217 ГГц. Номера пятен, соответствующих пронумерованным областям на рис. 9 (средняя карта), приведены в первом столбце. Символ у номера пятна является характеристикой экстремума: h — максимум, c — минимум. Во втором столбце даны галактические координаты центров пятен. Пятна No. 3 и 4 пропущены, так как находятся в плоскости Галактики и в анализе не участвовали. Знак "–" в столбце означает отсутствие данных в обзоре (зона вне наблюдений).

No.	l, deg	b, deg	NVSS	Planck	IRAS
1h	347.525	−58.521	–	37	330
2c	73.069	−30.147	4004	91	142
5h	253.069	+30.147	3907	16	242
6c	167.525	+58.521	4232	26	314

мониками на разных частотах. Как уже отмечалось в Работе I, октуполь карты корреляций данных Planck vs ILC имеет сходство (положение, форму и направление) с Магеллановым Потоком, наблюдающимся в линии 21 см и протянувшимся на сфере примерно на 200° [20]. Для проверки этой версии нужно исследовать корреляции ILC с распределением газовых облаков, что предполагается в дальнейшем при наличии соответствующего данных. По результатам этой работы можно сказать, что в южные пятна октуполя попадает бóльшее число объектов, чем в северные. Формирующие гармонику источники имеют, скорее всего, внегалактическое происхождение, т.к. в каталогах на частотах 30 и 44 ГГц находятся в основном внегалактические объекты.

Дополнительный анализ обнаруженных корреляционных свойств CMB с положением объектов будет сделан после опубликования карт CMB миссии Planck.

БЛАГОДАРНОСТИ

В данной работе авторы использовали базу данных CATS (`http://cats.sao.ru`) [11, 21], систему обработки радиоастрономических данных FADPS (`http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html`) [22, 23] и пакет GLESP (`http://www.glesp.nbi.dk`) [24, 25] для анализа данных на сфере. О. В. Верходанов также благодарит за поддержку Фонд Дмитрия Зимина "Династия".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. V. Verkhodanov, Ya. V. Naiden, Astrophysical Bulletin **67**, 1 (2012).
2. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003).
3. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007).
4. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009).
5. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 14 (2011).
6. C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., *Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases, IRAS Faint source catalog* (1988).
7. C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., *Infrared astronomical satellite (IRAS) catalogs and atlases*, Vol. 1: *Explanatory supplement* (1988).
8. 2MASS team, *2MASS Second Incremental Data Release Catalogs and Tables* (2002).

9. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. Van Dyk, et al., *Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release* (2002); `http://www.ipac.caltech.edu/2mass`.
10. Planck Collaboration: P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al., Astron. Astrophys. **536**, A7 (2011).
11. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005).
12. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Data Sci. J. **8**, 34 (2009).
13. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Intern. J. Mod. Phys. **14**, 275 (2003).
14. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
15. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg, Astrophys. J. **475**, 479 (1997).
16. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, Astrophysical Bulletin **64**, 263 (2009).
17. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **65**, 390 (2010).
18. M. Hansen, A. M. Frejsel, J. Kim, et al., Phys. Rev. D **83**, 103508 (2011).
19. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, E. K. Majorova, and Yu. N. Parijskij, Astrophysical Bulletin **63**, 366 (2008).
20. D. L. Nidever, S. R. Majewski, B. W. Butler, and L. Nigra, Astrophys. J. **723**, 1618 (2010).
21. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, ASP Conf. Ser. **322**, 46 (1997).
22. O. V. Verkhodanov, ASP Conf. Ser. **125**, 46 (1997).
23. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
24. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
25. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Intern. J. Mod. Phys. **20**, 1053 (2011).

ПОИСК НЕГАУССОВОСТИ В НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО РЕЛИКТОВОМУ МИКРОВОЛНОВОМУ ФОНУ*

О. В. Верходанов[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Даётся обзор методов поиска негауссовости в данных миссии WMAP. Обсуждаются проблемы связанного с этим поиском анализа данных реликтового излучения. К настоящему времени указания на отклонение от гауссовости данных микроволнового фона получена различными методами в нескольких диапазонах мультиполей. Различные подходы при поиске негауссовости в данных по реликтовому фону чувствительны к различным сторонам этого явления, которое иногда может быть обусловлено первичной негауссовостью, а иногда — остаточным проявлением фоновых излучений Галактики и/или трудно учитываемыми систематическими ошибками, оставшимися после анализа наблюдательных данных.

Ключевые слова: реликтовое излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

В стандартном космологическом сценарии с Большим взрывом и простой инфляцией [1–5] квантовые флуктуации скалярного поля генерируют неоднородности в распределении видимой и тёмной материи [6–10], что приводит к флуктуациям в реликтовом излучении Вселенной. Причём ожидается — и это подтверждается наблюдениями, что флуктуации температура и поляризации реликтового излучения, или космического микроволнового фона (CMB — Cosmic Microwave Background), с определённой степенью точности являются гауссовыми случайными полями, статистически изотропными в пространстве. Тем не менее некоторые модели предсказывают небольшие, но всё же заметные отклонения от гауссовой статистики сигнала и/или статистической изотропии, которые в принципе могут быть вызваны рядом причин. В инфляционной теории сравнительно сильная негауссовость возникает в моделях со сложной инфляцией [11–16] (например, если имеется нелинейная связь между классическими флуктуациями скалярного поля, генерируемыми на инфляционной стадии, и наблюдаемым полем флуктуаций плотности вещества) (см. также [17–22]), а статистическая анизотропия может быть вызвана анизотропным расширением на инфляционной стадии [23–30], связанным, например, с наличием классических векторных полей. Другими интересными с точки зрения космологии источниками негауссовости и статистической анизотропии могут быть нетривиальная топология пространства [31–35], топологические дефекты [36–39], анизотропное расширение [40, 41], первичное магнитное поле [42–46] и т.д. В связи с появлением новых данных на полной сфере [47] вопрос поиска и объяснения негауссовых свойств реликтового излучения становится особенно актуальным.

Негауссовость и статистическая анизотропия являются довольно близкими с точки зрения космологии, хотя и далеко не тождественными понятиями. Далее при обсуждении возможных отклонений от простой картины гауссовых и статистически изотропных флуктуаций мы для краткости будем говорить о негауссовости, хотя ряд свойств карт CMB, таких как соосность мультиполей (см. разделы 3.3 и 6), следует обсуждать скорее в терминах статистической анизотропии.

Надёжное установление негауссовости, вызванной процессами, происходившими в ранней Вселенной, имело бы важнейшее значение для космологии. Различные космологические сценарии приводят к разным формам негауссовости возмущений плотности (см., например, [48–58] и приведенные там ссылки). Например, возникающие трёхточечные и высшие корреляционные функции имеют самую разнообразную зависимость от координат или волновых векторов. Поэтому исследование негауссовости может помочь выделить жизнеспособные космологические модели. При этом исследование флуктуаций CMB обоснованно считается наибо-

*© "Успехи физических наук", 2012. Верходанов, О. В. Поиск негауссовости в наблюдательных данных по рекликтовому микроволному фону / О. В. Верходанов. // Успехи физических наук. — 2012. — № 182(11). — С. 1177.

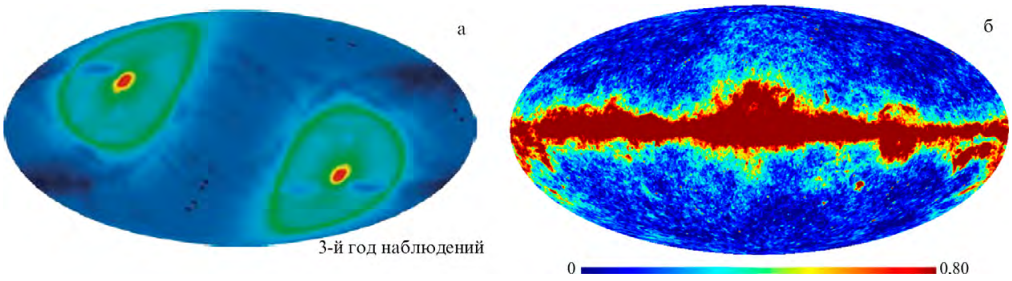


Рис. 1. (а) Пример обусловленного эклиптической координатной системой негауссова эффекта, который проявляется в картах чувствительности космического аппарата WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). (б) Пример обусловленного галактической координатной системой негауссова эффекта, связанного с излучением Галактики, которое приходит в основном из галактической плоскости, — показана карта синхротронного излучения в K-канале WMAP.

лее эффективным способом поиска негауссовости [59]. У многообразия возможных форм негауссовости есть, однако и оборотная сторона: *a priori* неизвестно, какой сигнал следует искать и в каких характеристиках CMB негауссовость проявляется сильнее всего. Дело осложняется и тем, что к негауссовости CMB могут приводить также эффекты, связанные с поздней Вселенной, такие как линзирование CMB [60, 61], неучтённые точечные источники и др.

Есть ещё две причины, приводящие к негауссовости в реальном сигнале, возникающем при исследовании CMB. Это совокупность систематических ошибок, обусловленных наблюдательными эффектами и/или эффектами обработки данных (например, негауссовой формой диаграммы направленности антенны, особенностями наблюдений микроволнового фона в плоскости эклиптики и др.) и нестабильностью алгоритмов разделения компонент сигнала, приводящая к остаточному загрязнению галактическими фоновыми компонентами (рис. 1), которые на малых угловых масштабах плохо изучены [62].

Для поиска и анализа негауссовых свойств температуры CMB развиты как методы, использующие само распределение флуктуаций температуры по небесной сфере $\Delta T(\theta,\phi)$, где θ,ϕ — углы в полярной системе координат, так и методы, основанные на разложении флуктуаций температуры по сферическим гармоникам:

$$\Delta T(\theta,\phi)=\sum_{\ell=2}^{\infty}\sum_{m=-\ell}^{m=\ell}a_{\ell m}Y_{\ell m}(\theta,\phi), \qquad (1)$$

где $a_{\ell m}$ — комплексные величины, обладающие свойством

$$a^{*}_{\ell m}=a_{\ell,-m}, \qquad (2)$$

следующим из действительности флуктуаций температуры $\Delta T(\theta,\phi)$. Теоретически связь между первичными неоднородностями, представляющими собой адиабатические скалярные возмущения, и коэффициентами $a_{\ell m}$ является линейной [63]:

$$a_{\ell m}=(-i)\int\frac{d^3\mathbf{k}}{(2\pi)}\Phi(\mathbf{k})g_{T\ell}(k)Y^{*}_{\ell m}(\hat{\mathbf{k}}), \qquad (3)$$

где $\Phi(\mathbf{k})$ описывает первичное возмущение плотности (точнее, гравитационного потенциала) в фурье-пространстве, $g_{T\ell}(k)$ — передаточная функция, $\hat{\mathbf{k}}$ - единичный вектор вдоль направления волнового вектора $\mathbf{k}$. Линейная связь имеется и между флуктуациями температуры $\Delta T(\theta,\phi)$ и первичными флуктуациями $\Phi(\mathbf{k})$. Полная функция переноса излучения $g_{T\ell}(k)$ может быть рассчитана с помощью программы CMBFAST [64]. Простая линейная связь позволяет, по крайней мере в принципе, связать статистику сигнала CMB со статистикой первичных возмущений: если первичные флуктуации $\Phi(\mathbf{k})$ негауссовы, то возможно наблюдение негауссовости и в реликтовом излучении. Для чувствительных обзоров всего неба, например миссий WMAP[1] и PLANK[2], уже можно искать проявлений отклонений от гауссовой статистики сигнала. Подчеркнём, что выражение (3) справедливо не только для адиабатических первичных возмущений, но и для мод постоянной кривизны [63] (со своими передаточными функциями).

Отметим один момент, о котором необходимо сказать при обсуждении проблем негауссовости CMB, — он связан с расчётом углового спектра мощности $C(\ell)$. По определению

$$C(\ell)=\frac{1}{2\ell+1}\left(|a_{\ell 0}|^2+2\sum_{m=1}^{l}|a_{\ell m}|^2\right), \qquad (4)$$

а коэффициенты $a_{\ell m}$ получаются обращением кар-

[1] http://lambda.gsfc.nasa.gov
[2] http://www.rssd.esa.int/Planck/

ты в гармоники:

$$a_{\ell m} = \int_0^{\pi} \sin\theta \mathrm{d}\theta \int_0^{2\pi} \mathrm{d}\phi \Delta \mathrm{T}(\mathrm{x},\phi) \mathrm{Y}^*_{\ell \mathrm{m}}(\mathrm{x},\phi). \quad (5)$$

В выражении 4 предполагается распределение $2\ell+1$ коэффициентов $a_{\ell m}$, квадраты амплитуд которых усредняются с одинаковыми весами. В этом случае для двухточечного коррелятора справедливо (усреднение идёт по ансамблю Вселенных):

$$\langle a_{\ell m} a^*_{\ell' m'} \rangle = C_\ell \delta_{\ell \ell'} \delta_{m m'} \quad (6)$$

Для негауссовых данных при усреднении на заданном ℓ смысл величины C_ℓ становится неочевидным.

Простейшей и наиболее хорошо изученной величиной, в которой может проявляться негауссовость флуктуаций CMB, является трёхточечная корреляционная функция или её гармонический аналог — биспектр

$$\langle a_{\ell_1 m_1} a_{\ell_2 m_2} a_{\ell_3 m_3} \rangle \quad (7)$$

Биспектр весьма чувствителен к некоторым формам негауссовости, считающимися "стандартными". К последним относят так называемую локальную форму, получаемую в предположении, что первичные флуктуации обладают нелинейностью, локальной в координатном пространстве [63]:

$$\Phi(x) = \Phi_{\mathrm{L}}(x) + f_{\mathrm{NL}}(\Phi^2_{\mathrm{L}}(x) - \langle \Phi^2_{\mathrm{L}}(x) \rangle), \quad (8)$$

где $\Phi_{\mathrm{L}}(x)$ обозначает линейное гауссово поле, $\langle \Phi_{\mathrm{L}}(x) \rangle = 0$, f_{NL} — константа, описывающая нелинейность в виде квадратичной поправки к возмущениям гравитационного потенциала (кривизны). Такая форма негауссовости действительно возникает в некоторых инфляционных моделях, использующих дополнительное скалярное поле (curvation) [12, 65, 66] и/или нетривиальную динамику постинфляционного разогрева (modulated reheating) [14, 15]. "Стандартными" считаются также "равносторонняя" [67] и "ортогональная" формы [68] негауссовости. Исследованиям этих, а также некоторых других форм негауссовости команда космической миссии WMAP посвятила несколько работ [22, 69–72], причём основным инструментом являлся именно угловой биспектр температуры CMB. Авторы [72] установили, что результаты анализа данных за семь лет наблюдений миссии WMAP согласуются с гипотезой о гауссовости первичных флуктуаций на уровне достоверности 95%, и после комбинирования своих результатов с данными SDSS (Sloan Digital Sky Survey) ($-29 < f_{\mathrm{NL}} < 70$ [73]) нашли, в частности, что $-5 < f_{\mathrm{NL}} < 59$.

В зависимости от исследуемых статистических свойств сигнала CMB, параметра разрешения ℓ, описывающего угловые масштабы на сфере, а также поставленных целей применяются различные подходы при изучении особенностей распределения излучения на небесной сфере. За года, прошедшие после появления данных миссии WMAP [69, 74–79], было объявлено о целом ряде отклонений в распределении сигнала CMB от гауссовости и статистической изотропии [80–98]. Для проверки и изучения негауссовости было предложено несколько тестов на основе фазового анализа, мультипольных векторов, функционалов Минковского, вейвлетов и нидлетов, биспектра и триспектра и др. В настоящей статье мы рассмотрим некоторые из этих методов (применяемых в упомянутых выше работах к данным миссии WMAP), главное преимущество которых заключается в многоразовом и многочастотном полном покрытии неба. Именно этот факт дал возможность широко применить описанные в настоящей статье методы. Необходимо отметить, что наблюдения космического микроволнового фонового излучения космической миссией WMAP NASA и дальнейшее их представление астрономическому сообществу в архиве наблюдений WMAP стало революционным шагом в современной космологии.

В заключение этого раздела отметим, что окончательного ответа на вопрос о наличии или отсутствии негауссовых особенностей в статистике первичных возмущений плотности пока не получено. Некоторые особенности, которые мы обсудим в этой статье, вполне могут быть вызваны упомянутыми выше систематическими эффектами и нестабильностью алгоритмов разделения компонент, другие могут быть просто статистическими флуктуациями. В последнем случае, как подчёркивает команда WMAP [69], оценки статистической значимости аномалий затруднены тем, что они были наблюдены *a posteriori* и нередко с использованием параметров, значения которых специально подбирались для того, чтобы добиться максимального негауссова сигнала.

2. КАРТА РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧНЕИЯ

Измеряемый в эксперименте сигнал содержит, помимо CMB, вклады галактических фоновых компонент и галактических и внегалактических радиоисточников. Это обстоятельство можно учесть, накладывая маски, т.е. исключая из рассмотрения определённые участки небесной сферы (22 % для маски KQ85y7, используемой для данных, собранных за семь лет миссией WMAP[99]). Можно, однако, восстановить сигнал CMB со всей небесной сферы, используя результаты многоча-

стотных наблюдений WMAP. Один из методов построения полной карты температуры CMB представляет собой комбинацию наблюдательных данных на разных частотах с домножением на некоторые коэффициенты, которые позволяют в результате удалить галактический сигнал и тем самым выделить микроволновой реликтовый фон [77]. В таком подходе используется идея о том, что спектры излучения компонент галактического фона (а именно синхротронного, свободно-свободного излучений и излучения пыли) отличаются от спектра CMB. Поскольку комбинация каналов в миссии WMAP производится без привлечения наблюдений в других экспериментах, этот метод получил название "внутренняя линейная комбинация" (ILC — Internal Linear Combination) и созданная с его помощью карта соответственно называется картой ILC. Коэффициенты можно определить минимизацией дисперсии в результирующей карте, приравняв их сумму единице, для того, чтобы сохранить общую нормировку сигнала CMB.

Для описания этой процедуры отметим прежде всего, что по результатам моделирования [77] установлено, что инструментальный шум не оказывает существенного влияния на ситуацию, поскольку даёт смещение в оценке сигнала в плоскости Галактики лишь порядки 10 мкК. В простом случае, когда инструментальным шумом можно пренебречь, а фоновые компоненты имеют одинаковый спектр в исследуемой области и различаются в разных её местах лишь температурой, искомую ILC-температуру можно записать в виде линейной комбинации сигналов карт на различных частотах ν_i:

$$T_{\rm ILC}(p) = \sum_i \zeta_i T_i(p) = \sum_i \zeta_i [T_c(p) + s_i T_f(p)] = \\ = T_c(p) + \Gamma T_f(p). \quad (9)$$

Здесь $T_i(p) \equiv T(\nu_i, p)$ — карта наблюдаемого сигнала на частоте ν_i, p — некоторый пиксел изображения (минимальная область карты с измеренной температурой), карта сигнала $T_i(p) = T_c(p) + S_i T_f(p)$ представлена в виде суммы карт CMB $T_c(p)$ и фоновой компоненты $S_i T_f(p)$, коэффициент $S_i \equiv S(\nu_i)$ описывает суммарный частотный спектр фонового излучения, $T_f(p)$ — температурное распределение фонового излучения. Коэффициенты ζ_i, которые требуется определить, подчиняются нормировочному условию $\sum_i \zeta_i = 1$. В 9 введено обозначение $\Gamma \equiv \sum_i \zeta_i S_i$.

Для определения коэффициентов ζ_i проводится минимизация дисперсии $T_{\rm ILC}(p)$. Для этой дисперсии имеем [77]

$$\sigma^2_{\rm ILC} = \langle T^2_{\rm ILC}(p)\rangle - \langle T_{\rm ILC}(p)\rangle^2 = \\ = \langle T_c^2\rangle - \langle T_c\rangle^2 + 2\Gamma[\langle T_c T_f\rangle - \langle T_c\rangle\langle T_f\rangle] + \\ + \Gamma^2[\langle T_f^2\rangle - \langle T_f\rangle^2] = \sigma_c^2 + 2\Gamma\sigma_{cf} + \Gamma^2\sigma_f^2. \quad (10)$$

Здесь угловые скобки $\langle ... \rangle$ означают усреднение по пикселам выбранной области. В результате минимизации $\sigma^2_{\rm ILC}$,

$$0 = \frac{\delta\sigma^2_{\rm ILC}}{\delta\zeta_i} = 2\frac{\delta\Gamma}{\delta\zeta_i}\sigma_{cf} + 2\Gamma\frac{\delta\Gamma}{\delta\zeta_i}\sigma_f, \quad (11)$$

получим $\Gamma = -\sigma_{cf}/\sigma_f^2$ и

$$T_{\rm ILC}(p) = T_c(p) - \frac{\sigma_{cf}}{\sigma_f^2} T_f(p).$$

В идеальном случае, когда корреляция между CMB и фоном отсутствует, т.е. $\sigma_{cf} = 0$, карта ILC совпадает с картой CMB. В действительности, как подчёркивают авторы [77], карта ILC смещена в сторону уменьшения корреляции между сигналом CMB и сигналом фоновых компонент.

Отметим, что существуют различные вариации метода ILC как в пиксельном, так и в гармоническом пространстве (см. обзор в [100]). Области, для которых применяется метод, можно ограничить следующим образом: 1) разбивая сферу на отдельные зоны [77] (например, при анализе данных WMAP сфера разбивалась на 12 областей, большая часть которых расположена в галактической плоскости); 2) используя правила отбора усредняемых пикселов [101]; 3) задавая определённый набор гармоник [102]. Можно использовать и другие комбинации разночастотных наблюдений. В результате модификаций получаются немного различные карты. Кроме того, существуют различные версии самой процедуры построения карты внутренней линейной комбинации (например, метод Lagrange ILC — LILC [86], который демонстрирует те же результаты, что ILC). И наконец, возможно разделение компонент сигнала и построение карт CMB с использованием других методов, таких, например, как метод максимальной энтропии (MEM — Maximum Entropy Method) [77, 103], подгонка шаблонов фоновых компонент по другим наблюдениям [77, 103], винеровская фильтрация (карта WMF (Wiener-Filtered Map). М. Тегмарка и др. [104]) или взвешенное удаление фона (карта FCM (Foreground-Cleaned Map) М. Тегмарка и др. [104]). С помощью последних Тегмарком и др. были построены карты CMB с большим разрешением ($\ell_{\rm max} = 600$), чем даёт WMAP. Далее мы будем преимущественно говорить о карте WMAP ILC, но коснёмся и карт, полученных другими методами.

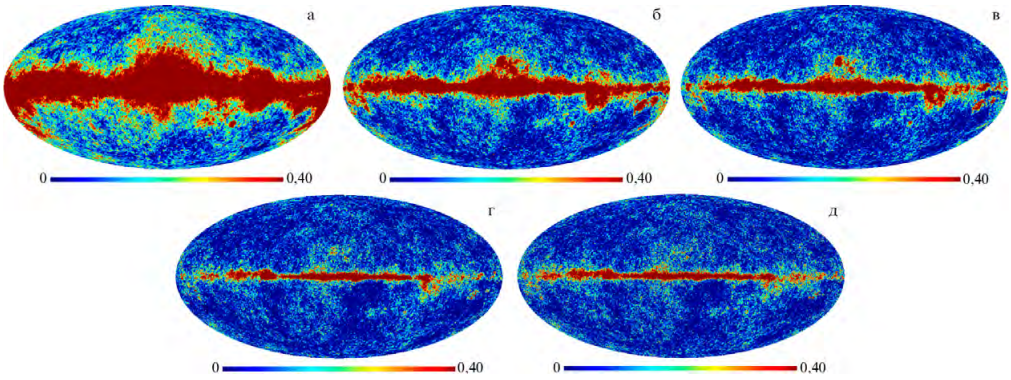


Рис. 2. Карты наблюдаемого микроволнового излучения в частотных каналах WMAP: (а) 23 ГГц (полоса K), (б) 33 ГГц (полоса Ka), (в) 41 ГГц (полоса Q), (г) 61 ГГц (полоса V) и (д) 94 ГГц (полоса W) по данным седьмого года наблюдений WMAP. Карты построены в галактических координатах.

Наблюдения WMAP проводились в пяти полосах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W) (рис. 2), с измерением интенсивности и поляризации. Массивы данных по итогам одного года, трёх, пяти и семи лет работы миссии предоставлялись на сайте для использования [74–79]. В результате обработки наблюдательных данных, включающей в себя регистрацию и запись временных рядов, создание карты (map-making) и пикселизацию неба, разделение компонент сигнала, и последующего анализа получены данные о распределении анизотропии и поляризации CMB, фоновых компонент (синхротронного и свободно-свободного излучения, излучения пыли), а также рассчитаны их спектры мощности. Построенная карта ILC WMAP сглаживалась диаграммой гауссовой формы с разрешением 1°. Весь архив наблюдаемых и обработанных данных доступен и представлен научному сообществу на сайте WMAP.

На рисунке 3 для не очень высоких гармоник ($\ell \leq 150$) приведена карта распределения анизотропии CMB, восстановленная методом ILC. На рисунке 4 показан угловой спектр мощности, построенный с использованием данных миссии WMAP и экспериментов ACBAR (Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver) [105] и QUaD (QUEST (Q and U Extragalactic Sub-mm Telescope) at DASI) [106].

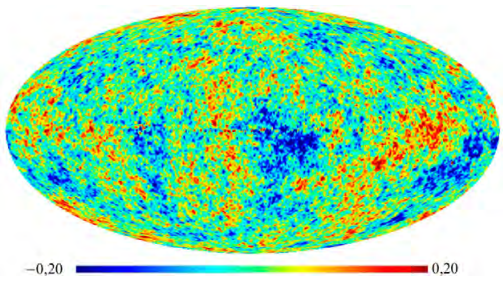


Рис. 3. Карта ILC CMB, построенная в галактических координатах по данным седьмого года работы миссии WMAP (приведена с разрешением до $\ell_{\max} = 150$).

3. ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

Впервые об обнаружении негауссовых свойств в данных WMAP было объявлено в работах, в которых исследовалась статистика данных первого го-

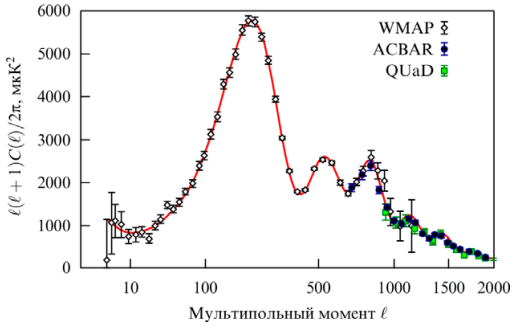


Рис. 4. Угловой спектр мощности $\ell(\ell+1)C(\ell)/2\pi$) карты WMAP седьмого года наблюдений [72] и результаты изменения углового спектра мощности флуктуаций температуры в экспериментах ACBAR [105] и QUaD [106]. Результаты приведены для области мультиполей до $\ell < 2000$, в которой не столь высок вклад эффекта Зельдовича–Сюняева и точечных источников. Сплошной кривой показан модельный спектр для космологии ΛCDM (Lambda Cold Dark Matter) с параметрами, определёнными на основе результатов WMAP.

да работы миссии [74–76] методами фазового анализа сигнала [80–82]. Хотя после предоставления карт CMB команда WMAP объявила [76], что выделенный сигнал является гауссовым с достоверностью 95%, было также отмечено, что ILC-карта содержит шум со сложными свойствами (“complex noise properties”)[3].

Фазовый анализ сигнала опирается на тот факт, что входящие в формулу (1) мультипольные коэффициенты $a_{\ell m}$ являются комплексными и они могут быть представлены в виде

$$a_{\ell m} = |a_{\ell m}| \exp(i\phi_{\ell m}), \qquad (12)$$

где $\phi_{\ell m}$ — фаза гармоники (ℓ, m). Из (2) следует, что при $m = 0$ и всех ℓ фазы $\phi_{\ell,0} = 0$, а $\phi_{\ell,-m} = -\phi_{\ell m}$. Однородные и изотропные гауссовы случайные поля имеют моды Фурье с независимыми распределениями вещественной и мнимой частей. Поэтому если первичные неоднородности плотности являются однородным и изотропным гауссовым полем в пространстве, то они приводят к фазам $\phi_{\ell m}$, независимо и равномерно распределённым в интервале $[0, 2\pi]$ [107, 108], что как раз и соответствует соотношению (6).

Строгое определение однородного и изотропного гауссова случайного поля требует, чтобы амплитуда имела распределение Рэлея, а распределение фазы было случайным [109]. В то же время центральная предельная теорема гарантирует, что суперпозиция большого числа фурье-мод со случайной фазой будет гауссовой. Поэтому требование случайного и равномерного распределения фаз само по себе служит определением гауссовости [107]. Если анализируемые данные негауссовы, то, как упоминалось, это может означать, что или какие-то механизмы в ранней Вселенной привели к негауссовым неоднородностям плотности, или имеются неучтённые систематические эффекты.

3.1. Цветовые фазовые диаграммы и негауссовость на высоких мультиполях ($100 < \ell \leq 400$)

Одними из первых цветовую визуализацию фаз для демонстрации фазовых связей применили Коулз и Чанг [110]. Не вдаваясь в детали методов визуализации, отметим, что наиболее подходящим для визуализации фазы является метод цвет – насыщение – яркость (Hue – Saturation – Brightness (HSB)), позволяющий учесть особенность фазы как круговой переменной. В этом методе чистые цвета — красный, зелёный и синий — соответствуют фазам 0, 120° и 240°, а дополнительные цвета

[3] http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/mproducts.html

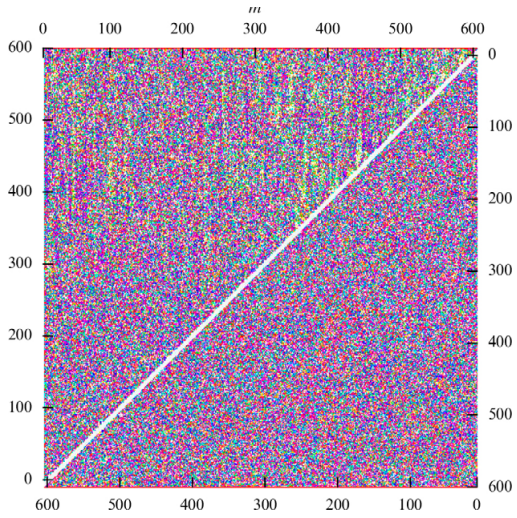


Рис. 5. Цветовая фазовая диаграмма градиента D_ℓ для карт FCM (верхний левый треугольник) и WFM (нижний правый). 256 цветов воспроизводят фазовые интервалы в диапазоне $[0, 2\pi]$, для которых фазы берутся из комплексного представления гармоник. По вертикальной оси отложены номера мультиполей ℓ, по горизонтальной — моды мультиполей m,$m \leq \ell$. Ввиду соотношения $a_{\ell,m} = a^*_{\ell,-m}$ приведены только моды с неотрицательными m. (См. детали в [80].)

(жёлтый, голубой и фиолетовый) — промежуточным фазам 60°, 180° и 300° соответственно. При изменении фазы цвета плавно “перетекают” друг в друга, причём фиолетовый переходит в красный, что согласовано с отождествлением фаз 360° и 0.

Метод картографирования баз был применён в работе [80] к данным CMB с высоким разрешением, полученным Тегмарком и др.[104]. На рисунке 5 показана цветовая кодировка фазового градиента $D_\ell \equiv \phi_{\ell+1,m} - \phi_{\ell,m}$ для карт FCM и WFM Тегмарка и др. Хотя нахождение фазового градиента для соседних мод — это наиболее примитивный способ проверки фазовых корреляций, видимое присутствие полос на фазовой карте FCM указывает на сильную связь между одинаковыми модами m соседних по ℓ мультиполей. В то же время фазовая диаграмма для карты WFM показывает равномерное распределение фаз, совместимое с гауссовостью сигнала.

Авторы [80] проверили “случайность” фаз более строгим образом, использовав моделирование и получив соответствующие статистические оценки разброса значений фаз [80, 111]. Для этого было построено 2000 симуляций случайных гауссовых полей, и в результате было обнаружено, что отклонение от гауссовости для нескольких диапа-

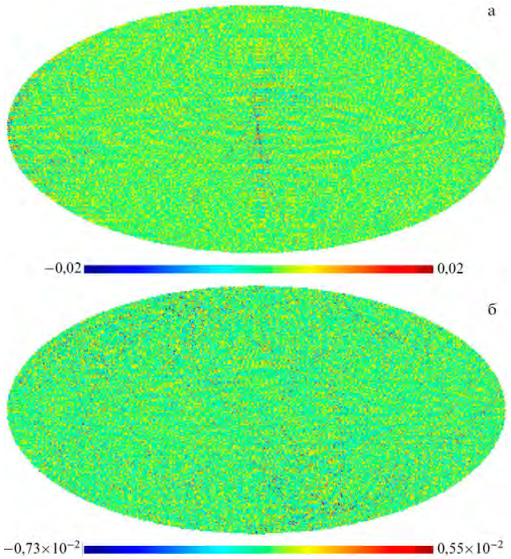


Рис. 6. Вклад в вариации температуры CMB от двух мультиполей, $\ell = 350$ и 352, для карт FCM (а) и WMAP (б) в галактических координатах. Выбор мультиполей обусловлен обнаружением связи фаз для гармоник с $\Delta\ell = 2$ в карте FCM. Видимая на FCM структура для $\varphi \simeq 0$ и π, перпендикулярная плоскости Галактики и проходящая через её центр, исчезает на картах WFM, полученных винеровской фильтрацией, делая их практически гауссовыми на этих мультиполях. (См. детали в [80].)

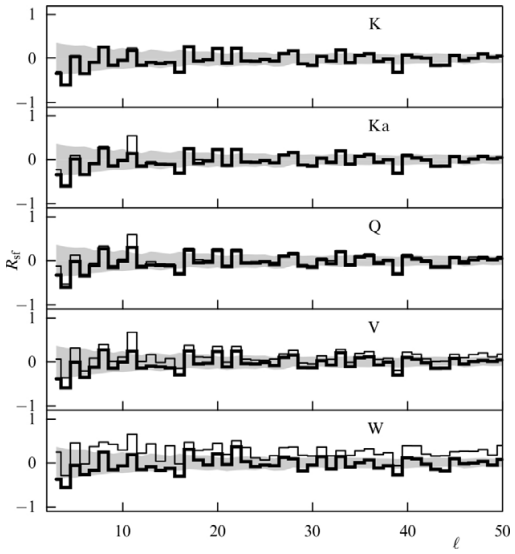


Рис. 7. Круговой коэффициент корреляции между фазами сигнала ILC CMB и галактических компонент в каналах K – W в зависимости от номера гармоники ℓ. Жирная линия соответствует результату корреляций с фазами фоновой компоненты, представленными WMAP. Тонкая линия соответствует данным фона, полученного из разности общего сигнала WMAP в заданном канале и сигнала ILC CMB. Затемнённая область показывает уровень ошибки 1σ, определенный по результатам моделирования 200 случайных реализаций. (См. также [81, 112].)

зонов мультиполей в области $\ell \simeq 150$, 290, 400 и 500 наблюдается на уровне достоверности, превышающем 95% [80]. Пример таких гармоник, фазы которых значительно отклоняются от статистических ожидаемых ($\ell = 350$ и 352 для карты FCM), приведён на рис. 6, где на карте видна перпендикулярная плоскости Галактики структура, проходящая через её центр. Это было первое обнаружение негауссовости в картах миссии WMAP; такая негауссовость интерпретируется как остаточное влияние фона Галактики.

3.2. Круговой статистический анализ и негауссовость на мультиполях с $10 \leq \ell \leq 50$

Позднее фазовые свойства карт WMAP проверялись другими методами. С использованием кластерного анализа и круговой статистики, работающей с углами, при анализе распределения фаз в работах [81,112] были независимо продемонстрированы негауссовы свойства карт CMB.

Были изучены фазы мультиполей из диапазона $2 \leq \ell \leq \ell_{\max} = 50$ для карт, взятых с web-сайта WMAP. кроме карт фоновых компонент, подготовленных командой WMAP для каждого частотного наблюдательного канала, в работах [81, 112] также исследовались пять карт, отображающих разность между сигналов в наблюдательном канале (S) и сигналом ILC:F=S-ILC. Такие карты мы будем называть “вторичными фоновыми картами”, в отличие от полученных при разделении компонент и представленных на сайте WMAP; последние будет называть просто “фоновыми картами”. Если ϕ_m и ψ_m - соответственно фазы некоторой фоновой компоненты и карты ILC для данного ℓ и всех соответствующих величин m, то, следуя статистике Фишера [113] для угловых величин, можно определить круговой кросскорреляционный коэффициент в каждой моде ℓ:

$$R_{sf}(\ell) = \ell^{-1} \sum_{m=1}^{\ell} \cos(\phi_m - \psi_m). \qquad (13)$$

На рисунке 7 приведены рассчитанные круговые коэффициенты корреляции между данными ILC и фоновыми компонентами, а также между ILC и

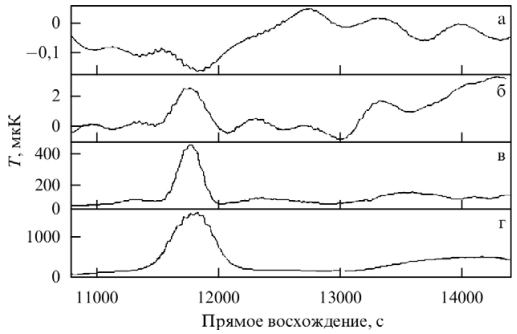


Рис. 8. Одномерные сканы карт WMAP: (а) ILC, (б) излучение пыли в W-канале, (в) свободно-свободное излучение в канале V и (г) синхротронное излучение в K-канале, на склонении $\delta = 41^\circ$ в области пересечения плоскости Галактики (см. пики на рис. б–г).

вторичными фонами для пяти частотных полос K – W. Как видно из рисунка, для первых трёх каналов эти коэффициенты невелики — не превышают случайного разброса (1σ), полученного в 200 модельных реализациях. Видно также, что для всех частотных полос функции $R_{\rm sf}(\ell)$ по форме подобны друг другу, что отражает сильные корреляции между фазами во всех каналах [81]. Рисунок 7 демонстрирует также то, что корреляция между фазами ILC и вторичных фоновых компонент выглядит более значительной, чем для фонов WMAP. Таким образом, поведение (положение максимумов и минимумов) галактического фонового (без CMB) сигнала оказывается связанным с сигналом ILC CMB. Особенно заметно проявление корреляций в 11-м мультиполе в частотных полосах Ka, Q, V и W, а также по всём канале W, в котором излучение пыли является доминирующим. Заметим, что 11-й м мультиполь принадлежит диапазону пространственных гармоник $10 \le \ell \le 20$, в котором особенно существенно излучение плоскости Галактики, приходящее из области углов $|b| < 10^\circ$. Всё это говорит о существовании остаточного сигнала галактических компонент в очищенном сигнале CMB. Остаточное влияние Галактики на очищенный сигнал можно продемонстрировать даже в одномерном скане, например, на склонении $\delta = 41^\circ$ (рис. 8) [114], где заметен неглубокий минимум температуры в карте ILC в области Галактики.

3.3. Корреляции фаз соседних мультиполей и случайное блуждание в пространстве фаз

Чтобы проверить статистическую независимость фаз $\phi_{\ell,m}$ для нечётных и чётных ℓ, Хансен и др. [98] использовали тригонометрические моменты:

$$\begin{aligned} \mathrm{Si}(\ell) &= \ell^{-1} \sum_{\mathrm{m}=1}^{\ell} \sin(\phi_{\ell,\mathrm{m}}), \\ \mathrm{Ci}(\ell) &= \ell^{-1} \sum_{\mathrm{m}=1}^{\ell} \cos(\phi_{\ell,\mathrm{m}}), \end{aligned} \tag{14}$$

и рассчитывали средний угол для заданного мультиполя ℓ как арктангенс отношения средних значений синуса и косинуса для мультиполей с фиксированным ℓ:

$$\Theta(\ell) = \arctan \frac{\mathrm{Si}(\ell)}{\mathrm{Ci}(\ell)}. \tag{15}$$

При этом для однородного и изотропного случайного гауссова поля, генерируемого первичными флуктуациями, однородность в распределении фаз приводит к однородности средних углов $\Theta(\ell)$, характеризующими мультиполи с разными ℓ. В то же время Хансен и др. [98] обнаружили такую корреляцию. Прежде всего они подтвердили факт сосности квадрупольной и октупольной компонент (см. раздел 6), проявляющийся в подходе работы [98] как близость значений $\Theta(\ell)$ при $\ell = 2$ и $\ell = 3$. Более того, они показали, что подобный факт (сосность) не уникален. Например, было показано, что аналогичное явление близости значений $\Theta(\ell)$ наблюдается для фаз некоторых пар мультиполей с $\Delta\ell = 1$ (т.е. имеется корреляция между соседними чётными и нечётными мультиполями, $\ell = 18{,}19; 28{,}29; 33{,}34$ и др.) в галактической системе координат, а также с $\Delta\ell = 2$ ($\ell = 5{,}7; 23{,}25; 33{,}35$ и др.) в эклиптической системе координат.

Кроме того, авторы работы [98] предложили алгоритм случайного блуждания для средних углов $\Theta(\ell)$ и обнаружили значительное расхождение между поведением средних углов для чётных и нечётных гармоник, которое особенно чётко проявляется на карте ILC CMB, построенной в галактической системе координат. Наряду с различиями в значениях мультипольных коэффициентов C_ℓ для гармоник с чётными и нечётными ℓ, о которых пойдет речь в разделе 10, этот результат указывает на нарушение пространственной чётности в данных WMAP. Происхождение обнаруженного проявления негауссовости авторы [98] объясняют как инструментальными, так и возможными космологическими причинами.

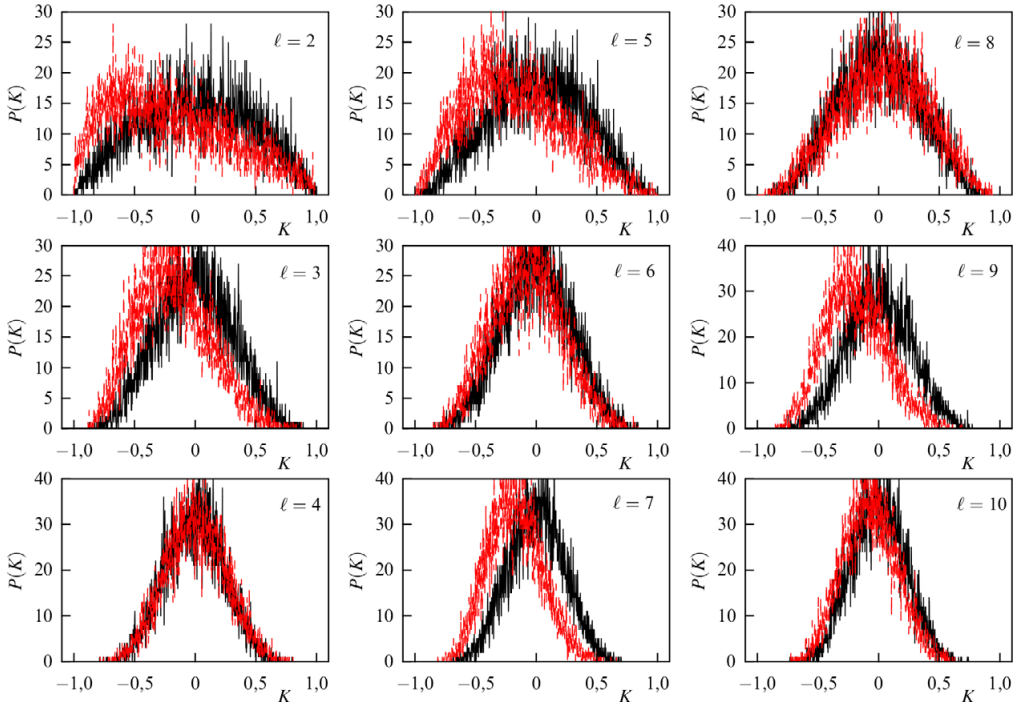


Рис. 9. Функция распределения $P(K)$ для кросскорреляции случайных реализаций сигнала CMB и фоновой компоненты в полосе V при $\ell = 2 - 10$, указанных на рисунке. Тёмная сплошная линия соответствует входному сигналу, светлая линия — выходному сигналу. (См. также [93].)

4. НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА НА НИЗКИХ МУЛЬТИПОЛЯХ ($2 \leq \ell \leq 10$)

Чтобы понять свойства кросскорреляций карт ILC-фон как возможной причины негауссовости, был проведён [93] численный тест с использованием 10000 модельных реализаций входных карт CMB со случайным гауссовым сигналом [86]. Из 10000 исходных карт модели CMB в космологии ΛCDM (назовём их входными картами) было получено столько же карт посредством добавления фона Галактики и дальнейшего восстановления CMB методом ILC (назовём такие карты выходными). На рисунке 9 приведены гистограммы числа событий $P(K_\ell)$ в зависимости от величины K_ℓ, являющейся коэффициентом корреляции между входной (или выходной) картой и картой фоновой компоненты для каждой симуляции и каждой гармоники ℓ.

Для входной квадрупольной компоненты форма функции распределения хорошо согласуется с формой функции $P(K) = A(1 - K^2)$, где A - множитель нормировки. По зависимости $P(K)$, приведённой в левом верхнем углу на рис. 9 ($\ell = 2$), определяются первый момент $\langle K \rangle = -0.00043$ и второй момент $\langle K^2 \rangle = 0.19934$ для функции $P(K)$ [115, 116]. Затем аналогичный анализ может быть проведён для выходных карт. Из рисунка 9 можно увидеть, что функция распределения для квадруполя значительно сдвинута, так что $\langle K \rangle \simeq -0.254$ при дисперсии $\sigma^2 = \langle K^2 \rangle - \langle K \rangle^2 \simeq 0.1454$. Для квадрупольной и октупольной компонент не только смещён центр тяжести функции распределения для выходного сигнала, но и искажена форма этой функции. При $\ell = 4$ наблюдается практически полное соответствие функций распределения для входных и выходных карт. Для гармоник $\ell = 5$, 7, 9 вновь наблюдается искажения функции распределения, обусловленное влиянием фоновых компонент. Как видно из рис. 9, в результате применения метода ILC (точнее LILC, являющегося одной из модификаций ILC[86] и точно воспроизводящего карту ILC WMAP) в выходных картах отрицательные корреляции с фоном получаются с боль-

шей вероятностью, чем положительные. Для квадрупольной и октупольной компонент характерные масштабы разностей между входными и выходными картами сравнимы с величиной сигнала CMB. Как показано в [117], эти разности связаны с фоновыми компонентами. Для того чтобы это продемонстрировать, можно рассчитать, исходя из данных WMAP, комбинацию $d_{\ell,m} = a_{\ell,m}^{(Ka)} - a_{\ell,m}^{(V)}$, в которую вклад даёт только фон, и определить её корреляцию с коэффициентами $a_{\ell,m}$ для выходных карт LILC (например, для реализации 00008 [93]). Для чётных мультиполей, $\ell = 2$, 4, 6, 8, 10, это реализации CMB корреляционные коэффициенты составляют $K_n^{\rm even} = 0.183$; 0.421; 0.323; 0.136; 0.139 соответственно, в то время как для нечётных, $\ell = 2n+1$, $n = 1,...,4$ — $K_n^{\rm odd} = 0.908$; 0.732; 0.732; 0.686. Таким образом, видно, что сигнал после восстановления октупольной других нечётных компонент характеризуется высоким уровнем корреляции с фоном. Другая важная характеристика — величина корреляции остаточной карты (полученной как разность между входной и выходной картами) с входной. Для чётных мультиполей, $\ell = 2n$, $n = 1,...,5$, коэффициенты $K_n^{\rm even} = -0.218$; -0.458; 0.0152; -0.223; -0.130 соответственно, а для нечётных мультиполей, $\ell = 2n+1$, $n = 1,...,4$ — $K_n^{\rm odd} = -0.172$; -0.116; -0.128; -0.011.

Кроме того, описанный подход проверки стабильности восстановления сигнала CMB выявил [93] ещё одну важную особенность метода разделения компонент ILC, имеющую отношение к проблеме квадруполя. Используем те же 10000 входных и выходных карт и рассмотрим квадрупольную моду $a_{2,0}$, применив эстиматор $S = s_{2,0}^{\rm in} s_{2,0}^{\rm out}$, где $s_{2,0}^{\rm in,out} = +1$ или -1 для положительно или отрицательного знака амплитуды $a_{2,0}^{\rm in,out}$ соответственно (индексы in и out относятся к входной и выходной картам). При правильном восстановлении сигнала должно быть $S = +1$. Тем не менее значение $S = -1$ получается для 2148 карт 10000 реализаций. Можно предположить, что такой сильный эффект вызван изменением знака с просочившимся фоновым сигналом. Действительно, у всех фоновых компонент во всех частотных каналах K–W миссии WMAP знак $a_{2,0}^{\rm f}$ отрицателен, $s_{2,0}^{\rm f} = -1$. Если такое предположение верно, то сильное влияние фона на обсуждаемую характеристику существует для 43% реализаций, у которых $s_{2,0}^{\rm in} = +1$. Заметим, что гармоники с чётным значением $\ell + m$ являются особенно сложными для восстановления, с учётом того, что наиболее мощная часть фоновых компонент сконцентрирована в плоскости Галактики,а она даёт в основном вклад в моды с чётным значением $\ell + m$. Любопытно также отметить, что силовое изменение знака в квадрупольной компоненте меняет форму восстановленного квадруполя и решает проблему существования “Оси зла” [91]; в этом отношении такая процедура аналогично модифицированных методам разделения компонент [101].

5. МОЗАИЧНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

В работах [118,119] предложен мозаичных корреляционный метод анализа распределённого сигнала, позволяющий обнаружить и исследовать возможное остаточное влияние фоновых компонент (как протяжённых, так и определяемых точечными источниками) как возможной причины негауссовости в заданных областях при заданном угловом масштабе. Метод реализован в пиксельном параметрическом пространстве. На основе исследования двух карт с достаточно высоким разрешением и одинаковым разбиением небесной сферы на пикселы — карты температуры $\Delta T(\theta_i, \phi_i)$ и карты фонового излучения $S(\theta_i, \phi_i)$, где i — номер пиксела, — строится мозаичная корреляционная карта с более низким разрешением, каждый пиксел которой (назовём его M-пикселом) содержит некоторое число пикселов исходных карт. M-пикселу с номером p ($p = 1,2,...,N_0$, где N_0 — полное число M-пикселов на сфере) присваивается значение коэффициента корреляции между областями двух исследуемых карт более высокого разрешения, покрываемыми этим M-пикселом. Иначе говоря, рассчитывается корреляционный коэффициент двух карт внутри телесного угла Ξ_p, стягивающего данных M-пиксел. Телесные углы Ξ_p выбираются одинаковыми и равными Ξ для всех M-пикселов; значение Ξ (величина корреляционного окна) определяет угловой масштаб, на котором изучается корреляция. Полный корреляционный коэффициент для двух исходных карт на угловом масштабе Ξ имеет вид

$$K(\Xi) = \frac{1}{\sigma_{\Delta T_p}\sigma_{S_p}} \times \\ \times \sum_p \sum_{(\theta_i,\phi_i)\in\Xi_p} (\Delta T(\theta_i,\phi_i) - \overline{\Delta T(\Xi_p)}) \times \\ \times (S(\theta_i,\phi_i) - \overline{S(\Xi_p)}) \quad (16)$$

где $\sigma^2_{\Delta T_p}$ и $\sigma^2_{S_p}$ — соответствующие дисперсии.

Данный метод позволяет проверить качество разделения компонент CMB при многочастотных наблюдениях в предположении, что корреляция случайного гауссова сигнала реликтового излучения с фоновыми компонентами должна быть минимальной. Присутствие остаточного коррелированного сигнала в данных CMB может привести к систематическим ошибкам в определении углового спектра мощности в разных диапазонных муль-

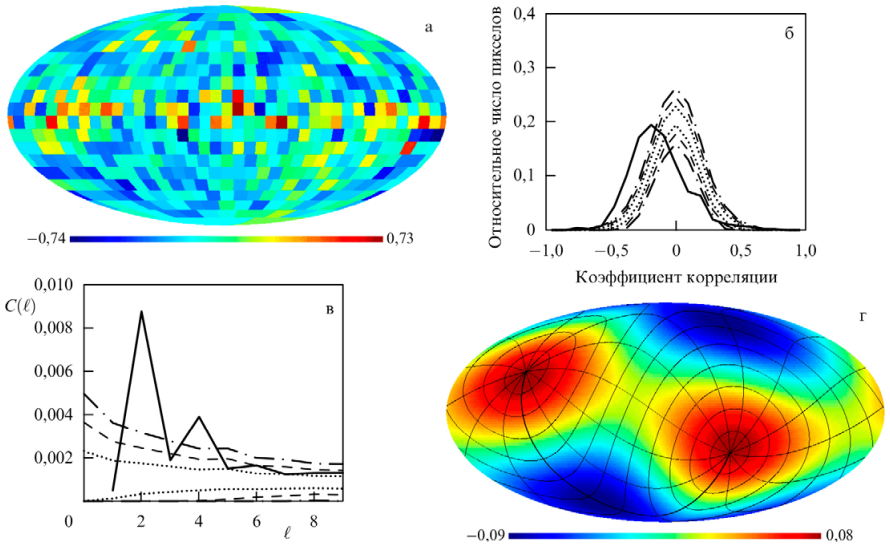


Рис. 10. Результаты мозаичной корреляции карт CMB ILC WMAP и фонового излучения пыли в канале W с корреляционным окном $\Xi_p = 540' \times 540'$. (а) Мозаичная карта M_c. (б) Гистограмма распределения пикселов по корреляционным коэффициентам карты M_c (сплошная кривая). (в) Угловой спектр мощности карты M_c. (г) Карта квадрупольной компоненты сигнала M_c с наложенной сеткой экваториальной системы координат. Пунктирная, штриховая и штрихпунктирная линии на рис. б и в обозначают соответственно уровни разработк $\pm1\sigma$, $\pm2\sigma$ и $\pm3\sigma$ в модельных мозаичных картах корреляций, рассчитанных для 200 случайных гауссовых полей в космологической модели ΛCDM. (См. также [118, 119].)

типолей [93, 115] и, как следствие, к уменьшению точности определения космологических параметров. Применив различные корреляционные окна, можно увидеть, что в распределении корреляционных коэффициентов карт WMAP ILC и фонового излучения пыли в случае корреляционного окна $\Xi = 540' \times 540'$ имеется сдвиг величиной -0.26 относительно ожидаемого нулевого значения, получаемого при моделировании с учётом гауссова сглаживания в окне радиусом 1°и маскирования области Галактики. Это проиллюстрировано на рис. 10, где приведены результаты мозаичной корреляции карт WMAP и фонового излучения пыли (см. детали в [119]). Кроме собственно сдвига в распределении пикселов по корреляционным коэффициентам, обращает на себя внимание значительное искажение формы этого распределения. Медианы распределения пикселов мозаичных карт для корреляционных масштабов $160'$, $300'$ и $540'$ равны соответственно -0.219, -0.233 и -0.274. Интересно отметить, что сдвиг в распределении пикселов карт корреляций подобен сдвигу, возникающему при статистически нестабильном восстановлении сигнала ILC в квадрупольной компоненте [93].

Результаты применения данного метода к картам CMB WMAP и пыли показывают существование значительного сигнала в квадрупольной компоненте мозаичной карты, приводящего к появлению пика в угловом спектре мощности. Этот пик отсутствует в случае вычисления корреляций карты симулированных гауссовых возмущений с распределением излучения пыли. Положение пятен на карте квадруполя говорит о присутствии сигнала, связанного не только с эклиптической, но и с экваториальной системой координат, что наблюдается также при использовании других методов [120, 121].

6. МУЛЬТИПОЛЬНЫЕ ВЕКТОРЫ

Уже в работе [90] была отмечена корреляция направлений, задаваемых квадрупольной и октупольной компонентами CMB (рис. 11). Простое количественное описание этого явления состоит в на-

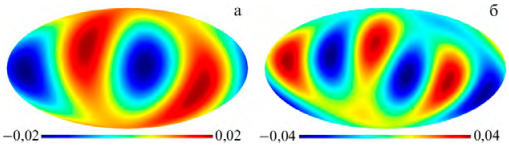


Рис. 11. Форма квадруполя (а) и октуполя (б) на карте WMAP ILC по данным седьмого года наблюдений.

хождении отдельно для квадруполя и октуполя единичного вектора $\hat{\mathbf{n}}$, проекция углового момента на который имеет максимальную дисперсию. А именно, рассмотрим вклад мультиполей с заданны ℓ в анизотропию температуры CMB:

$$\Delta T_\ell(\theta,\phi) = \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi), \qquad (17)$$

и построим дисперсия — функцию направления $\hat{\mathbf{n}}$:

$$\langle \Delta T_\ell(\hat{\mathbf{n}}\mathbf{L})^2 \Delta \mathrm{T}_\ell \rangle = \sum_{m=-\ell}^{\ell} m^2 |\mathrm{a}_{\ell m}(\hat{\mathbf{n}})|^2 \qquad (18)$$

где $\mathbf{L}$ — оператор углового момента, угловые скобки обозначают усреднение по небесной сфере, коэффициенты $a_{\ell m}(\hat{\mathbf{n}})$ вычисляются в системе координат, третья ось которой совпадает с $\hat{\mathbf{n}}$. Используя данные первого года наблюдений миссии WMAP, авторы работы [90] нашли, что векторы, определяющие максимумы дисперсии для квадруполя и октуполя, весьма близки:

$$\hat{\mathbf{n}}_2 = (-0.1145, -0.5265, 0.5424),$$
$$\hat{\mathbf{n}}_3 = (-0.2578, -0.4207, 0.8698).$$

Скалярное произведение этих векторов, которое могло бы быть любым числом из интервала (0,1) (дисперсия (18) не изменяется при изменении знака $\hat{\mathbf{n}}$, поэтому произведение $\hat{\mathbf{n}}_2\hat{\mathbf{n}}_3$ можно считать положительным):

$$\hat{\mathbf{n}}_2\hat{\mathbf{n}}_3 = 0.9838.$$

Вероятность такого совпадения для гауссовой карты авторы работы [90] оценили как $1/60$.

Для более подробного изучения вопроса о сосности мультиполей Копи с соавторами [122, 123] предложили использовать формализм мультипольных векторов, впервые введённых Максвелом [124], и продемонстрировали его инструментарий для исследования анизотропии реликтового излучения на больших масштабах. Среди свойств этих векторов можно отметить их независимость от выбора системы координат, что делает их применимыми для проверки нулевой гипотезы о статистической изотропии, а также для поиска направлений на небе на которых может проявляться негауссовость, обусловленная различными причинами: нестандартной физикой, наличием систематических ошибок, остаточным влиянием фоновых компонент, топологией Вселенной и т.п. [94].

Следуя Копи и др. [123], вклад мультиполей с заданным значением ℓ в анизотропию температуры CMB можно представить в эквивалентном формуле (17) виде

$$\Delta T(\theta,\phi) = \sum_{i_1,\ldots,i_\ell} K_{i_1,\ldots,i_\ell} e_{i_1}(\theta,\phi)\ldots e_{i_\ell}(\theta,\phi),$$

где пространственные индексы i_α пробегают значения от 1 до 3, $\mathbf{e}(\theta,\phi) = (\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi, \cos\theta)$ — единичный трёхмерный вектор в направлении (θ,ϕ) на сфере, $K_{i_1,\ldots,i_\ell}$ — бесследовый симметричный вещественный тензор ранга ℓ в трёхмерном пространстве. Этот тензор, как и набор амплитуд $a_{\ell m}$, имеет $2\ell+1$ независимых вещественных компонент. Идея состоит в том, чтобы записать этот тензор в виде комбинации ℓ единичных вещественных трёхмерных векторов $\mathbf{v}^{(\ell,\alpha)}$, $\alpha = 1,\ldots,\ell$ (всего 2ℓ независимых компонент) и общей амплитуды A_ℓ:

$$K_{i_1,\ldots,i_\ell} = A_\ell \left[v_{i_1}^{(\ell,1)} \ldots v_{i_\ell}^{(\ell,\ell)} \right]_{\mathrm{TF}},$$

где $[\ldots]_{\mathrm{TF}}$ обозначает выделение симметричной бесследовой части. Известно, что такое представление существует и является единственным, поэтому набор единичных векторов $\mathbf{v}^{(\ell,\alpha)}$ вместе с амплитудой A_ℓ полностью характеризуют мультипольную компоненту $\Delta T_\ell(\theta,\phi)$. Отметим, что векторы $\mathbf{v}^{(\ell,\alpha)}$ определяются с точностью до знака, так как изменение знака каждого из этих векторов может быть компенсировано изменением знака амплитуды A_ℓ. Отметим также, что мультипольные векторы не зависят от полной мощности $_\ell$ мультиполей температуры с фиксированным ℓ : $\mathrm{a}_{\ell m}$ при заданном ℓ домножаются на общий множитель, что величина A_ℓ также будет умножена, а $\mathbf{v}^{(\ell,\alpha)}$ останутся неизменными. В частности, если использовать величину $\tilde{a}_{\ell m} = a_{\ell m}/\sqrt{C_\ell}$, то мультипольные векторы $\mathbf{v}^{(\ell,\alpha)}$ будут зависеть только от $\tilde{a}_{\ell m}$, но не от C_ℓ. В этом смысле мультипольные векторы несут информацию, дополнительную к той, которая закодирована в угловом спектре мощности. И на это не влияют какие-либо предположения о гауссовости и статистической изотропии.

Сравнительно простой алгоритм нахождения мультипольных векторов предложен в работе [122], где исходя из известных коэффициентов $a_{\ell m}$ проводится их построение с применением стандартного гармонического разложения. Полные выкладки и рекуррентные формулы для нахождения $\mathbf{v}^{(\ell,\alpha)}$ в таком подходе приведены в [122]. Имеется также открытый программный код[4].

Копи и др. [94, 123] ввели также векторы площади

$$\mathbf{w}^{(\ell,\alpha\beta)} = \mathbf{v}^{(\ell,\alpha)} \times \mathbf{v}^{(\ell,\beta)}$$

Эти векторы ортогональный плостостям ℓ-го мультиполя, в которых лежат пары векторов $(\mathbf{v}^{(\ell,\alpha)}, \mathbf{v}^{(\ell,\beta)})$, и также определены с точностью до знака. Для квадруполя имеется два мультипольных вектора, $\mathbf{v}^{(2,1)}$ и $\mathbf{v}^{(2,2)}$, и всего один вектор

[4] `http://www.phys.cwru.edu/projects/mpvectors/`

площади $\mathbf{w}^{(2,12)}$; октуполь характеризуется тремя мультипольными векторами и тремя векторами площади.

Наблюдение, сделанное в работах [94, 123], состоит в том, что плоскости квадруполя и октуполя близи друг к другу, т.е. направления векторов $\mathbf{w}^{(2,12)}$, $\mathbf{w}^{(3,12)}$, $\mathbf{w}^{(3,13)}$ и $\mathbf{w}^{(3,23)}$ скоррелированы на уровне достоверности более 99%. Точнее, вектор $\mathbf{w}^{(2,12)}$ лежит почти посередине между тремся векторами $\mathbf{w}^{(3,12)}$, $\mathbf{w}^{(3,13)}$ и $\mathbf{w}^{(3,23)}$, а для скалярных произведений из результатов работы [94] следует (использовались данные трёх лет работы миссии WMAP):

$$\frac{\mathbf{w}^{(2,12)}\mathbf{w}^{(3,12)}}{|\mathbf{w}^{(2,12)}||\mathbf{w}^{(3,12)}|} = 0.858,$$

$$\frac{\mathbf{w}^{(2,12)}\mathbf{w}^{(3,13)}}{|\mathbf{w}^{(2,12)}||\mathbf{w}^{(3,13)}|} = 0.804,$$

$$\frac{\mathbf{w}^{(2,12)}\mathbf{w}^{(3,23)}}{|\mathbf{w}^{(2,12)}||\mathbf{w}^{(3,23)}|} = 0.872.$$

Все эти величины близки к единице, что и означает соосность квадруполя и октуполя. Отметим, что векторы октуполя $\mathbf{w}^{(3,12)}$, $\mathbf{w}^{(3,13)}$ и $\mathbf{w}^{(3,23)}$ сами по себе близки друг к другу ("плоскостность" октуполя).

Кроме того, все четыре вектора площадей скоррелированы с плоскостью эклиптики, а также (на уровне достоверности более 95%) с направлением диполя и положением точек равноденствий. Всё это выглядит как противоречие с предположением о гауссовой и статистически изотропной карте ILC.

7. КВАДРУПОЛЬНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ

Некоторые модели инфляции с векторными полями предсказывают, что первичные скалярные возмущения являются гауссовыми, но статистически анизотропными. Это означает, что их спектр мощности зависит не только от длины волнового вектора, но и от его направления $\hat{\mathbf{k}} = \mathbf{k}/\mathrm{k}$,

$$\langle \Phi(\mathbf{k})\Phi^*(\mathbf{k}')\rangle = \mathrm{P(k)}\delta(\mathbf{k}-\mathbf{k}')[1+\mathrm{g(k},\hat{\mathbf{k}})]. \qquad (19)$$

В частности неплохо мотивированной является зависимость [25–28]

$$g(k,\hat{\mathbf{k}}) = \mathrm{g}_0(\hat{\mathbf{k}}\hat{\mathbf{N}})^2 \qquad (20)$$

где $\hat{\mathbf{N}}$ — некоторый фиксированный единичный вектор, постоянный в пространстве, g_0 — константа. Модели, основанные на конформной инвариантности, предсказывают статистическую анизотропию более общего вида [56,57]. Статистическая анизотропия вида (19) проявлялась бы в сигнале CMB как отличие от нуля корреляторов мультиполей с разными значениями (ℓ, m) (ср. с формулой (6), верной для статистически изотропных возмущений),

$$\langle a_{\ell m} a^*_{\ell' m'}\rangle \neq 0 \text{ при } \ell \neq \ell' \text{ и/или } m \neq m'.$$

Метод поиска этого эффекта разработан в [125, 126].

Статистическая анизотропия в форме (20) действительно была обнаружена в данных CMB WMAP [126–128] (см. также [69]). При этом

$$g_0 = 0.29 \pm 0.03,$$

т.е. сигнал является большим по амплитуде и статистически значимым. Однако направление вектора $\hat{\mathbf{N}}$, а именно $(b,l) = (30°,96°)$, оказалось близким к нормали к плоскости эклиптики. Последнее обстоятельство служит серьёзным указанием на то, что источником эффекта являются систематические погрешности. Наиболее вероятным объяснением здесь представляется асимметрия диаграммы направленности приёмников WMAP [127] (впрочем, Гронебоом и др [128] не согласны с такой интерпретацией).

8. ФУНКЦИОНАЛЫ МИНКОВСКОГО

Функционалы Минковского [129] представляют собой эффективный метод для исследования морфологии совокупности областей в пространстве (в случай CMB — областей на небесной сфере). Эти функционалы активно применяют для изучения статистики сигнала. Исторические аспекты и алгоритмические детали этого метода описаны в книге [48]. Кратко отметим, что в космологии трёхмерная версия метода применялась ещё в 1990-х годах при изучении распределения объектов во Вселенной [130,131]. Идея использовать морфологические характеристики карты для описания статистических свойств анизотропии сигнала CMB была описана и развита в целом ряде работ [48, 132–138].

В качестве рассматриваемой величины удобно выбрать не саму температуру, а поле с единичной дисперсией

$$\nu(\theta,\phi) = \frac{\Delta T(\theta,\phi)}{\sigma_0}$$

где σ_0 — дисперсия флуктуаций температуры,

$$\sigma_0^2 = \langle \Delta T^2\rangle = \frac{1}{4\pi}\sum_\ell (2\ell+1)C(\ell), \qquad (21)$$

угловые скобки, как и ранее, обозначают усреднение по небесной сфере. Зафиксируем некоторое значение ν, и для данной карты построим все связные области $R_i(\nu)$ на единичной небесной сфере, внутри которых $\nu(\theta,\phi) > \nu$. Вообще говоря, области $R_i(\nu)$ не являются односвязными, т.е. в них могут быть дыры (а внутри этих дыр в свою очередь могут быть области с $\nu(\theta,\phi) > \nu$, которые тоже нужно включить в набор $R_i(\nu)$. Теперь можно определить три глобальных (т.е. относящихся ко всей сфере) функционала Минковского:

1) нормированную площадь
$$A(\nu) = \frac{1}{4\pi}\sum_i A[R_i(\nu)],$$
где $A[R]$ — площадь области R;
2) нормированную полную длину изолиний
$$L(\nu) = \frac{1}{4\pi}\sum_i L[R_i(\nu)],$$
где $L[R]$ — длина границы области R;
3) генус $G(\nu)$ — разность числа связных областей с $\nu(\theta,\phi) > \nu$ и числа связных областей $\nu(\theta,\phi) < \nu$ (эквивалентной генусу величиной является эйлерова характеристика).

Замечательно, что эти три функционала полностью описывают морфологию набор областей $R_i(\nu)$ (в d-мерном пространстве имеется $d+1$ таких функционалов). Аналогичным образом можно определить три локальных функционала Минковского, относящихся не ко всей сфере, а к её отдельной части.

При анализе CMB часто в месте негуса используют другую характеристику:
$$\tilde{G}(\nu) = N_{\max}(\nu) + N_{\min}(\nu) - N_{\rm sad}(\nu)$$
где $N_{\max}(\nu)$, $N_{\min}(\nu)$ и $N_{\rm sad}(\nu)$ — соответственно числа максимумов, минимумов и седловых точек функции $\nu(\theta,\phi)$, лежащих внутри всех областей $R_i(\nu)$. Для сферы $G(\nu) = \tilde{G}(\nu) - 1$.

Глобальные функционалы Минковского для гауссова поля вычисляются аналитически. На плоскости нормированные функционалы выражаются в виде [48]
$$\begin{aligned} A(\nu) &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\Phi\left(\frac{\nu}{\sqrt{2}}\right), \\ L(\nu) &= \frac{1}{8\theta_c}\exp\left(-\frac{\nu^2}{2}\right), \\ G(\nu) &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2}}\frac{1}{\theta_c^2}\exp\left(-\frac{\nu^2}{2}\right), \end{aligned} \qquad (22)$$
где
$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-x^2)\mathrm{dx}$$
— функция ошибок, θ_c — корреляционная длина поля, определяемая как
$$\theta_c^{-1} = \sqrt{\frac{\langle(\bigtriangledown\Delta T)^2\rangle}{\langle\Delta T^2\rangle}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_0},$$
σ_1 — дисперсия градиента температуры,
$$\sigma_1^2 = \frac{1}{4\pi}\sum_\ell \ell(\ell+1)(2\ell+1)C(\ell). \qquad (23)$$
Таким образом, поиск отклонений от гауссовости можно вести на основе проверки выполнения соотношений типа (22).

Функционалы Минковского использовались для проверки гауссовости данных WMAP. Эриксен и др. [85] применили три функционала, описанных выше, а также ряд других характеристик для анализа карты CMB WMAP первого года наблюдений миссии и сравнили результаты с данными моделирования гауссовых возмущений с учётом шумового сигнала WMAP. Авторы [85] обнаружили, что при анализе всей сферы на угловых масштабах межу 1°и 4°все виды статистики в общем согласуются с предположением о гауссовости сигнала CMB. В то же время было продемонстрировано, что свойства CMB, приходящего из северной и южной галактических полусфер, сильно различаются. Статистика сигнала из из южной полусфера на исследованных угловых масштабах 1°– 4°в целом согласуется с гипотезой о гауссовости, тогда как для северной полусферы наблюдается ряд особенностей. Если функционалы площади и длины $A(\nu)$ и $L(\nu)$ вполне вписываются в гипотезу о гауссовости, то генус на северной полусфере превышает ожидаемый на всех угловых масштабах, а на масштабе 3,4°его амплитуда настолько велика, что ли одна из 5000 реализаций имеет большую амплитуду для отрицательных значений порогов ν. Кроме того, используя статистику, введённую в работу [139] (длина скелетной линии), и другие статистики, авторы [85] нашли значения параметра
$$\gamma = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0\sigma_2},$$
где σ_0 и σ_1 — дисперсия температуры и её градиента, определённые в (21) и (23), σ_2 — дисперсия производных второго порядка, которая определяется вполне аналогично. Параметр γ на северной полусфере более чем в 99% симуляций превышал ожидаемое значение, в то время как для южной полусферы подобный эффект отсутствовал. Отметим, что Парк [84] ещё до опубликования работы Эриксена и др. [85] сообщил об асимметрии между амплитудами генуса на северной и южной полусферах. Однако результаты Парка были получены для значительно меньших угловых масштабов,

чем в [85], так что прямую связь между этими двумя группами результатов установить трудно. В любом случае исследование генуса Минковского продемонстрировало, что гауссова модель флуктуаций сталкивается с проблемами при описании данных WMAP на больших и средних угловых масштабах.

Функционалы Минковского применялись и для оценок параметра $f_{\rm NL}$ [140] в модели негауссовых первичных возмущений, описываемой формулой (8). С этой целью авторы генерировали карты CMB в рамках данной модели и рассматривали их отличие от карт, рассчитанных в модели с гауссовыми первичными неоднородностями (в действительности, как подчёркивают авторы, при не слишком больших значения $f_{\rm NL}$ выражения для функционалов Минковского в негауссовой модели могут быть с хорошей точностью получены аналитически). Авторами также учитывались различные наблюдательные эффекты, осложняющие ситуацию, такие как функция окна пиксела, "замазывание" диаграммной направленности, неоднородный шум, экранирующие маски на картах и др. Исходя из известного поведения функционалов Минковского на различных масштабах и для различного уровня негауссовости в модельных картах, авторы работы [140] получили ограничения на уровень негауссовости на основе данных WMAP третьего года миссии, а именно, они получили оценку $-70 < f_{\rm NL} < 91$ на уровне достоверности 95% из карт, скомбинированных из данных каналов Q+V+W миссии WMAP, сглаженных гауссовым фильтром на масштабах $10'$, $20'$ и $40'$. Для комбинации карт V+W была получена смещённая в область отрицательных значений оценка $-108 < f_{\rm NL} < 64$, отличающаяся, например, от смещённых в область положительных значений пределов $f_{\rm NL}$, найденных в работе [141] для тез же данных с помощью биспектра, $27 < f_{\rm NL} < 147$.

9. СФЕРИЧЕСКИЕ ВЕЙВЛЕТЫ

9.1. Негауссов эксцесс

Среди первых работ по поиску негауссовости в данных CMB WMAP имеется блок исследований, основанных на методике анализа с помощью вейвлетов [83, 142]. Первые попытки использования этой техники для поиска негауссовых особенностей предпринимались в 1990-х годах для данных COBE-DMR (COsmic Background Explorer — Differential Microvave Radiometer) [143] с помощью вейвлетов Добеши (Daubechies), позднее — с помощью сферических вейвлетов Хаара (Spherical Haar Wavelet — SHW) [144]. Особенно чувствительными к проявлениям негауссовости являются сферические вейвлеты типа "мексиканская шляпа" (Spherical Mexican Hat Wavelet — SMHW) [145–147].

SMHW может быть построен с помощью евклидова вейвлета типа "мексиканская шляпа" (Mexican Hat Wavelet — MHW) с применением стереографической проекции, предложенной в [148]. SMHW зависит от трёх параметров: общего масштаба R и координат (θ, ϕ) точки на сфере, играющей роль полюса, относительно которого осуществляется стереографическая проекция. Для каждого выбора центра вейвлета удобно ввести новую (координаты которой будем помечать штрихами) систему координат, в которой центр является северным полюсом. Тогда явный вид вейвлета SMHW выражается как

$$\Psi_{\rm s}(y,R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}N(R)}\times$$
$$\times \left[1+\left(\frac{y}{2}\right)^2\right]^2 \left[2-\left(\frac{y}{R}\right)^2\right] \exp\left(-\frac{y^2}{2R^2}\right), \quad (24)$$

$N(R)$ — нормировочный множитель,

$$N(R) = R\left(1+\frac{R^2}{2}+\frac{R^4}{4}\right)^{1/2}. \quad (25)$$

Расстояние на касательной плоскости задаётся величиной y, которая соотносится с полярным углом как

$$y = 2\tan\frac{\theta'}{2},$$

где θ' — полярный угол в штрихованной системе координат. Разложение флуктуаций температуры по вейвлетам имеет стандартный вид:

$$w(R;\theta,\phi) = \int \sin\theta' {\rm d}\theta' {\rm d}\phi' \Psi_{\rm s}({\rm R};\theta')(\theta',\phi'),$$

где предполагается, что температура пересчитана в штрихованную систему координат (именно поэтому w зависит от θ и ϕ). На практике для каждого масштаба R выбирают конечное число центров вейвлетов, т.е. ограничиваются конечным числом коэффициентов вейвлетного разложения $w_i(R) \equiv w(R;\theta_i,\phi_i), i = 1,...,N_R$.

Коэффициенты вейвлетного разложения $w_i(R)$ линейным образом выражаются через флуктуации температуры. Поэтому для гауссова сигнала CMB эти коэффициенты также должны иметь гауссову статистику. Для поиска отклонений от гауссовости на заданном масштабе R можно определить несколько величин. Виелва и др. [83] использовали два простых эстиматора негауссовости: коэффициенты асимметрии (skewness) $S(R)$ и эксцесса (kurtosis) $K(R)$:

$$S(R) = \frac{1}{N_R}\sum_{i=1}^{N_R}\frac{w_i^3(R)}{\sigma^3(R)}, \quad (26)$$

$$K(R) = \frac{1}{N_R}\sum_{i=1}^{N_R}\frac{w_i^4(R)}{\sigma^4(R)} - 3, \qquad (27)$$

где N_R — число вейвлетных коэффициентов на масштабе R, $\sigma(R)$ — дисперсия вейвлетных коэффициентов на этом масштабе:

$$\sigma^2(R) = \frac{1}{N_R}\sum_{i=1}^{N_R} w_i^2(R). \qquad (28)$$

Используя данных подход, авторы [83] получили избыток эксцесса $K(R)$ на двух последовательны масштабах, $R_8 = 4{,}17°$ и $R_9 = 5°$, в данных CMB WMAP. Величина эксцесса $R_8 = 4{,}17°$ реализуется только в 40 случаях из 10000 при моделировании методом Монте-Карло, что авторы принимают как показатель негауссовости карты WMAP. Аналогичный результат справедлив и для масштаба R_9. Виелва и др. обнаружили негауссов сигнал во всём частотном диапазоне миссии WMAP (от 23 ГГц до 94 ГГц) и продемонстрировали его частотную независимость. Также было показано, что после добавления загрязняющего сигнала в виде переоценённого фона к модельным гауссовым картам CMB, негауссов сигнал не обнаруживается. Исходя из последнего факта, авторы [83] заключают, что добавление галактического фона к моделям CMB не приводит к возникновению негауссовости при поиске с помощью вейвлет-анализа и галактические фоновые компоненты не являются источником обнаруженной негауссовости карты ILC CMB. Кроме того, в результате применения метода показано, что сигнал на северной полусфере соответствует гауссовой модели, в то время как на южной полусфере, также как и на полной сфере, в данных CMB наблюдается негауссовость.

9.2. Холодное пятно

Применяя вейвлеты типа SMHW, Круз и др. [142] выделили в микроволновом фоне холодную область (рис. 12), имеющую сложную структуру. Наличием этой области они и объясняют негауссовость сигнала на южной полусфере. Галактические координаты области, названной Холодным пятном (Cold Spot — CS), следующие: $b = -57°$, $l = 209°$. Вероятность соответствия гауссовой модели распределения сигнала при использовании SMHW составляет около 0.2 % [142]. Частотная зависимость сигнала в области CS аналогична другим пятнам CMB. Авторы также обнаружили, что в случае удаления данной зоны при SMHW-анализе оставшийся массив данных соответствует гауссовых предположениям.

Следует отметить, впрочем, что выводы Круза и др. [142] критиковались Жангом и Хутерером

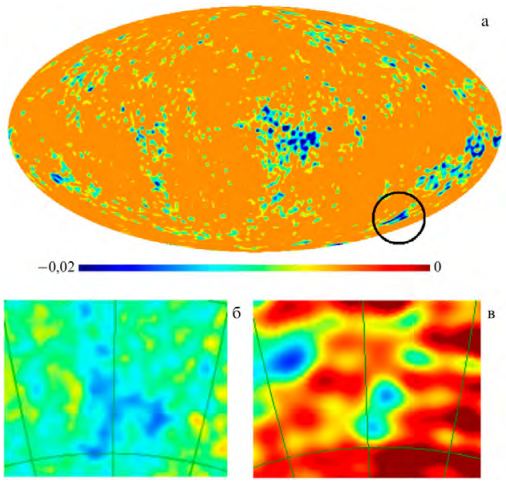


Рис. 12. (а) Положение негауссова Холодного пятна на сфере в галактических координатах. (б) Холодное пятно на карте ILC WMAP крупным планом. (в) Зона Холодного пятна на карте в частотном канале 408 МГц 1982г. [149].

[150] на основании того, что использование весовых функций, отличающихся от SMHW (в частности, гауссовых весов с изменяемой шириной), не приводит к обнаружению негауссовости сигнала. Таким образом, вопрос о статистической значимости CS до конца не решён.

После получения указания на негауссовость сигнала в Холодном пятне, а также сообщения о пониженной плотности источников [151] в сглаженных картах радиообзора NVSS (NRAO (National Radio Astronomy Obsevatory) VLA (Very Large Array) Sky Survey) [152] (которая также, однако, вызвала сомнения [153]) было выдвинуто несколько гипотез о происхождении Холодного пятна, связанных с гигантским эффектом Сакса – Вольфа [151], топологическим дефектом [39], артефактом анализа данных [154], простым случайным отклонением [155, 156]. Отметим, что такое пятно на карте CMB WMAP не уникально [154, 155], а его свойства определяются в основном низкими гармониками ($2 \le \ell \le 20$). Статистика внегалактических объектов в области CS в разных диапазонах длин волн в рамках погрешности не отличается от статистики других областей в данной полосе галактических широт [157]. Имеются и другие пятна, негауссовы свойства которых также определяются низкими ℓ [158]. Кроме того, следует отметить другой интересный, приведенный в [154], момент, заключающийся в том, что CS обнаруживается и в данных 1082 г. на картах низкочастотного обзора (408 МГц) [149] (см. рис. 12), где большой вклад в фон даёт синхротронное излучение.

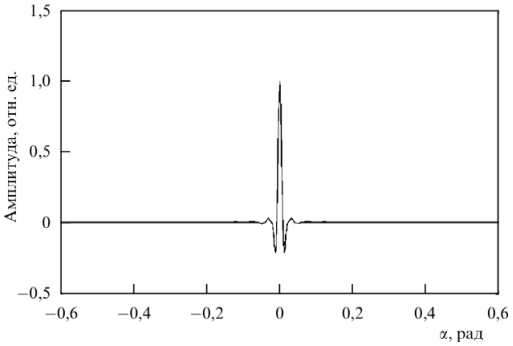


Рис. 13. Пример нидлета с $B = 2$ и $j = 8$ в пиксельном пространстве [162]; α — угол выноса из максимума функции.

9.3. Нидлеты

В заключение этого раздела упомянем о втором поколении сферических вейвлетов — нидлетах, которые были введены в функциональный анализ в работах [159, 160] (рис. 13). Сферический нидлет определяется как [161]

$$\psi_{jk}(\theta,\phi) = \sqrt{\lambda_{jk}}\times \\ \times \sum_{\ell} b\left(\frac{\ell}{B^j}\right) \sum_{m=-\ell}^{\ell} Y^*_{\ell m}(\theta,\phi) Y_{\ell m}(\theta_k,\phi_k). \quad (29)$$

где (θ,ϕ) — координаты на сфере, j — номер нидлет-гармоники, λ_{jk} — нормировочный множитель. Точки (θ_k,ϕ_k) — вершины нидлетов — могут быть совмещены с центрами пикселов в заданной схеме пикселизации. Число B задаёт такой базис нидлетов, в который включены только мультиполи из диапазона $\ell \in [B^{j-1}, B^{j+1}]$, т.е. функция $b(\ell/B^j)$ соответствует функции окна и равняется нулю вне диапазона $[B^{j-1}, B^{j+1}]$ [162].

Подход с нидлетами использовался для оценки первичной негауссовости, характеризуемой параметром $f_{\rm NL}$, с помощью нидлет-биспектра [161]. Преимущество такого подхода над обычным подходом, использующим гармонический биспектр (7), состоит в более адекватной работе с областями, закрытыми маской. Оценка величины $f_{\rm NL}$, полученная в работе [161] с учётом влияния точечных источников: $f_{\rm NL} = 84 \pm 40$.

10. УГЛОВОЙ СПЕКТР МОЩНОСТИ

Одним из замечательных проявлений негауссовых свойств карты CMB WMAP является асимметрия чётности, на которую обратили внимание Ким и Насельский [97]. Простота предложенного ими подхода связана с возможностью использования лишь углового спектра мощности CMB C_ℓ, без привлечения карт и индивидуальных гармоник $a_{\ell m}$. Для гауссова случайного поля первичных возмущений $\Phi(\mathbf{k})$ с плоским спектром мощности ожидается наличие плато в угловом спектре мощности CMB на низких мультиполях, обусловленного эффектом Сакса–Вольфа, а именно $\ell(\ell+1)C_\ell \approx \text{const}$. Сферические гармоники при отражении координат изменяются как $Y_{\ell m}(\hat{\mathbf{n}}) = (-1)^\ell Y_{\ell m}(-\hat{\mathbf{n}})$. Поэтому асимметрия в угловом спектре мощности для чётных и нечётных гармоник может рассматриваться как асимметрия мощности чётных и нечётных компонент карт. Авторы [97] обнаружили, что мощность нечётных мультиполей систематически превышает мощность чётных при небольших ℓ, и назвали этот феномен "асимметрией чётности". Для того чтобы количественно описать такую асимметрию, предлагается рассмотреть следующие величины:

$$P^+ = \sum_{\text{Чётные } \ell<\ell_{\max}} \frac{\ell(\ell+1)C_\ell}{2\pi},$$

$$P^- = \sum_{\text{Нечётные } \ell<\ell_{\max}} \frac{\ell(\ell+1)C_\ell}{2\pi}.$$

Используя данные спектра мощности WMAP и результаты моделирования методом Монте-Карло, авторы [97] рассчитали отношения P^+/P^- для диапазонов мультиполей $2 \le \ell \le \ell_{\max}$, где $\ell_{\max}$ лежит между 3 и 23. Сравнивая P^+/P^- для данных WMAP с аналогичным отношением, полученным для модельных карт, можно оценить величину p, равную доле модельных спектров, в которых значение P^+/P^- меньше или равно значению для карты WMAP. Было обнаружено, что нижней границы p достигает при $\ell_{\max} = 18$, где p равняется 0.004 и 0.001 для данных пяти и трёх лет наблюдений миссии WMAP соответственно. Этот факт означает, что существует предпочтение для нечётных мультиполей ($2 \le \ell \le 18$) в данных WMAP на уровне достоверности 99,6% с наложенной экранирующей маской в данных и 99,76% — без маски. Авторы предполагают, что низкая амплитуда квадруполя CMB WMAP может быть частью той же аномалии, что и асимметрия чётности. С учётом асимметрии мощности сигнала CMB на северной и южной полусферах. сильнее проявляющейся на мультиполя с $2 \le \ell \le 19$, чем на мультиполях с $20 \le \ell \le 40$[86], авторы [97] также предполагают общее происхождение аномалий в области малых ℓ (таких, как асимметрия мощности на полусферах, низкая амплитуда квадруполя и асимметрия чётности), которое может иметь как космологическое объяснение, так и объяснение, связанное с наличием систематических ошибок в наблюдениях, не выявленных и/или дополнительно внесённых при анализе данных миссии WMAP.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы описали некоторые тексты, интенсивно используемые в последнее десятилетие для поиска и изучения негауссовости и статистической анизотропии данных CMB, имеющих различную природу.

Необходимо сделать несколько общих замечаний относительно описанных методов.

- Как было показано для различных диапазонов мультиполей в большом числе работ, в данных CMB WMAP имеются указания на отклонения от гауссовости, обнаруживаемые с помощью методов фазового анализа, кросскорреляций с галактическими фоновыми компонентами, сферических вейвлетов, функционалов Минковского, угловых спектров мощности и др.
- Различные методы тестирования негауссовых свойств чувствительны к различным типам проявления негауссовости. Например, фазовый анализ "видит" остаточные проявления галактических фоновых компонент (или систематических ошибок) в очищенном сигнале CMB, в то время как биспектр и схожие методы не чувствительны к этому типу негауссовости.
- Низкие мультиполи данных WMAP CMB демонстрируют отклонение от гауссовости и/или статистический изотропии, практически независимо от того, какой из методов тестирования этого феномена используется.
- Уровень первичной негауссовости некоторых типов, например такого, который описывается параметром $f_{\rm NL}$, оценивается методами, нечувствительными к остаточному сигналу галактического фона. Например, "сдвинув" пятна фона без изменения размера, можно получить арту с гауссовой статистикой распределения сигнала, оцениваемой по распределению температуры, но со связанными фазами разных мультиполей.
- Моделирование в рамках представления о гауссовых и статистически изотропных первичных возмущениях и стандартной ΛCDM-космологии служит важным инструментом для понимания процесса наблюдений, анализа данных и оценки уровня достоверности. Полезно и моделирование с негауссовыми и/или статистически анизотропными первичными возмущениями при тех или иных конкретных предположениях об их свойствах. Однако если CMB имеет негауссовы свойства другой, ещё невыясненной, природы, отличной от заложенной в модели, применение последнего подхода может ограничить нас в интерпретации данных.
- У нас имеется единственная реализация данных реального CMB, характеристики которого точно не известны, так как истинный CMB-сигнал скрыт галактическим фоном, сглажен негауссовой диаграммой направленности, сложен с шумом. Для единственной, даже гауссовой, реализации CMB в принципе можно подобрать тест, который выявит её "ложную" негауссовость, хотя бы в силу того что, во-первых, наблюдения дают ограниченный набор данных и, во-вторых, эти данные получены из исходного массива, явно содержащего негауссовы систематические погрешности и вклады фоновых излучений. Вопрос о корректной оценке статистической достоверности особенностей, обнаруженных *a posteriori*, до сих пор дебатируется.

Перспективы развития направления, затронутого в этой статье, связаны с повышением точности экспериментов и ещё более аккуратной оценкой загрязняющих факторов, снижающими нашу зависимость от априорной информации в процессе моделирования методом Монте-Карло. Эксперименты с хорошей чувствительностью, такие как миссии Plank, покрывающие широкий диапазон частот и имеющие лучшее разрешение, позволят проверить результаты, полученные миссией WMAP, и, возможно, уточнят результаты поиска первичной негауссовости.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен своим коллегам А.Г. Дорошкевичу и П.Д. Насельскому за плодотворное обсуждение работ по теме негауссовости. Отдельную признательность автор выражает В.А. Рубакову за прочтение рукописи, дискуссии и замечания, благодаря которым был значительно улучшен текст стать, существенно расширен ряд разделов, особенно разделы 1 и 6, а также список литературы и дополнительно написан раздел 7. В работе использовался открытый архив наблюдений миссии WMAP NASA; для анализа данных и построения изображения CMB применялся пакет GLESP (Gauss-Legendre Sky Pixelization)[5] [163,164]. Автор признателен Фонду некоммерческих программ Дмитрия Зимина "Династия" и РФФИ (грант 09-02-00298) за поддержку исследований по данной тематике.

[5] `http://www.glesp.nbi.dk`

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Starobinsky, JETP Lett. **30**, 682 (1979).
2. K. Sato, Mon. Not. R. Astron. Soc. **195**, 467 (1981).
3. A. H. Guth, Phys. Rev. D **23**, 347 (1981).
4. A. Albrecht and P. J. Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **48**, 1220 (1982).
5. A. D. Linde, Phys. Lett. B **108**, 389 (1982).
6. V. F. Mukhanov and G. V. Chibisov, JETP Lett. **33**, 532 (1981).
7. S. W. Hawking, Phys. Lett. B **115**, 295 (1982).
8. A. A. Starobinsky, Phys. Lett. B **117**, 175 (1982).
9. A. H. Guth and Pi S-Y, Phys. Rev. Lett. **49**, 1110 (1982).
10. J. M. Bardeen, P. J. Steinhardt, and M. S. Turner, Phys. Rev. D **28**, 679 (1983).
11. T. J. Allen, B. Grinstein, and M. B. Wise, Phys. Lett. B **197**, 66 (1987).
12. A. Linde and V. Mukhanov, Phys. Rev. D **56**, R535 (1997).
13. F. Bernardeau and J-P. Uzan, Phys. Rev. D **66**, 103506 (2002).
14. G. Dvali, A. Gruzinov, and M. Zaldarriage, Phys. Rev. D **69**, 023505 (2004).
15. L. Kofman, Report CITA-03-12, astro-ph/0303614.
16. N. Barnaby and J. M. Cline, Phys. Rev. D **75**, 086004 (2007).
17. T. Falk, R. Ranagarajan, and M. Srednicki, Astrophys. J. **403**, L1 (1993).
18. J. Maldacena, JHEP (05), 013 (2003), astro-ph/0611750.
19. D. S. Salopek and J. R. Bond, Phys. Rev. D **42**, 3936 (1990).
20. N. Bartolo, S. Matarrese, and A. Riotto, JHEP (04), 006 (2004), astro-ph/0308088.
21. N. Bartolo, et al., Phys. Rep. **402**, 103 (2004), astro-ph/0406398.
22. E. Komatsu, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 330 (2009), arXiv:0803.0547.
23. A. E. Gümrükçüoğlu, C. R. Condtaldi, and M. Peloso, in *On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation and Relativistic Field Theories. Proc. of the 11th Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, 23-29 July 2006, Berlin, Germany*, Ed. by H. Kleinert, R. T. Jantzen (Singapore: World Scientific, 2008), p. 1641; astro-ph/0608405.
24. A. E. Gümrükçüoğlu, C. R. Condtaldi, and M. Peloso, JCAP (11) 005 (2007), arXiv:0707.4179.
25. L. Ackerman, S. M. Carroll, and M. B. Wise, Phys. Rev. D **75**, 083502 (2007); Phys. Rev. D **80**, 069901(E) (2009), astro-ph/0701357.
26. M. Watanabe, S. Kanno, and J. Soda, Phys. Rev. Lett. **102**, 191302 (2009), arXiv:0902.2833.
27. K. Dimopoulos, M. Karciauskas, and J. M. Wagstaff, Phys. Rev. D **81**, 023522 (2010), arXiv:0907.1838.
28. M. Watanabe, S. Kanno, and J. Soda, Prog. Theor. Phys. **123**, 1041 (2010).
29. T. R. Dulaney, and M. I. Gresham, Phys. Rev. D **81**, 103532 (2010), arXiv:1001.2301.
30. A. E. Gümrükcüoglu, B. Himmetoglu, and M. Peloso, Phys. Rev. D **81**, 063528 (2010), arXiv:1001.4088.
31. A. A. Starobinsky, JETP Lett. **57**, 622 (1993), gr-qz/9305019.
32. A. de Oliveira-Costa, G. F. Smoot, and A. A. Starobinsky, Astrophys. J. **468**, 457 (1996), astro-ph/9705125.
33. K. T. Inoue, K. Tomita, and N. Sugiyama, Mon. Not. R. Astron. Soc. **314**, L21 (2000), astro-ph/9906304.
34. P. Dineen, G. Rocha, and P. Coles, Mon. Not. R. Astron. Soc. **358**, 1285 (2005), astro-ph/0404356.
35. M. Kunz, et al., Phys. Rev. D **77**, 023525 (2008).
36. N. Turok, Phys. Scr., T. **36**, 135 (1991).
37. N. Turok and D. Spergel, Phys. Rev. Lett. **64**, 2736 (1990).
38. R. Durrer, New Astron. Rev. **43**, 111 (1999).
39. M. Cruz, et al., Science **318**, 1612 (2007), arXiv:0710.5737.
40. T. R. Jaffe, et al., Astrophys. J. **629**, L1 (2005), astro-ph/0503213.
41. M. Demiańsk, and A. G. Doroshkevich, Phys. Rev. D **75**, 123517 (2007).
42. R. Durrer, T. Kahniashvili, and A. Yates, Phys. Rev. D **58**, 123004 (1998), astro-ph/9807089.
43. A. Mack, T. Kahniashvili, and A. Kosowsky, Phys. Rev. D **65**, 123004 (2002), astro-ph/0105504
44. P. D. Naselsky, L.-Y. Chiang, P. Olesen, and O.V. Verkhodanov, Phys. Rev. D **65**, 123004 (2002), astro-ph/0105504.
45. T. Kahniashvili and B. Ratra, Phys. Rev. D **71**, 103006 (2005), astro-ph/0503709.
46. T. Kahniashvili, G. Lavrelashvili, and B. Ratra, Phys. Rev. D **78**, 063012 (2008), arXiv:0807.4239.
47. J. A. Tauber, et al., Astron. Astrophys. **520**, A1 (2010).
48. P. D. Naselsky, D. I. Novikov, and I. D. Novikov, *The Physics of the Cosmic Microwave*

Background (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006).
49. D. S. Gorbunov and V. A. Rubakov, *Introduction to the Theory of the Early Universe: Cosmological Perturbations and Inflationary Theory* (Singapore: World Scientific, 2011).
50. В. Н. Лукаш, Е. В. Михеева, *Физическая космология* (М.: Физмат-лит, 2010).
51. J. Kim and P. Naselsky, Phys. Rev. D **79**, 123006 (2009).
52. A. P. S. Yadav and B. D. Wandlet, Adv. Astron. **2010**, 565248 (2010).
53. N. Bartolo, S. Matarrese, and A. Riotto, Adv. Astron. **2010**, 157079 (2010).
54. E. Komatsu, et al., in *Astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey. Science White Papers*, No. 59, arXiv:0902.4759.
55. E. Komatsu, Classical Quantum Gravity **27**, 124010 (2010).
56. M. Libanov, S. Ramazanov, and V. Rubakov, JCAP (06) 010 (2011), arXiv:1102.1390.
57. M. Libanov, S. Mironov, and V. Rubakov, Phys. Rev. D **84**, 083502 (2011).
58. P. Creminelli, et al., JCAP (02) 006 (2011), arXiv:1011.3004.
59. L. Verde, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **313**, 141 (2000).
60. J. Lesgourgues, et al., Phys. Rev. D **71**, 103514 (2005), astro-ph/0412551.
61. A. Lewis, A. Challinor, and D. Hanson, JCAP (03) 018 (2011), arXiv:1101.2234.
62. T. A. Semenova, Yu. N. Pariiskii, and N. N. Bursov, Astron. Rep. **53**, 1 (2009).
63. E. Komatsu and D. N. Spergel, Phys. Rev. D **63**, 063002 (2001), astro-ph/0005036.
64. U. Seljak and M. Zaldarriaga, Astrophys. J. **469**, 437 (1996).
65. D. H. Lyth and D. Wands, Phys. Lett. B **524**, 5 (2002), hep-ph/0110002.
66. T. Moroi and T. Takahashi, Phys. Lett. B **522**, 215 (2001); Phys. Lett. B **539**, 303(E) (2002), hep-ph/0110096.
67. P. Creminelli, et al., JCAP (05) 004 (2006), astro-ph/0509029.
68. L. Senatore, K. M. Smith, and M. Zaldarriaga, JCAP (01) 028 (2010), arXiv:0905.3746.
69. C. L. Bennett, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 17 (2011), arXiv:1001.4758.
70. E. Komatsu, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 119 (2003), astro-ph/0302223.
71. D. N. Spergel, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 377 (2007), astro-ph/0603449.
72. E. Komatsu, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 18 (2011), arXiv: 1001.4538.
73. A. Slosar, et al., JCAP (08) 031 (2008).
74. C. L. Bennett, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
75. C. L. Bennett, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003), astro-ph/0302208.
76. D. N. Spergel, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 175 (2003), astro-ph/0302209.
77. G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007), astro-ph/0603451.
78. G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009), arXiv:0803.0732.
79. N. Jarosik, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 14 (2011), arXiv:1001.4744.
80. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. J. Way, Astrophys. J. **590**, L65 (2003), astro-ph/0303643.
81. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **599**, L53 (2003), astro-ph/0310542.
82. P. Coles, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **350**, 989 (2004).
83. P. Vielva, et al., Astrophys. J. **609**, 22 (2004), astro-ph/0310273.
84. C.-G. Park, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 313 (2004).
85. H. K. Eriksen, et al., Astrophys. J. **612**, 64 (2004), astro-ph/0401276.
86. H. K. Eriksen, et al., Astrophys. J. **605**, 14 (2004).
87. F. K. Hansen, et al., Astrophys. J. **607**, L67 (2004).
88. D. L. Larson and B. D. Wandelt, Astrophys. J. **613**, L85 (2004).
89. D. J. Schwarz, et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 221301 (2004).
90. A. de Oliveira-Costa, et al., Phys. Rev. D **69**, 063516 (2004).
91. K. Land and J. Magueijo, Phys. Rev. Lett. **95**, 071301 (2005).
92. M. Cruz, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **369**, 57 (2006).
93. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, Astrophysical Bulletin **63**, 216 (2007), arXiv:0707.1484.
94. C. J. Copi, et al., Phys. Rev. D **75**, 023507 (2007).
95. A. Rakić and D. J. Schwarz, Phys. Rev. D **75**, 103002 (2007).
96. J. Hoftuft, et al., Astrophys. J. **699**, 985 (2009), arXiv:0903.1229.
97. J. Kim and P. D. Naselsky, Astrophys. J. **714**, L265 (2010).
98. M. Hansen, et al., Phys. Rev. D **83**, 103508 (2011), arXiv:1103.6135.

99. B. Gold, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 15 (2011), arXiv:1001.4555.
100. S. M. Leach, et al., Astron. Astrophys. **491**, 597 (2008), arXiv:0805.0269.
101. A. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, Phys. Rev. D **83**, 043002 (2011), arXiv:1008.4094.
102. J. Kim, P. Naselsky and P. R. Christensen, Phys. Rev. D **79**, 023003 (2009).
103. V. Stolyarov, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **336**, 97 (2002).
104. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. J. Hamilton, Phys. Rev. D **68**, 123523 (2003).
105. C. L. Reichardt, et al., Astrophys. J. **694**, 1200 (2009).
106. M. L. Brown, et al., Astrophys. J. **705**, 978 (2009).
107. J. M. Bardeen, et al., Astrophys. J. **304**, 15 (1986).
108. J. R. Bond and G. Efstathiou, Mon. Not. R. Astron. Soc. **226**, 655 (1987).
109. P. Watts and P. Coles, Mon. Not. R. Astron. Soc. **338**, 806 (2003).
110. P. Coles and L.-Y. Chiang, Nature **406**, 376 (2000).
111. L.-Y. Chiang, P. D. Naselsky, and P. Coles, Astrophys. J. **602**, L1 (2004), astro-ph/0208235.
112. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004), astro-ph/0310601.
113. N. I. Fisher, *Statistical Analysis of Circular Data* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993).
114. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Yu. N. Parijskij, Astrophysical Bulletin **63**, 95 (2008).
115. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **62**, 203 (2007).
116. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Int. J. Mod. Phys. D **17**, 179 (2008), astro-ph/0609409.
117. L.-Y. Chiang, et al., JCAP (01) 021 (2007), astro-ph/0608421.
118. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K, Majorova, Astrophysical Bulletin **64**, 263 (2009), arXiv:0912.3073.
119. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **65**, 390 (2010).
120. O. V. Verkhodanov, et al., Astrophysical Bulletin **65**, 238 (2010), arXiv:1009.3720.
121. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **66**, 345 (2011).
122. C. J. Copi, D. Huterer, and G. D. Starkman, Phys. Rev. D **70**, 043515 (2004), astro-ph/0310511.
123. C. J. Copi, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **367**, 79 (2006), astro-ph/0508047.
124. J. C. Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, Vol.1, 3rd ed. (Oxford: Clarendon Press, 1892).
125. A. R. Pullen and M. Kamionkowski, Phys. Rev. D **76**, 103529 (2007), arXiv:0709.1144.
126. D. Hanson and A. Lewis, Phys. Rev. D **80**, 063004 (2009), arXiv:0908.0963.
127. N. E. Groeneboom and H. K. Eriksen, Astrophys. J. **690**, 1807 (2009), arXiv:0807.2242.
128. N. E. Groeneboom, et al., Astrophys. J. **722**, 452 (2010), arXiv:0911.0150.
129. H. Minkowski, Math. Ann. **57**, 447 (1903).
130. K. R. Mecke, T. Buchert, and H. Wagner, Astron. Astrophys. **288**, 697 (1994).
131. J. Schmalzing and T. Buchert, Astrophys. J. **482**, L1 (1997).
132. A. G. Doroshkevich, Astrophysics **6**, 320 (1970).
133. J. R. Gott (III), et al., Astrophys. J. **352**, 1 (1990).
134. P. D. Naselsky and D. I. Novikov, Astrophys. J. **444**, L1 (1995).
135. D. Novikov, J. Schmalzing, and V. F. Mukhanov, Astron. Astrophys. **364**, 17 (2000), astro-ph/0006097.
136. D. I. Novikov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **10**, 245 (2001).
137. J. Schmalzing and K. M. Gorski, Mon. Not. R. Astron. Soc. **297**, 355 (1998).
138. S. Winitzki and A. Kosowsky, New Astron. **3**, 75 (1998).
139. D. Novikov, S. Colombi, and O. Doré, Mon. Not. R. Astron. Soc. **366**, 1201 (2006), astro-ph/0307003.
140. C. Hikage, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **389**, 1439 (2008), arXiv:0802.3677.
141. A. P. S. Yadav and B. D. Wandelt, Phys. Rev. Lett. **100**, 181301 (2008).
142. M. Cruz, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **356**, 29 (2005).
143. J. Pando, D. Valls-Gabaud, and L.-Z. Fang, Phys. Rev. Lett. **81**, 4568 (1998).
144. R. B. Barreiro, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **318**, 475 (2000).
145. L. Cayón, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **326**, 1243 (2001).
146. E. Martínez-González, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **336**, 22 (2002), astro-ph/0111284.
147. L. Cayón, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **339**, 1189 (2003).
148. J.-P. Antoine and P. Vandergheynst, J. Math. Phys. **39**, 3987 (1998).
149. C. G. T. Haslam, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **47**, 1 (1982).

150. R. Zhang and D. Huterer, Astropart. Phys. **33**, 69 (2010), arXiv:0908.3988.
151. L. Rudnick, S. Brown, and L. R. Williams, Astrophys. J. **671**, 40 (2007), arXiv:0704.0908.
152. J. J. Condon, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
153. K. M. Smith and D. Huterer, Mon. Not. R. Astron. Soc. **403**, 2 (2010), arXiv:0805.2751.
154. P. D. Naselsky, et al., Astrophysical Bulletin **65**, 101 (2010), arXiv:0712.1118.
155. O. V. Verhodanov, et al., Astrophysical Bulletin **63**, 366 (2008), arXiv:0902.0281.
156. K. M. Smith and D. Huterer, Mon. Not. R. Astron. Soc. **403**, 2 (2010), arXiv:0805.2751.
157. D. I. Solov'ev and O. V. Verhodanov, Astrophysical Bulletin **65**, 121 (2010).
158. O. V. Verhodanov and A. A. Basova, Astrophysical Bulletin **66**, 407 (2011).
159. F. J. Narcowich, P. Petrushev, and J. D. Ward, SIAM J. Math. Analysis **38**, 574 (2006).
160. F. J. Narcowich, P. Petrushev, and J. D. Ward, J. Funct. Anal. **238**, 530 (2006).
161. Ø. Rudjord, et al. Astrophys. J. **701**, 369 (2009), arXiv:0901.3154.
162. D. Marinucci, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **383**, 539 (2008).
163. A. G. Doroshkevich, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2005), astro-ph/0305537.
164. A. G. Doroshkevich, et al., Int. J. Mod. Phys. D **20**, 1053 (2011), arXiv:0904.2517.

БАЗА ДАННЫХ КАРТ ПРОТЯЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СИСТЕМА ДОСТУПА К НИМ*

О. В. Верходанов[1], Я. В. Найден[1], В. Н. Черненков[1], Н. В. Верходанова[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Описывается архитектура разработанного вычислительного веб-сервера `http://cmb.sao.ru`, позволяющего синтезировать карты протяженного излучения на полном небе из сферических гармоник в сетке пикселизации GLESP, сглаживать их диаграммой направленности с различным угловым разрешением в пространстве мультиполей, а также выделять области неба с заданными координатами. Описаны системы доступа к серверу и администрирования, а также технология построения карт участков неба, организованная на языке Python в среде разработки веб-приложений Django.

Ключевые слова: астрономические базы данных

1. ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие активно развиваются астрономические архивы, пополняемые данными новых наблюдений, а также системы доступа к базам данных (БД).

Самая мощная по объему база данных разночастотных карт неба — виртуальная обсерватория SkyView[1] [1]. Она содержит доступные карты всего неба от радио до гамма-диапазона, в том числе данные оцифрованного Паломарского обзора неба (DSS) в Научном институте космического телескопа (STScI), Слоановского обзора SDSS [2], а также результаты наблюдений со спутников IRAS [3], WMAP [4–8], Planck [9], ROSAT [10] и других. Система доступа к информации в БД SkyView позволяет пользователю получать выбранные площадки неба с максимальным разрешением имеющихся обзоров.

Изображения неба в разных частотных диапазонах хранятся также в БД NED[2] (NASA/IPAC Extragalactic Database) [11] и прилагаются к результатам выполнения запросов при поиске источников излучения.

Несмотря на большие возможности имеющихся баз данных и систем доступа в форме виртуальной обсерватории, эти серверы не дают возможности создавать запросы, которые поддерживали бы гармонический анализ и исследовать выбранные площадки с удалением заданных гармоник. Эта задача может быть выполнена специализированными пакетами обработки излучения, распределенного на полной сфере, такими как HEALPix[3] [12] и GLESP[4] [13].

Целью предлагаемой работы является создание вычислительного веб-сервера, позволяющего синтезировать из сферических гармоник карты протяженного излучения на всем небе, сглаживать их диаграммой направленности с различным угловым разрешением в пространстве мультиполей и выделять области неба с заданными координатами. Эти задачи актуальны при исследовании распределения сигнала на сфере, анализе корреляций карт, построенных в разных диапазонах электромагнитного спектра и энергий космических лучей, изучения негауссова сигнала низких гармоник реликтового излучения, приводящего к статистической анизотропии [14, 15].

Ниже мы описываем систему организации базы данных и доступа к файлам, содержащим сферические гармоники и синтезированные карты. В качестве базовой пикселизации сферы выбрана сетка GLESP [13, 16–19]. Система разработанного вычислительного сервера имеет два пути входа в архив данных, представленных в виде двух независимых веб-приложений: 1) доступ к полным картам неба, организованный с помощью процедур на языке Perl и 2) доступ к выбираемым пользователем площадкам неба на заданной частоте с заданным разрешением, организованный на языке Python с применением средств организации оконного ввода

*Астрофизический бюллетень. 2014. 69(1). С. 121

[1]`http://skyview.gsfc.nasa.gov`

[2]`http://nedwww.ipac.caltech.edu`

[3]`http://healpix.jpl.nasa.gov`

[4]`http://www.glesp.nbi.dk`

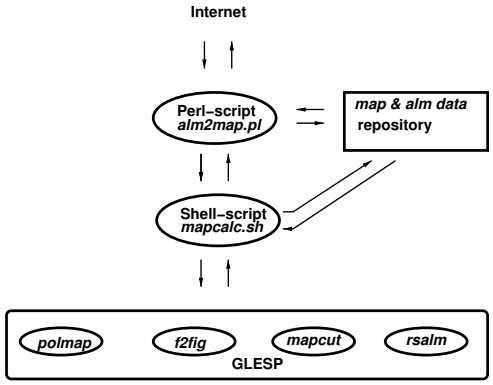


Рис. 1. Структура и система управления базой данных карт и гармоник.

— специальной среды (фреймворка) для разработки веб-приложений Django. Оба пути описываются в предлагаемой работе.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ

При разработке нашей системы `http://cmb.sao.ru` мы следовали сценарию создания серверов CATS[5] [20–23] с базой данных каталогов радиоисточников и SEDs[6] [24,25], содержащей данные распределения энергии в спектрах галактик.

Операции нижнего уровня системы управления сервером обеспечиваются утилитами пакета GLESP [13, 18, 19]. Разложение и синтез карт по сферическим гармоникам (мультиполям) проводится стандартным образом:

$$\Delta S(\theta,\phi) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m}\, Y_{\ell m}(\theta,\phi)\,. \qquad (1)$$

Здесь $\Delta S(\theta,\phi)$ — вариации сигнала на сфере в полярных координатах, ℓ — номер мультиполя, m — номер моды мультиполя. Сферические гармоники определяются как

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

$$x = \cos\theta\,,$$

где $P_\ell^m(x)$ — присоединенные полиномы Лежандра. Для непрерывной функции $\Delta S(x,\phi)$ коэффициенты разложения $a_{\ell m}$ выражаются как

$$a_{\ell m} = \int_{-1}^{1} \mathrm{d}x \int_{0}^{2\pi} \Delta S(x,\phi)\, Y^*_{\ell m}(x,\phi)\, \mathrm{d}\phi\,, \qquad (3)$$

где $Y^*_{\ell m}$ обозначает комплексное сопряжение $Y_{\ell m}$. Эта часть GLESP представлена в процедурах '`cl2map`', '`polmap`', '`polalm`'.

Сглаживание симметричной диаграммой направленности проводится стандартной операцией в пространстве мультиполей:

$$\tilde{a}_{\ell m} = B_\ell\, a_{\ell m}, \qquad (4)$$

где $a_{\ell m}$ — коэффициенты гармонического разложения входной карты, $B_\ell = \exp(-\sigma^2\ell(\ell+1)/2)$ — коэффициенты разложения гауссовой диаграммы направленности с параметром $\sigma = \Theta/\sqrt{8\ln 2}$ и соответствующей шириной по половинной мощности Θ, $\tilde{a}_{\ell m}$ — коэффициенты разложения по мультиполям выходной карты. Процедура реализована в утилите `rsalm`.

2.1. Структура

Структура и система управления базой данных показаны на рис. 1.

Сервер разработан в среде OS GNU/Linux[7] версии Scientific 6.4[8] на компьютере типа Shuttle SZ68R5 с оперативной памятью 32 Гб и жестким диском 2 Тб. БД карт организована в специально выделенной директории с вложенными подкаталогами, где каждому обзору неба соответствует директория с файлами, содержащими данные распределения на сфере (карты) излучения из наблюдательного частотного диапазона и соответствующие гармонические разложения (коэффициенты $a_{\ell m}$). Имена используемых карт, а также файлов с гармониками, картами и их угловым разрешением — максимальным мультиполем $\ell_{\max}$ — хранятся в виде таблицы (см. таблицу 1) в отдельном файле, представляющем собой ссылочную базу данных — репозиторий.

В приведенном примере репозитория (таблица 1) использованы карты из архивов WMAP[9] [4–8], Planck[10] [9], ROSAT [10], обзоров на частотах 408 МГц [26] и 21 см H I [27], а также карта, в пикселах которой содержится величина меры Фарадеевского вращения [28] в задаваемом пикселом направлении, отражающего распределение

[5] `http://cats.sao.ru`
[6] `http://sed.sao.ru`
[7] `http://www.gnu.org/gnu/thegnuproject.en.html`
[8] `http://www.scientificlinux.org`
[9] `http://lambda.gsfc.nasa.gov`
[10] `http://www.sciops.esa.int/index.php?page=Planck_Legacy_Archive&project=planck`

Таблица 1. Пример репозитория базы данных карт, содержащий их имена, имена файлов с гармониками и картами, а также максимальное разрешение $\ell_{\max}$ в мультипольном описании.

Имя	$a_{\ell m}$-s	Карта	$\ell_{\max}$
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_21cm.fts	Bonn/map_21cm.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

магнитного поля в Галактике. Хранящиеся в базе данных карты наблюдательных данных и космического микроволнового фона (Cosmic Microwave Background — CMB) WMAP, содержат результаты наблюдений и обработки обсерватории WMAP третьего, пятого, седьмого и девятого годов ее работы на пяти частотах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса K_a), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W), — а также карты фоновых галактических компонент: синхротронного и свободно-свободного излучения и излучения пыли. Карты архива Planck содержат данные о CMB и наблюдений на девяти частотах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 857 ГГц, — с максимальным разрешением на высоких частотах порядка $5'$. Карты спутника ROSAT построены в пикселизации GLESP в шести интервалах энергии регистрируемых фотонов в полосах 1/4 кэВ, 3/4 кэВ и имеют угловое разрешение $12'$. Карта неба на частоте 408 МГц содержит комбинированные данные обзоров на телескопах Jodrell Bank Mk I и Mk IA, Bonn 100 m, Parkes 64 m с разрешением $0.^\circ85$ [26, 29]. Карта на 21 см содержит данные излучения нейтрального водорода и построена по данным обзоров Leiden/Dwingeloo на северном небе [30] и обзора Аргентинского института радиоастрономии (Instituto Argentino de Radioastronomia) на южном небе [31, 32]. Угловое разрешение карт $0.^\circ6$. Карта меры Фарадеевского вращения восстановлена по данным о поляризации источников обзора NVSS [33].

Система управления состоит из трех уровней: нижнего, промежуточного и верхнего. Нижний уровень реализован с помощью утилит пакета GLESP, обрабатывающих данные карт и гармоник; промежуточный уровень содержит программы управления в виде командных файлов, разработанных на языках shell и Perl (процедуры `cmb_calc.sh` и `alm2map.pl` соответственно); верхний уровень предоставляет доступ из Интернет с помощью программы-демона `httpd` OS GNU/Linux. Чтение веб-страницы производится процедурой `alm2map.pl`, которая передает прочитанные параметры командному файлу `cmb_calc.sh`. Обе процедуры обращаются в репозиторий, хранящийся в файле `alm_descr`, за дополнительными ссылками на имена файлов. Система взаимодействия процедур и репозитория показана на рис. 1. В случае необходимости добавления новых карт и изменения содержимого репозитория происходит обновление пунктов меню выбора, предоставляемого процедурой `alm2map.pl`.

2.2. Доступ

К базе данных и ее системе управления организован доступ, поддерживаемый двумя типами стандартных Интернет-протоколов: HTTP (веб-интерфейс) и FTP.

Веб-страницу задания параметров для синтеза карт из сферических гармоник готовит процедура `alm2map.pl`. В стандартное меню страницы (рис. 2) входят запросы об угловом разрешении карты в

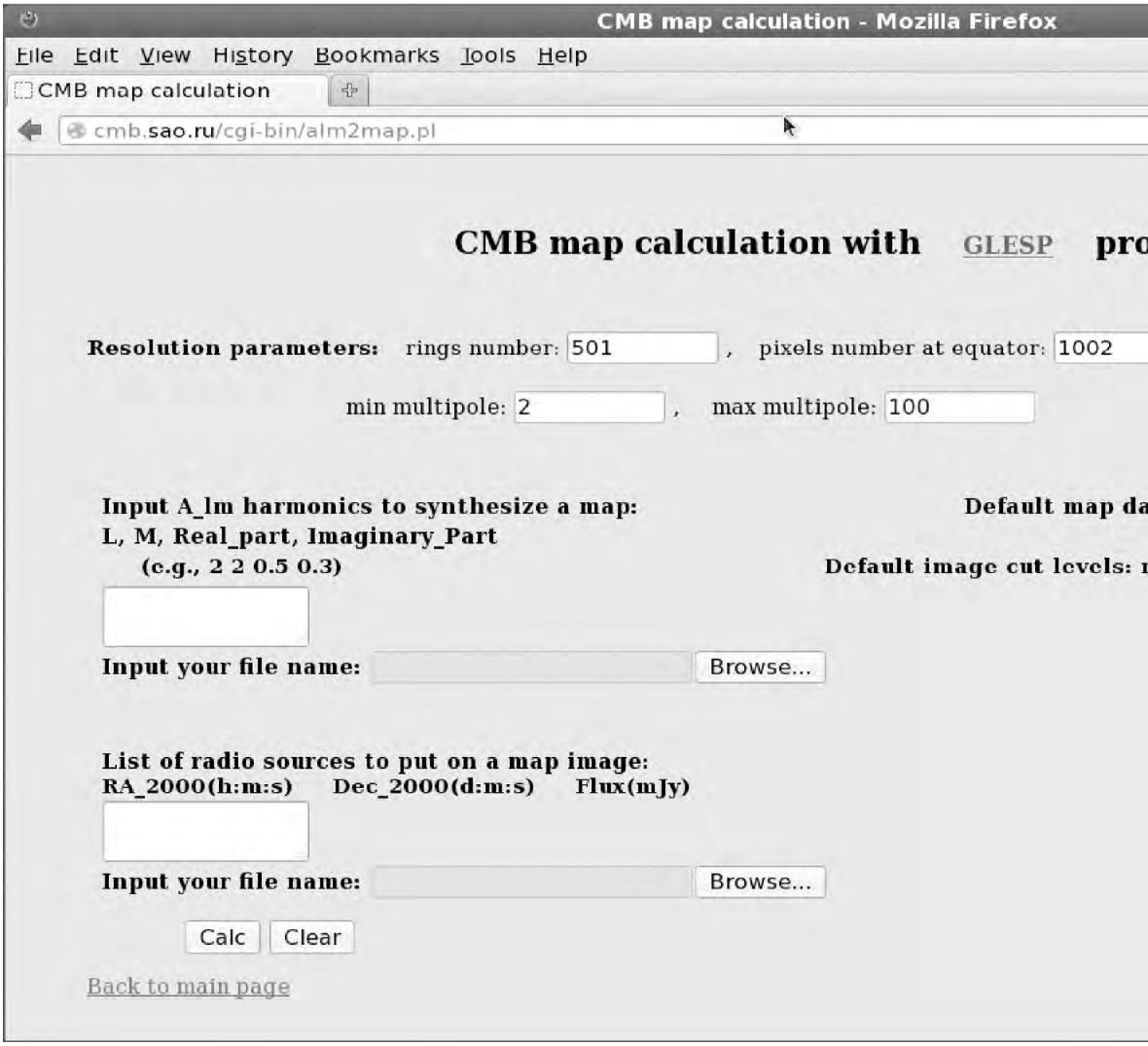


Рис. 2. Веб-страница доступа к процедуре синтеза карт из сферических гармоник.

рамках пикселизации GLESP, задаваемом тремя параметрами: максимальным номером мультиполя $\ell_{\max}$, количеством пикселов на экваторе N_x, причем $N_x \geq 2\ell_{\max} + 1$, и количеством колец на сфере $N_p \geq 2N_x$. Для внешнего пользователя предоставлена отдельная возможность ввода собственных гармонических коэффициентов $a_{\ell m}$ как в виде ASCII таблиц формата [ℓ m Re Im], где Re и Im — вещественная и мнимая части $a_{\ell m}$, так и в виде файлов, загружаемых с помощью браузера. Имеется также возможность добавления сигнала точечных источников в пикселы с заданными координатами и изменения шкалы сигнала выводимых рисунков.

FTP-доступ к базе данных гармоник и карт, построенных с максимальным разрешением, открыт по адресу `ftp://ftp.sao.ru/cifs/cmb/cmb/`.

Выходная информация предоставляется в виде FITS-файла с данными на полной сфере, JPEG-изображения карты в галактических координатах в проекции Mollweide и таблицы данных с заданным разрешением. Построение изображения проводится процедурой `f2fig` пакета GLESP.

FITS-формат выводимых карт в стандарте FITS Binary Table [34] определяется пикселизацией GLESP и содержит самодокументированный описывающий данные ASCII-заголовок и три двоичные таблицы:

1) положения нулей полиномов Лежандра по оси $\cos\theta$;
2) количество пикселов в кольцах на сфере;
3) значение сигнала в пикселах при прохождении последовательно по кольцам от севера к югу в соответствии с положением узлов $\cos\theta$.

Коэффициенты $a_{\ell m}$ при сферических гармониках, полученных из разложения используемых карт, доступны по протоколу FTP и хранятся в FITS-файлах стандарта FITS Binary Table. В них записана информация в виде трех двоичных таблиц, содержащих

1) кодированный номер гармоники в виде $j = \ell^2 + \ell + m + 1$, где ℓ — номер мультиполя, m — номер его моды;
2) значение вещественной части $a_{\ell m}$;
3) значение мнимой части $a_{\ell m}$; формат записи файлов с данными $a_{\ell m}$ совместим с аналогичным в пакете HEALPix.

3. ВЫБОР ОБЛАСТИ НЕБА С ЗАДАННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Выбор области неба с разрешением, задаваемым пользователем, является вычислительной процедурой, аналогичной построению карты на сфере. При этом, если требуется максимальное разрешение, определяемое исходной картой, вычисления не производятся, а используется архивная карта. При необходимости сигнал сглаживается в гармоническом пространстве в соответствии с формулой (4). После выполненных процедур подготовленная карта используется для вырезания выбранной площадки неба. Для представленной задачи разработано отдельное веб-приложение `alm2area`, действующее на этом же сервере.

3.1. Принцип работы приложения

Приложение написано на языке Python[11] версии 2.7 с использованием системы работы с оконными интерфейсами (фреймами) — специальной среды для разработки веб-приложений (фреймворка) Django,[12] распространяемой под лицензией BSD. Выбор версии Python (2.7 и выше) обусловлен существованием разработанных процедур поддержки фреймворка.

В качестве шаблона проектирования используется система Model View Controller (MVC), выбор которой определяется фреймворком. На рис. 3 изображена схема работы приложения.

Процесс обработки запроса содержит несколько шагов:

1) после поступления запроса управление передается Django;
2) Django обращается к моделям и представлениям, чтобы сформировать веб-страницу с ответом;
3) проводится проверка корректности запроса; если он оказался некорректным, то формируется соответствующее представление (веб-страница);
4) если запрос удалось обработать, то через контроллер формируются данные для ответа;
5) когда данные получены, продолжается работа той части приложения, которая отвечает за представление, чтобы сформировать страницу ответа.

Контроллером является специально разработанный пакет GlesPy[13] [35], который представляет со-

[11] `http://python.org`
[12] `http://djangoproject.com`
[13] `https://pypi.python.org/pypi/glespy`

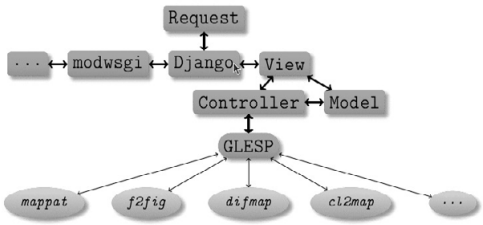


Рис. 3. Схема работы приложения для расчета карт по сферическим гармоникам и подготовки выбранных площадок неба.

бой набор классов и инструментов с автоматическим контролем параметров для работы с утилитами пакета GLESP на языке Python версии 2.7. Пакет GlesPy включает процедуры моделирования и анализа данных космического микроволнового фона: сложения, вычитания и вращения карт на полной сфере, а также процедуры гармонического и статистического анализа в мультипольном пространстве описания данных.

3.2. Доступ

Доступ к приложению осуществляется через веб-интерфейс по HTTP. На рис. 4 изображена главная страница приложения. Ниже описаны основные пункты пользовательского меню.

- В секции *Map Parameters* задаются параметры файла со сферическими гармониками и базовые параметры графического представления карты.
- В секции *Point Source Data* можно загрузить файл с точечными источниками, содержащий параметры, требуемые утилитой `mappat` пакета GLESP: hh:mm:ss.s (RA), dd:mm:ss.s (Dec) и амплитуду, — и задать множитель при их наложении на карту.
- В секции *Mask File* можно выбрать файл с маской в FITS-формате пакета HEALPix (стандартные маски предоставляются архивами WMAP и Planck).
- Сглаживание карты можно задать вводом углового размера в минутах дуги, соответствующего ширине симметричной гауссовой диаграммы по половинной мощности, в секции *Smooth window* в поле *Smoothing Parameters*.
- Секция *Zone Cut Parameters* предназначена для задания координат области неба, которая будет выделена из полной карты. Границы области задаются в галактической системе координат в градусах.
- Группа параметров *Map View Values Limits* предназначена для формирования срезов по максимальному и минимальному значению сигнала в пикселах.

В результате выполнения запроса из данного веб-приложения (функция *Submit*) выдается изображение выбранной области неба в JPEG-формате и ссылка для загрузки соответствующего файла с выбранными данными в архивном формате Basic FITS [36]. 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 $\ell_{\max}$, количеством пикселов на экваторе N_p и числом колец на сфере N_x — аналогичны указанным в разделе 2.2.

3.3. Управление локальной базой данных

Доступ к базе данных SQLite 3[14] осуществляется через административную часть, в которую можно попасть добавив строку `admin/` к URL приложения[15] (рис. 5). На главной странице администрирования отображается история изменений в базе данных (справа), управление базой данных, сайтом и пользователями (справа в основной части).

В разделе *A_ lm's* (рис. 6) осуществляется управление файлами, содержащими коэффициенты сферических гармоник. Здесь можно найти полный список файлов, их параметры, отсортировать их, отредактировать, добавить новые, удалить ненужные и т.п. Добавление ссылок на новые файлы, содержащие данные гармоник и карты, также может быть произведено через интерфейс командной строки (Command Line Interface — CLI) специальной процедурой после обновления репозитория '`alm_descr`' (см. раздел 2.1).

Раздел *Calculated maps* предназначен для управления заранее рассчитанными картами, которые используются в качестве заготовок для наиболее частых запросов. Это позволяет избежать дополнительных вычислений при каждом запросе, что экономит затраченное время на выполнение процедур и минимизирует нагрузку на вычислительный сервер при разложении карт по сферическим гармоникам (рис. 7).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описана процедура создания базы данных карт, содержащих распределение про-

[14] `www.sqlite.org`
[15] Доступ требует авторизации.

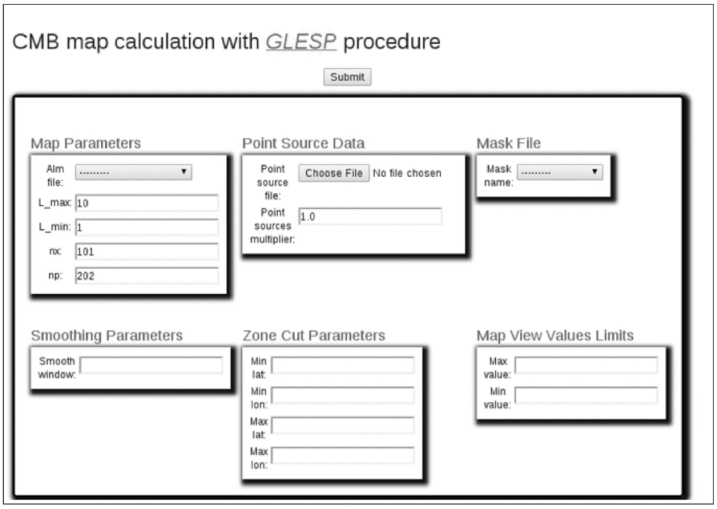


Рис. 4. Основной экран приложения.

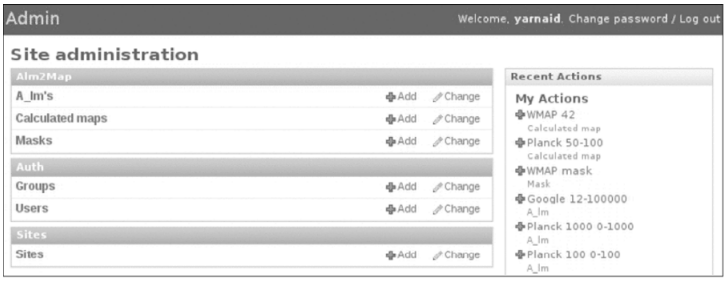


Рис. 5. Страница администрирования.

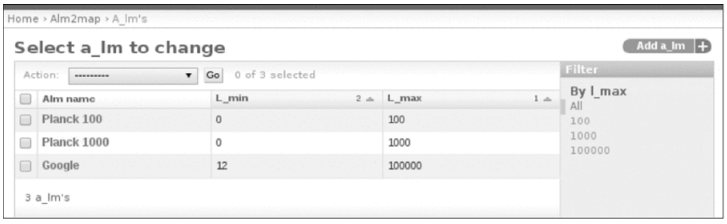


Рис. 6. Страница администрирования: добавление новых файлов с гармониками.

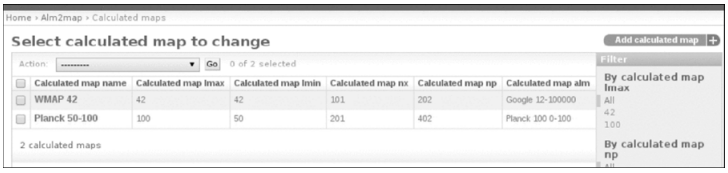


Рис. 7. Веб-страница администрирования: добавление новых предвычисленных карт.

тяженного излучения на полной сфере, на сервере `http://cmb.sao.ru`. Реализованная система доступа и управления БД позволяет производить стандартные операции анализа данных на сфере. Эти операции включают

- синтез карт протяженного излучения на полном небе из сферических гармоник в сетке пикселизации GLESP;
- сглаживание их диаграммой направленности с различным угловым разрешением в пространстве мультиполей;
- выделение областей неба с заданными координатами;
- добавление сигнала точечных источников;
- построение графических изображений всего неба и выбранных областей с заданным угловым разрешением.

Доступ к базе данных обеспечен двумя вебприложениями, разработанными на языках Perl (`alm2map`) и Python (`alm2area`), имеющими доступ к общей базе данных карт неба и сферических гармоник и оперирующими утилитами пакета GLESP, но решающими отличающиеся задачи.

База данных расширяется добавлением директории с новыми картами и их гармоническим разложением и включением соответствующего описания в репозиторий `alm_descr`. Кроме того, на уровне пакета GLESP разработана процедура перевода файлов архива наблюдений на РАТАН-600 в континууме [37] в карты на сфере с последующей реализацией на разработанном сервере.

Предоставленные возможности системы упрощают анализ корреляций разночастотных карт, изучение статистической анизотропии, наблюдаемой на низких гармониках карты реликтового излучения, а также исследование свойств протяженного излучения разной природы в выделенных областях. Кроме того, сервер может быть использован в образовательном процессе при изучении гармонического разложения сигнала, регистрируемого на полной сфере.

БЛАГОДАРНОСТИ

В данной работе авторы использовали архивы WMAP, Planck, ROSAT, систему обработки радиоастрономических данных FADPS (`http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html`) [38, 39] и пакет GLESP [18,19] для анализа данных на сфере. Авторы выражают свою признательность NASA за возможность использования архива (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные архива карт WMAP, и ESA — за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. Работы по данной теме были поддержаны грантом РФФИ № 13-02-00027.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. McGlynn, K. Scollick, and N. White, in *Proc. IAU Symp. 179 on New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys*, Ed. by B. J. McLean, D. A. Golombek, J. J. E.Hayes, and H. E. Payne (Kluwer Acad. Publ., 1997), p. 465.
2. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agueros, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **182**, 543 (2009).
3. C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al., *Infrared Astronomical Satellite (IRAS) Catalogs and Atlases*, Vol. 1: *Explanatory supplement* (1988).
4. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003).
5. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007).
6. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009).
7. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 14 (2011).
8. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et.al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **208**, 20 (2013).
9. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), "Planck 2013 Results. I. Overview of Products and Scientific Results", arXiv:1303.5062.
10. W. Voges, B. Aschenbach, Th. Boller, et al., Astron. Astrophys. **349** 389 (1999).
11. J. M. Mazzarella, NED Team, ASP Conf. Ser. **376**, 153 (2007).
12. K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **622** 759 (2005).
13. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. **14**, 275 (2003).
14. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), "Planck 2013 Results. XXIII. Isotropy and Statistics of the CMB", arXiv:1303.5083.
15. О. В. Верходанов, Успехи физических наук **182**, 1177 (2012).
16. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., astro-ph/0501494.
17. О. В. Верходанов, А. Г. Дорошкевич, Успехи физических наук **183**, 849 (2013).
18. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
19. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Int. J. Mod. Phys. **20**, 1053 (2011).

20. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, ASP Conf. Ser. **125**, 322 (1997).
21. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, V. N. Chernenkov, and H. Andernach, Baltic Astronomy **9**, 604 (2000).
22. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005).
23. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Data Sci. J. **8**, 34 (2009).
24. O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, et al., Astron. Astrophys. Trans. **19**, 663 (2000).
25. O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, et al., Baltic Astronomy **9**, 668 (2000).
26. C. G. T. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel, and W. E. Wilson, Astron. Astrophys. **47**, 1 (1982).
27. P. M. W. Kalberla, W. B. Burton, D. Hartmann, et al., Astron. Astrophys. **440**, 775 (2005).
28. N. Oppermann, H. Junklewitz, G. Robbers, et al., Astron. Astrophys. **542**, A93 (2012).
29. C. G. T. Haslam, U. Klein, C. J. Salter, et al., Astron. Astrophys. **100**, 209 (1981).
30. D. Hartmann and W.B. Burton, *Atlas of Galactic Neutral Hydrogen* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997), p. 243.
31. E. M. Arnal, E. Bajaja, J. J. Larrarte, et al., Astron. Astrophys. **142**, 35 (2000).
32. E. Bajaja, E. M. Arnal, J. J. Larrarte, et al., Astron. Astrophys. **440**, 767 (2005).
33. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
34. R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen, et al., Astron. Astrophys. **376**, 359 (2001).
35. Я. В. Найден, Пакет программ на языке Python для моделирования и анализа данных космического микрволнового фона, `https://pypi.python.org/pypi/glespy`
36. D. C. Wells, E. W. Greisen, and R. H. Harten, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **44**, 363 (1981).
37. V. K. Kononov, S. V. Pavlov, M. G. Mingaliev, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **53**, 131 (2002).
38. O. V. Verkhodanov, ASP Conf. Ser. **125**, 46 (1997).
39. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).

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

О. В. Верходанов[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

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

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление первого релиза данных о реликтовом фоне в эксперименте Европейского космического агентства (ESA) Planck[1] [1] открыло новые возможности при исследовании компонент фонового излучения и радиоисточников в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Наблюдения в эксперименте проводились на высокочастотном комплексе (High Frequency Instrument — HFI) с полосами на 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц и на низкочастотном (Low Frequency Instrument — LFI) с полосами на 30, 44, 70 ГГц. Спутник обращался вокруг точки L2 в системе Земля–Солнце. Разрешение карты реликтового фона (Cosmic Microwave Background — CMB) составило около $5'$. Несмотря на то что миссия Planck вторична по отношению к другой космической миссии WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) NASA, она имеет лучшие наблюдательные характеристики. Среди них можно отметить более высокое разрешение (в три раза), давшее возможность измерить угловой спектр мощности до более высоких гармоник (т.е. бóльших величин ℓ), более высокую чувствительность (в десять раз) и девять частотных полос, улучшающих процедуру разделения фоновых компонент. Эти параметры Planck позволили получить новые, фактически независимые (от WMAP), наблюдательные данные. Архив миссии Planck (Planck Legacy Archive — PLA[2]), содержащий карты компонент излучения, дает возможность исследовать сигнал CMB с различным разрешением и, в том числе, независимо проверить с большей или меньшей вероятностью аномальные свойства низких гармоник, измеренных в эксперименте WMAP [2].

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

*Астрофизический бюллетень. 2014. 69(3). С. 350

[1]http://www.rssd.esa.int/Planck/

[2]http://www.sciops.esa.int/index.php?project=planck&page=Planck_Legacy_Archive

[3]http://lambda.gsfc.nasa.gov

формы с разрешением 1°. Весь архив наблюдаемых и обработанных данных доступен и представлен научному сообществу на сайте WMAP.

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

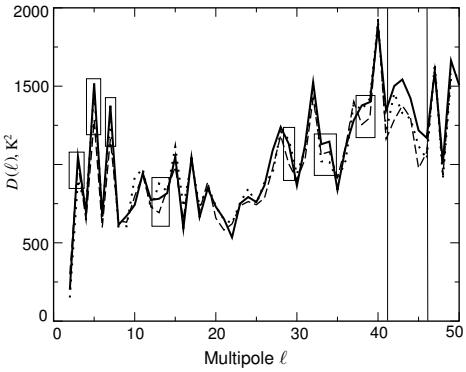


Рис. 1. Угловой спектр мощности $D(\ell) = \ell\,(\ell+1)\,C_\ell/2\pi$ в диапазоне гармоник $2 \le \ell < 50$. Сплошной линией отмечены данные WMAP7 ILC, пунктиром — WMAP9 ILC, и штрихом — Planck. Прямоугольниками отмечены наиболее различающиеся угловые моменты распределений. Вертикальными линиями на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

2. СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ И НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КАРТЫ

Как уже было отмечено [12], угловой спектр мощности $C_\ell = \dfrac{1}{2\ell+1}\sum\limits_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2$, где $a_{\ell m}$ — коэффициенты при сферических гармониках $Y_{\ell m}$ в разложении анизотропии температуры $\Delta T(\theta,\phi)$ по мультипольным моментам ℓ и их модам m:

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

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

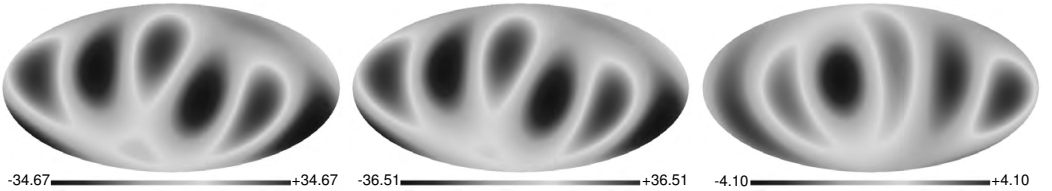


Рис. 2. Слева направо: октуполь (гармоника $\ell = 3$) карты SMICA по данным Planck, октуполь карты ILC 9-го года работы WMAP, карта разности этих сигналов.

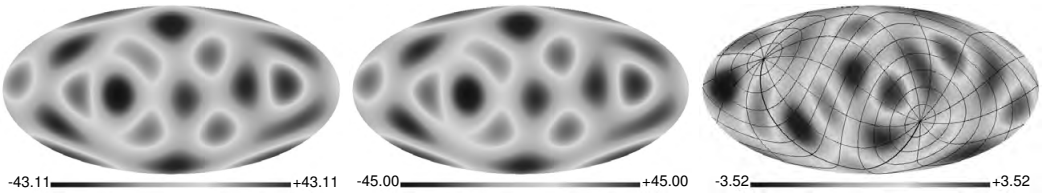


Рис. 3. Слева направо: мультиполь $\ell = 5$ карты SMICA по данным Planck, гармоника $\ell = 5$ карты ILC 9-го работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка экваториальной системы координат.

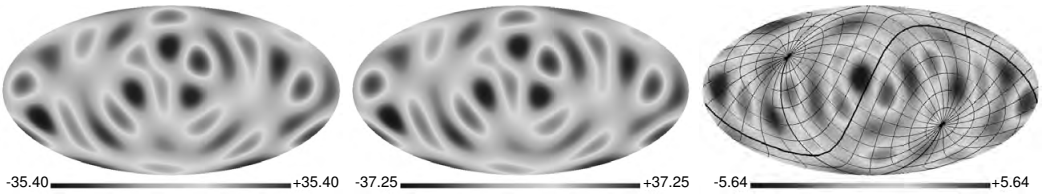


Рис. 4. Слева направо: мультиполь $\ell = 7$ карты SMICA по данным Planck, гармоника $\ell = 7$ карты ILC 9-го работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка эклиптической системы координат.

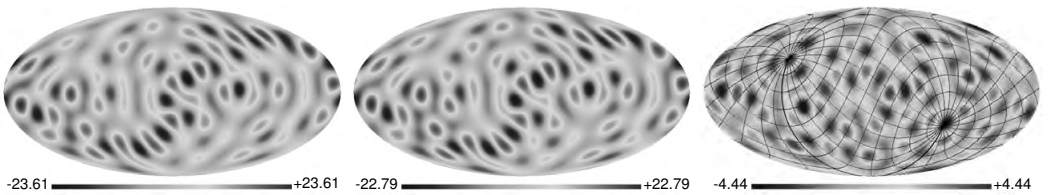


Рис. 5. Слева направо: мультиполь $\ell = 13$ карты SMICA по данным Planck, гармоника $\ell = 13$ карты ILC 9-го работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка эклиптической системы координат.

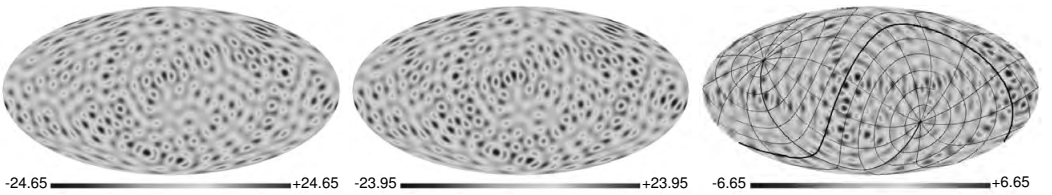


Рис. 6. Слева направо: мультиполь $\ell = 29$ карты SMICA по данным Planck, гармоника $\ell = 29$ карты ILC 9-го работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка экваториальной системы координат.

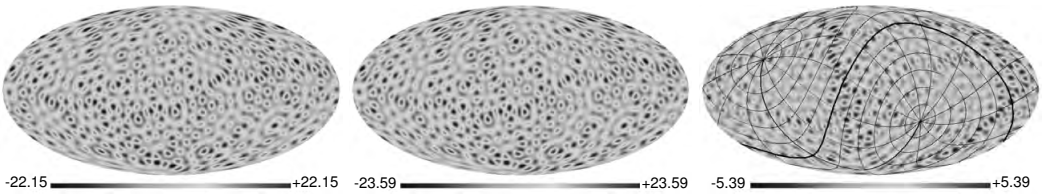


Рис. 7. Слева направо: мультиполь $\ell = 37$ карты SMICA по данным Planck, гармоника $\ell = 37$ карты ILC 9-го работы WMAP, карта разности этих сигналов. На карту разности наложена сетка экваториальной системы координат.

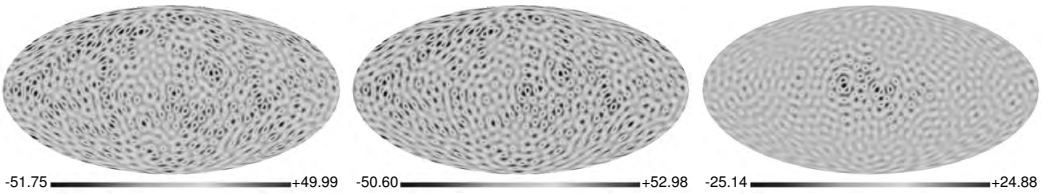


Рис. 8. Слева направо: суммарный сигнал мультиполей $\ell \in [41; 46]$ для карты SMICA по данным Planck, гармоники $\ell = 41$–46 карты ILC 9-го работы WMAP, карта разности этих сигналов.

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

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

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

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

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

Отметим два важных момента при рассмотрении разности карт мультиполей, имеющих большую разность амплитуд в угловом спектре мощности. Во-первых, на всех картах разности имеются особенности, привязанные к галактической, эклиптической или экваториальной (земной) системе координат. Во-вторых, в нумерации мультиполей, различающихся по амплитуде, можно выделить период $\Delta\ell = 8$: отмеченные гармоники, в частности, имеют $\ell = 5{,}13{,}29{,}37{,}45$.

3. СИГНАЛ CMB ИЗ ДИАПАЗОНА $2 \le \ell \le 50$

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

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

и вычислив средний угол для заданного мультиполя l как арктангенс отношения средних значений синуса и косинуса для мультиполя:

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

Таблица 1. Средние фазы $\Theta_{\ell m}$ мультиполей из диапазона $\ell \in [2; 50]$. В столбцах приведены соответственно номер мультиполя ℓ, средние фазы гармоник для карт ILC 7-го года (ILC7), ILC 7-го года с примененной маской ($\mathrm{ILC7_M}$), ILC 9-го года (ILC9 и $\mathrm{ILC9_M}$), SMICA (SMICA и $\mathrm{SM_M}$), NILC (NILC и $\mathrm{NI_M}$), SEVEM (SEVEM и $\mathrm{SE_M}$).

ℓ	ILC7	$\mathrm{ILC7_M}$	ILC9	$\mathrm{ILC9_M}$	SMICA	$\mathrm{SM_M}$	NILC	$\mathrm{NI_M}$	SEVEM	$\mathrm{SE_M}$
2	2.870	3.178	2.950	3.224	3.038	3.587	3.167	3.691	3.199	3.640
3	1.843	1.700	1.866	1.726	1.899	1.680	1.868	1.658	1.816	1.554
4	4.946	5.517	4.899	5.528	5.136	5.583	5.082	5.593	5.168	5.598
5	1.190	1.162	1.216	1.173	1.186	1.131	1.188	1.133	1.198	1.121
6	0.677	0.080	0.681	0.044	0.741	0.280	0.812	0.308	0.961	0.349
7	2.642	3.135	2.637	2.880	2.638	2.635	2.615	2.629	2.420	2.449
8	0.741	0.217	0.786	0.224	0.630	0.181	0.649	0.165	0.448	0.137
9	1.172	2.155	1.196	2.151	1.364	2.178	1.739	2.193	1.865	2.217
10	4.660	5.406	4.595	5.455	4.900	5.457	5.111	5.456	4.972	5.427
11	0.251	6.278	0.254	6.263	0.423	0.057	0.283	0.059	0.156	0.047
12	5.750	5.986	5.931	6.034	5.703	5.969	5.557	5.939	5.689	5.850
13	5.134	5.400	5.167	5.458	5.123	5.366	5.229	5.379	5.501	5.433
14	2.477	2.607	2.399	2.679	2.879	1.393	3.351	1.069	3.508	0.811
15	0.757	5.378	0.808	5.027	0.717	5.281	0.386	5.246	0.332	5.092
16	3.044	2.629	3.048	2.627	3.142	2.677	3.250	2.688	3.249	2.707
17	5.839	0.799	5.936	1.000	0.629	0.781	2.202	0.738	1.803	0.602
18	2.971	2.457	2.880	2.451	2.726	2.465	2.668	2.464	2.963	2.491
19	2.691	0.838	2.240	0.737	1.641	0.779	0.308	0.794	6.029	0.807
20	1.098	1.732	1.114	1.692	1.224	1.851	1.340	1.844	1.411	1.860
21	3.669	0.299	3.205	0.557	1.647	0.566	2.071	0.608	1.944	0.618
22	1.668	1.443	1.555	1.394	1.600	1.323	1.479	1.314	1.713	1.263
23	4.332	3.743	4.368	3.879	3.932	3.526	4.136	3.597	3.938	3.517
24	4.347	1.670	4.156	1.766	3.263	2.104	2.636	2.085	2.316	2.166
25	2.387	1.802	2.335	1.937	1.630	1.525	2.215	1.482	1.394	1.501
26	0.641	0.025	0.633	0.002	0.277	6.253	0.443	6.264	0.432	0.016
27	0.260	0.768	0.243	0.785	0.205	0.806	6.257	0.804	0.111	0.770
28	2.198	2.112	2.207	2.071	2.652	2.234	2.866	2.248	2.738	2.321
29	2.157	1.744	2.155	1.768	2.087	1.638	2.108	1.642	1.970	1.700
30	4.313	5.483	4.920	5.610	5.509	5.150	0.491	5.170	0.684	5.134
31	2.913	3.034	2.806	3.188	2.867	2.922	2.784	2.926	2.659	2.963
32	3.494	3.205	3.194	2.545	2.873	2.553	2.545	2.453	2.530	2.575
33	4.622	3.822	4.499	3.799	3.868	3.842	3.555	3.856	4.040	3.871
34	5.185	5.934	5.185	6.040	5.197	6.278	5.457	0.077	5.107	6.258
35	4.799	5.579	4.828	5.596	4.752	5.804	5.441	5.820	5.609	5.808
36	0.078	5.654	0.906	5.690	2.309	5.334	2.123	5.330	2.226	4.485

Таблица 1. (Продолжение)

ℓ	ILC7	ILC7_M	ILC9	ILC9_M	SMICA	SM_M	NILC	NI_M	SEVEM	SE_M
37	0.520	0.064	0.446	0.055	0.614	0.131	0.550	0.129	0.773	0.092
38	2.282	2.880	2.284	2.872	2.165	2.839	2.177	2.791	2.349	2.849
39	2.590	4.602	2.660	4.553	2.588	4.134	2.158	4.035	3.101	4.033
40	5.686	5.504	5.829	5.840	5.694	6.175	6.114	6.184	6.153	6.207
41	3.443	2.376	3.560	1.789	4.606	1.949	5.007	1.950	4.276	2.043
42	1.202	1.547	1.281	1.587	1.636	1.407	1.659	1.362	1.754	1.388
43	0.146	5.667	0.217	5.657	0.414	5.869	0.304	5.881	0.251	5.899
44	3.625	4.257	3.636	4.304	4.298	4.239	4.309	4.236	4.317	4.316
45	3.881	2.842	3.862	2.931	3.792	3.218	3.644	3.233	3.706	3.236
46	1.085	4.707	1.153	5.571	1.152	4.570	0.471	4.454	1.174	3.604
47	0.819	6.001	0.777	5.973	0.605	6.064	0.587	6.079	0.705	6.022
48	5.126	5.800	4.979	5.906	6.003	6.068	5.450	6.039	5.449	5.945
49	4.799	4.986	4.887	5.048	4.992	4.557	5.029	4.541	5.165	4.529
50	0.459	0.286	0.439	0.230	0.371	0.234	0.367	0.207	0.369	0.158

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

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

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

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

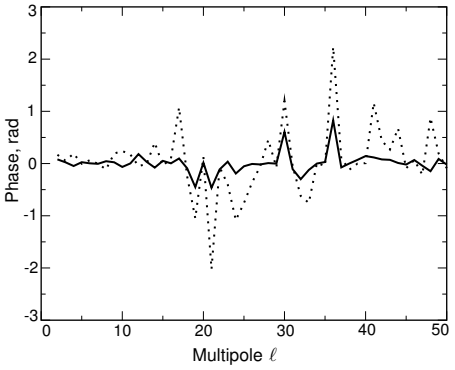


Рис. 9. Разность средних фаз $\Theta(\ell)$ карт ILC WMAP 9-го года и ILC WMAP 7-го года наблюдений (сплошная линия), а также карт Planck SMICA и ILC WMAP7 (пунктир). Маска на карты не накладывалась.

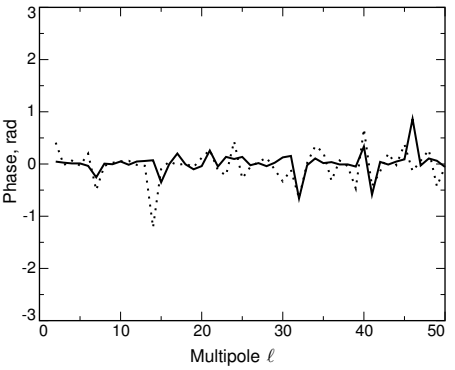


Рис. 10. Разность средних фаз $\Theta(\ell)$ карт ILC WMAP 9-го года и ILC WMAP 7-го года наблюдений (сплошная линия), а также карт Planck SMICA и ILC WMAP7. На все карты перед вычислением фаз наложена маска KQ85.

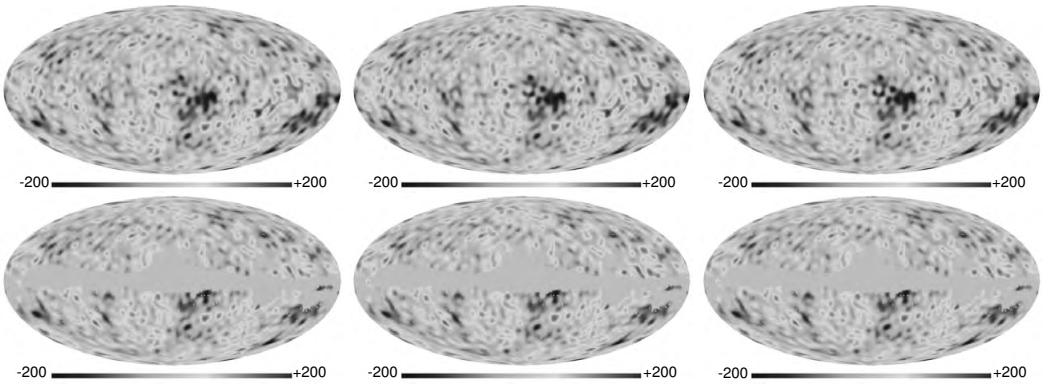


Рис. 11. Слева направо: карты сигнала CMB из диапазона $\ell \in [2; 50]$ для методов SMICA (Planck), ILC7 и ILC9 (WMAP). Вверху: карты CMB без наложения маски. Внизу: карты CMB с наложенной маской KQ85.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы рассмотрели угловые спектры мощности и фазовые характеристики карт CMB двух независимых экспериментов: WMAP и Planck. Спектры мощности, построенные по данным этих обсерваторий, имеют наибольшие различия при мультипольных моментах ℓ = 5,7,13,29,37,41–46. Мы исследовали соответствующие карты ILC WMAP и SMICA WMAP. Как правило, на этих мультиполях разность карт оказывается привязанной к одной или сразу к двум из трех систем координат: галактической, эклиптической и экваториальной. Такая чувствительность разностного сигнала к выбору системы отсчета естественным образом объясняется систематическими эффектами (методикой проведения наблюдений и обработки данных) либо трудноучитываемыми физическими явлениями. Отметим, что выделенные в спектре мощности мультиполи, за исключением диапазона $\ell \in [41; 46]$, имеют сигнал, слабо чувствительный к наложению экранирующей маски (рис. 12).

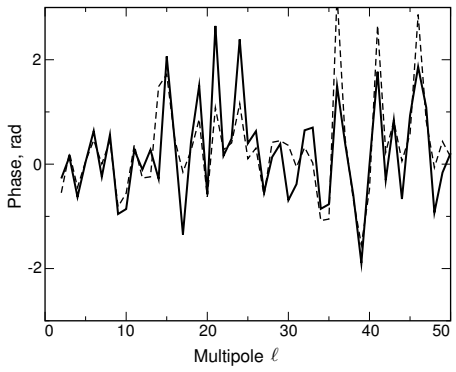


Рис. 12. Разность средних фаз $\Theta(\ell)$ карт ILC WMAP 9-го года без маски и ILC9 с наложенной маской KQ85 (сплошная линия), а также карт Planck SMICA без маски и с маской KQ85 (пунктир).

Самые сильные эффекты при анализе данных вносит наша Галактика, излучение которой доходит до галактических широт $|b| > 40°$ [15]. Особенность влияния галактического сигнала состоит в том, что даже экранирование плоскости Галактики все равно оставляет сигнал за ее пределами, и при мультипольном разложении он проникает в карты гармоник в область центральной плоскости. Фазовый анализ показывает, что в диапазоне самых низких гармоник ($\ell \in [2; 13]$) влияние Галактики удается учесть сравнительно хорошо (рис. 12), а в области $\ell \in [14; 24]$, соответствующей типичным угловым размерам плоскости Галактики (4–10°), сигнал сохраняется. В этом диапазоне угловых масштабов вклад излучения Галактики в карту CMB значительно понижен для данных Planck по сравнению с данными WMAP. Это факт может объясняться различием в анализе данных, а именно в использовании высокочастотных карт Planck (выше 100 ГГц), которые отсутствовали в эксперименте WMAP. Тем не менее на обертонных гармониках (в интервале, смещенном по пространственной частоте в два раза: $\ell \in [35; 48]$) влияние Галактики на немаскируемую карту Planck становится существенным и превышает аналогичный вклад сигнала у WMAP. Этот эффект наблюдается в картах, соответствующих наибольшей разности в спектре мощности из диапазона $\ell \in [41; 45]$ (см. рис. 8).

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

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

Отметим, что ранее [17, 18] мы уже обсуждали гармонику ℓ = 6 карты CMB WMAP и выделенность для нее эклиптической и галактической систем координат. Гармоника ℓ = 6 соответствует характерному угловому масштабу примерно 13°.5 и совместно с ℓ = 7 дает обертонный размер для ℓ = 13. Таким образом, различие в угловом спектре мощности для гармоник ℓ = 7,13 может быть вызвано одной причиной. Сравнительно небольшие угловые масштабы эффекта отвергают объяснение влиянием скопления в Деве, но и не позволяют выбрать между эффектом систематики или неучтенным излучением внутри Солнечной системы.

Представляется интересным, что разность карт чувствительна к экваториальной системе координат, наблюдаемой для мультипольных моментов ℓ = 5,29,37. Влияние экваториальной системы на данные WMAP мы уже обсуждали ранее в [19]. Отметим здесь, что наряду с возможной модуляцией солнечного ветра, проходящего через точку L2, магнитным полем Земли, “знающим” об экваториальной системе, возможно и другое объяснение: эффект вызван излучением Земли, попадающим в далекие боковые лепестки антенны космической обсерватории. В этом случае неравномерность излучения микроволнового фона Земли может от-

разиться в записи временных рядов телескопа.

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

Таким образом, можно сказать, что различие в угловом спектре мощности сигнала CMB WMAP и Planck на низких гармониках, чувствительное к трем небесным системам координат, вызвано, в первую очередь, различием наблюдательных данных (разный набор наблюдательных частотных полос) и отличающимся подходом в их анализе. Причем эффекты систематики оказывают значительное влияние на обсуждаемую разность спектров. Эти же эффекты могут быть ответственны и за аномальное распределение сигнала в полусферах, которое наблюдается как различие мощности в северном и южном галактическом и эклиптическом полушариях [13,21–23]. Отметим, что аномальная статистическая анизотропия, признаком которой является неоднородное распределение сигнала между северным и южным полушариями, существует и в экваториальной системе координат. Заметим также, что часть проблем некоторых низкочастотных аномалий сигнала CMB [24] удается снять в модифицированных подходах к процедуре разделения компонент [25], хотя другая часть проявлений статистической анизотропии, таких как отношение мощности сигнала в северном и южном полушариях, все равно сохраняется. Возможные объяснения этой аномалии — анизотропное расширение Вселенной [26, 27] или просто случайное выпадение подобной реализации распределения фона в нашей Вселенной — остаются под вопросом, причем не только теоретическим, но и практическим, из-за сложности проверки. В этом плане поиск объяснения аномалии в рамках систематики представляется более перспективным. Также необходимо сказать несколько слов и о возможном неучете всех систематических эффектов в данных Planck. В работе [28] отмечается, что исключение канала 217 ГГц из анализа данных и восстановления CMB, но использование оставшихся восьми наблюдательных каналов Planck, существенно сближает космологические оценки экспериментов WMAP и Planck. Наша проверка карты на 217 МГц показала, что в опубликованных данных Planck сигнал на 217 МГц имеет самый значительный коррелированный вклад в результирующую карту CMB вне плоскости Галактики ($|b| > 20°$). Причем сигнал CMB близок к сигналу наблюдательного канала на разных угловых масштабах (см., например, изображения отдельных площадок на `http://cmb.sao.ru` [29]). По исследованию внутренних корреляций карт Planck готовится отдельная статья.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен А. Г. Дорошкевичу за полезные обсуждения в ходе подготовки данной работы. Автор также выражает свою признательность NASA за возможность использования архива (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные архива карт WMAP, и ESA — за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. В работе использован пакет GLESP (`http://www.glesp.nbi.dk`) [30–32] для анализа протяженного излучения на сфере. Исследования по данной теме были поддержаны грантом РФФИ №. 13-02-00027.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), "Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results," arXiv:1303.5062.
2. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 17 (2011).
3. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 1 (2003).
4. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 97 (2003).
5. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **148**, 175 (2003).
6. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **170**, 288 (2007).
7. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 225 (2009).
8. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 14 (2011).
9. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **208**, 20 (2013).
10. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), "Planck 2013 results. XII. Component separation," arXiv:1303.5072.
11. A. Frejsel, M. Hansen, and H. Liu, J. Cosmol. Astropart. Phys., No. 06, id. 005 (2013).
12. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), "Planck 2013 results. XV. CMB power spectra and likelihood," arXiv:1303.5075.
13. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), "Planck 2013 results. XXIII. Isotropy and Statistics of the CMB," Astron. Astrophys. (in press); arXiv:1303.5083.
14. M. Hansen, A. M. Frejsel, J. Kim, et al., Phys. Rev. D **83**, 103508 (2011).

15. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), "Planck 2013 results. XIII. Galactic CO emission," arXiv:1303.5073.
16. M. Hansen, J. Kim, A. M. Frejsel, et al., J. Cosmol. Astropart. Phys., No. 10, id. 059 (2012).
17. O. V. Verkhodanov and Ya.V.Naiden, Astrophysical Bulletin **67**, 1 (2012).
18. O. V. Verkhodanov, T. V. Keshelava, and Ya. V. Naiden, Astrophysical Bulletin **67**, 245 (2012).
19. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S. V. Karpov, Astrophysical Bulletin **65**, 238 (2010).
20. P. D. Naselsky and I. D. Novikov, Int. J. Mod. Phys. D **14**, 1769 (2005).
21. H. K. Eriksen, I. D. Novikov, P. B. Lilje, et al., Astrophys. J. **612**, 64 (2004).
22. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **65**, 390 (2010).
23. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **66**, 345 (2011).
24. О. В. Верходанов, УФН **182**, 1177 (2012).
25. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, Phys. Rev. D **83**, 3002 (2011).
26. M. Demiański and A. Doroshkevich, Phys. Rev. D **75**, 123517 (2007).
27. T Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., Astrophys. J. **629**, L1 (2005).
28. D. Spergel, R. Flauger, and R. Hlozek, arXiv:1312.3313 (2013).
29. O. V. Verkhodanov, Ya. V. Naiden, V. N. Chernenkov, and N. V. Verkhodanova, Astrophysical Bulletin **69**, 113 (2014).
30. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2003).
31. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
32. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Intern. J. Mod. Phys. D **20**, 1053 (2011).

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ RCR-КАТАЛОГА В МИЛЛИМЕТРОВОМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ ПО ДАННЫМ МИССИИ PLANCK*

О. В. Верходанов[1], Е. К. Майорова[1], О. П. Желенкова[1,2], М. Л. Хабибуллина[1], Д. И. Соловьев[3], Ю. Н. Парийский[3]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия
[3]Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Исследованы области карт микроволнового фонового излучения эксперимента Planck в окрестностях радиоисточников RCR-каталога. Построены калибровочные кривые по данным измерений ярких радиоисточников в микроволновом диапазоне, позволяющие измерять яркость объектов. Для 117 объектов впервые получены оценки плотности потока на миллиметровых и субмиллиметровых волнах, построены спектры, проведены отождествления и собрана информация, имеющаяся в базах данных. Слабые, трудновычищаемые микроволновые источники дают дополнительный вклад во вторичную анизотропию на угловых масштабах менее $7'$.

Ключевые слова: каталоги — обзоры — галактики: активные — радиоконтинуум: галактики — субмиллиметровые волны: галактики — реликтовое излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

Публикация карт, построенных по результатам наблюдений в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах космических миссий WMAP [1] и Planck [2] и наземных телескопов Atacama Cosmology Telescope [3] или South Pole Telescope [4], открыла новую эпоху в исследовании внегалактических радиоисточников. Обзоры с разрешением лучше $10'$, целью которых было изучение космического микроволнового фона и связанных с ним эффектов, таких как перераспределение энергии фотонов CMB при взаимодействии с горячим газом скоплений галактик (эффект Сюняева–Зельдовича [5]), позволили изучить не только физические свойства скоплений и газа в них [6] и оценить космологические параметры [7, 8], но и измерить излучение радиоисточников и их параметры в этом диапазоне [9].

Ключевую роль в этом направлении сыграла космическая обсерватория Planck и построенные в результате ее работы карты полного неба на девяти частотах микроволнового диапазона: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 847 ГГц. Карты спутника Planck[1] [2] Европейского космического агентства (ESA) были открыты для научного сообщества в 2013 г. и сразу стали эффективным инструментом в решении многих задач галактической и внегалактической астрономии. Кроме того, в первом релизе данных были представлены каталоги обнаруженных источников миллиметрового и субмиллиметрового излучения, имеющие галактическое и внегалактическое происхождение. Измерения потоков излучения были проведены на высокочастотном комплексе (High Frequency Instrument — HFI) с полосами 100 ГГц и более высоких частот, а также на низкочастотном (Low Frequency Instrument — LFI) с полосами на частотах ниже 100 ГГц. Разрешение карт на частотах выше 100 ГГц составило приблизительно $5'$. Несмотря на то, что миссия Planck вторична по отношению к другой космической миссии, WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) NASA, она имеет лучшие наблюдательные характеристики, что позволяет применять ее для поиска и исследования слабых радиоисточников в микроволновом диапазоне. Среди важных выигрышных характеристик Planck по сравнению с WMAP можно отметить более высокое разрешение

*Астрофизический бюллетень. 2015. 70(2). С. 164

[1]http://www.rssd.esa.int/Planck/

(в 3 раза), более высокую чувствительность (в 10 раз) и 9 частотных полос, позволивших разделить компоненты излучения [10]. Архив миссии Planck (Planck Legacy Archive — PLA[2]), содержит как карты компонент излучения, так и списки обнаруженных объектов. Отметим, что большой частотный наблюдаемый диапазон обсерватории Planck позволяет исследовать не только непрерывный спектр радиоизлучающих областей внегалактических источников, но также и их родительских галактик, дающих вклад в интегральный спектр объекта в субмиллиметровом диапазоне.

В данной работе мы исследуем распределение излучения на картах миссии Planck в направлении на радиоисточники обзоров "Холод" [11], проведенных на радиотелескопе РАТАН-600 в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. В результате анализа данных первого обзора 1980 г. был составлен RC-каталог (RATAN Cold) [12], содержащий многочастотные измерения плотности потока обнаруженных объектов. В дальнейшем были составлены обновленные версии разных подвыборок радиоисточников этого каталога, содержащие объекты с разным типом спектров [13–18] либо объекты в определенных координатных пределах для более глубокого исследования [19, 20].

Для радиоисточников одной из таких подвыборок — RCR-каталога — мы провели отождествление и исследование по данным микроволнового излучения. Для части объектов были найдены кандидаты на отождествление, для которых была измерена плотность потока в миллиметровом диапазоне и построены непрерывные спектры.

2. ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ

2.1. RCR-каталог

RCR-каталог (RATAN Cold Refined) [21] является уточненной версией RC-каталога (RATAN Cold) [12]. Последний был получен в эксперименте "Холод", проводившемся на радиотелескопе РАТАН-600 в 80-х годах на частоте 3.94 ГГц [11]. Для уточнения координат и плотностей потоков источников каталога RC, с 1987 по 1999 гг. на РАТАН-600 были проведены дополнительные семь циклов наблюдений полосы неба обзора

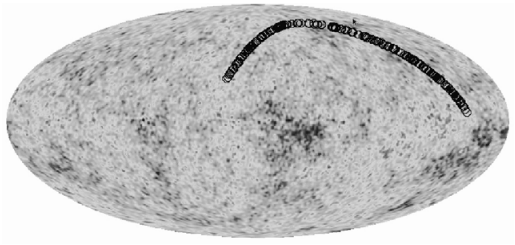


Рис. 1. Положение радиоисточников RCR-каталога (диапазон координат: $7^h \leq \mathrm{RA} < 17^h$, $\mathrm{Dec} \sim 5°$) на карте реликтового излучения, представленной в галактических координатах.

"Холод" на нескольких частотах и выполнена повторная обработка данных 1980–1981 гг. для прямых восхождений $7^h \leq \mathrm{RA} < 17^h$ на склонении $\mathrm{Dec} \sim 5°$ (рис. 1). В результате был получен список из 551 объектов, отождествленных с объектами NVSS-каталога.

Предельная чувствительность RCR-каталога приблизительно составила 10 мЯн. Половина объектов каталога имеют данные о плотностях потока только на двух частотах: 3.94 ГГц (RCR) и 1.4 ГГц (NVSS). В основном это источники с плотностями потоков ≤ 30 мЯн. Результаты оптического отождествления радиоисточников RCR-каталога представлены в работе [22].

2.2. Оценки плотностей потоков источников RCR-каталога на частотах Planck

Для оценки плотностей потоков RCR-объектов на наблюдательных частотах Planck, из представленного каталога [9] выбирались яркие непротяженные объекты. Их измеренные плотности потока использовались для калибровки перевода амплитуды температуры на картах Planck в плотность потока. Для поиска источников и фотометрического измерения сигнала в данных Planck применялась программа Source Extractor[3] (`SExtractor`) [23]. Предварительно из архивных карт Planck с помощью процедуры `mapcut` пакета GLESP[4] [24] в окрестности радиоисточников выделялись области размером $2° \times 2°$ на частотах 30 и 44 ГГц и $30' \times 30'$ — на частотах 70–857 ГГц. Сигнал для дальнейшего анализа в выделенных площадках сохранялся в виде файлов в формате FITS Basic [25]. Выбранные области анализировались пакетом `SExtractor`: интегральная яркость объектов определялась изофото-скорректированным

[2] `http://pla.esac.esa.int/pla/`

[3] `http://terapix.iap.fr/soft/sextractor`

[4] `http://www.glesp.nbi.dk`

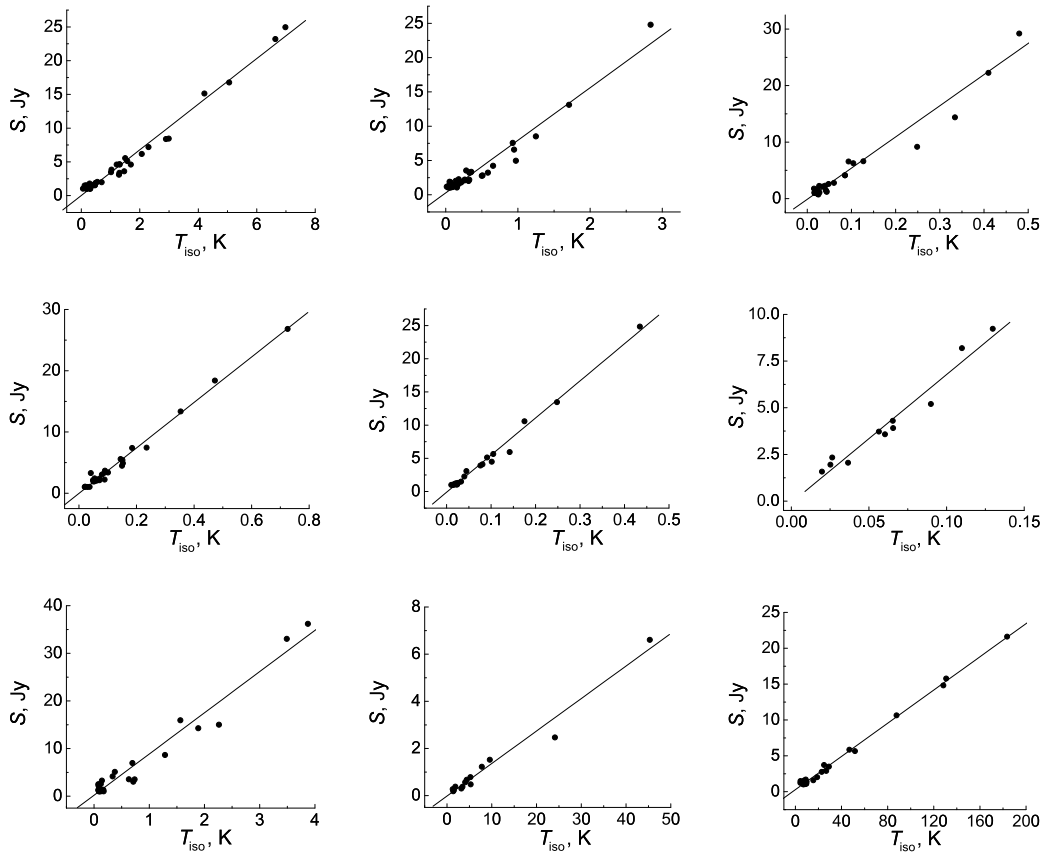


Рис. 2. Пример зависимостей $S(T_{\rm iso})$ для изофото-скорректированного (ISOCOR) метода определения интегральной интенсивности для источников каталога Planck на наблюдательных частотах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 857 ГГц (слева направо сверху вниз). Прямыми линиями показаны аппроксимирующие калибровочные кривые. На графиках по оси абсцисс указана температура микроволнового фона в градусах Кельвина, по оси ординат — плотность потока в янских.

(ISOCOR) и автоматическим (AUTO) методами. Из соотношения между плотностью потока радиоисточников S каталога Planck и соответствующей измеренной яркостью на картах миссии были построены калибровочные кривые $S_{\rm iso}(T)$ и $S_{\rm aut}(T)$, которые в дальнейшем применялись при обработке исследуемых объектов. Полученные зависимости показаны на рис. 2 и 3. Прямые линии на рисунке отражают результаты линейной аппроксимации. Аналитический вид аппроксимационных зависимостей приведен в таблице 1. Количество источников, используемых для построения калибровочных кривых на разных частотах, доходило до нескольких десятков, а их плотности потоков лежали в диапазоне примерно от 0.5 Ян до десятков Ян.

Таблица 1. Линейные аппроксимационные зависимости $S(T)$, построенные для девяти наблюдательных частот миссии Planck по результатам анализа точечных калибровочных источников в программе `SExtractor` для интегральной интенсивности, полученной в изофото-скорректированном (ISOCOR) методе и в автоматическом приближении (AUTO). Точность определения аппроксимационных коэффициентов составляет приблизительно 15%.

ν, GHz	$S(T_{\rm iso})$, Jy	$S(T_{\rm auto})$, Jy
30	$0.0239 + 3.3810\,T$	$0.0830 + 3.4351\,T$
44	$0.0906 + 7.5598\,T$	$0.2129 + 7.9014\,T$
70	$-0.2948 + 60.6192\,T$	$0.3850 + 84.7115\,T$
100	$-0.0127 + 37.1401\,T$	$0.0016 + 37.6134\,T$
143	$0.0555 + 52.9163\,T$	$0.1658 + 53.6090\,T$
217	$-0.0892 + 68.6800\,T$	$0.0433 + 68.7445\,T$
353	$0.0426 + 32.9684\,T$	$0.0838 + 35.2314\,T$
545	$0.0019 + 0.1158\,T$	$0.1481 + 0.1000\,T$
857	$0.2899 + 0.1157\,T$	$0.3819 + 0.1166\,T$

2.3. О вероятности обнаружения пиков

Для оценки вероятности обнаружения пиков на карте реликтового излучения мы провели моделирование случайного гауссова сигнала космического микроволнового фона в рамках космологической модели ΛCDM с параметрами $\Omega_\Lambda = 0.69$, $\Omega_{\rm CDM} = 0.26$ и $\Omega_{\rm b} = 0.05$. Параметры использовались для расчета углового спектра мощности программой `CAMB` [26] в выбранной космологической модели. Моделирование проводилось с помощью пакета GLESP [27]. На смоделированной случайной карте с разрешением $l_{\rm max} = 2500$ были выбраны площадки размером $30' \times 30'$ для 1000 радиогалактик из списка [28], координаты которых для модельной карты указывают на случайные направления. На каждой из площадок с помощью программы-обнаружителя составлялся каталог положительных и отрицательных пиков, из которого в рамках окна заданного радиуса ($7'$) выбирались объекты для статистических подсчетов. В силу эргодичности сигнала CMB применяемый подход позволяет оценить вероятность появления пиков в 1000 случайных гауссовых реализациях CMB. Поиск источников на модельной карте и их фотометрия были сделаны с помощью программы `SExtractor`. Результаты оценки случайного попадания экстремума в окрестность радиусом $7'$ приведены в таблице 2.

В таблицах 3 и 4 приведены результаты средних подсчетов горячих и холодных пиков на реальных картах CMB миссии Planck для источников различных спектральных популяций.

Несмотря на сравнительно высокий разброс амплитуд флуктуаций реликтового излучения в модели ΛCDM (см. таблицу 2), наблюдается отличие в статистике для объектов разных типов: (1) для источников с плоскими спектрами (т.е. из спектрального диапазона $-0.5 < \alpha \leq 0.5$) среднее число попаданий в область положительных пиков в 1.2 раза выше, чем для объектов с крутыми спектрами, при установке уровня обнаружения 1σ; (2) среднее число холодных пятен в диапазоне $S/N > 2.0$ в $7'$-окрестности RCR-источников очень мало как по сравнению с данными для горячих пятен, так и по сравнению с моделями. Этот факт может говорить о неслучайности выделения отобранных источников в микроволновом диапазоне, чей положительный вклад нивелирует ожидаемые статистические оценки для холодных пятен на картах CMB Planck.

2.4. Каталог и отождествление в миллиметровом диапазоне длин волн

В таблице 5 приведен список и основные характеристики радиоисточников RCR-каталога, имеющих возможный отклик на картах Planck. Результаты их отождествления в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах на картах Planck и соответствующие оценки плотности потока собраны в таблице 6.

В таблице 5 в первом столбце приведено имя (Name) в каталоге NVSS, символ * после имени отмечает калибровочный источник.

Во втором столбце знак + указывает на наличие оптического отождествления (OI); ?l — возможное наличие отождествления, но объект на оптическом

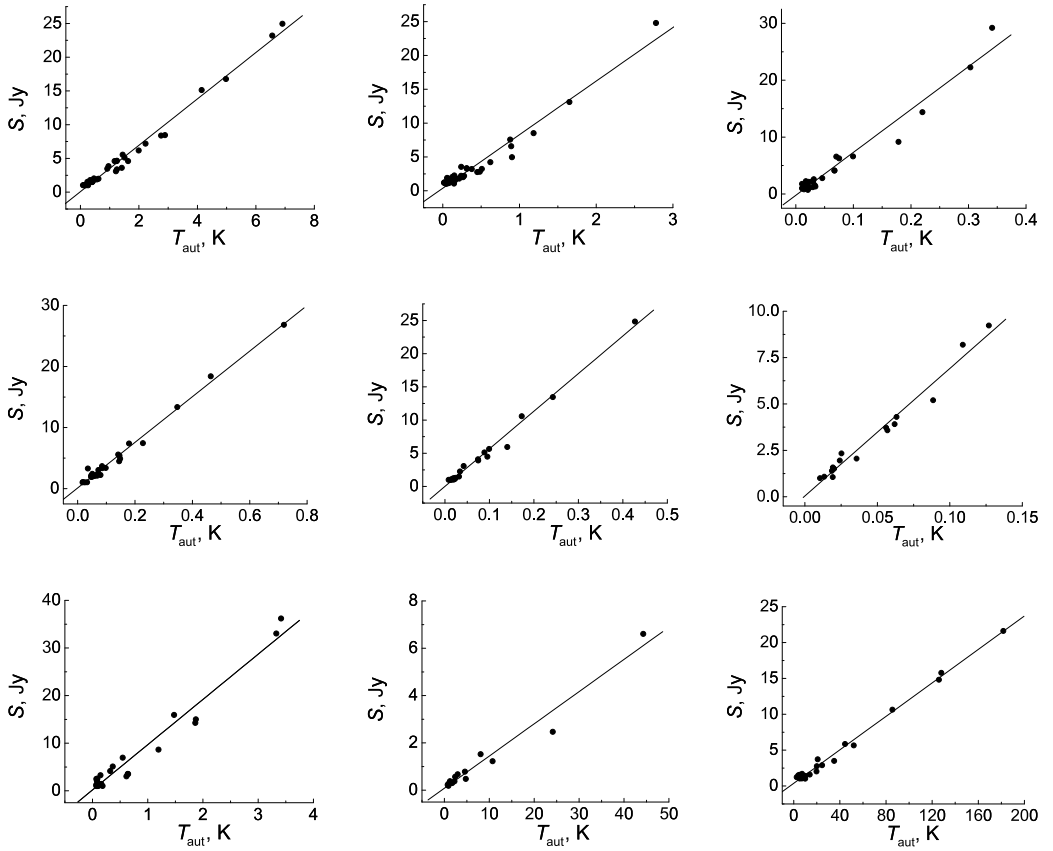


Рис. 3. Пример зависимостей $S(T_{\rm aut})$ для автоматического (AUTO) метода определения интегральной интенсивности для источников каталога Planck на наблюдательных частотах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 857 ГГц (слева направо сверху вниз). Прямыми линиями показаны аппроксимирующие калибровочные кривые. На графиках по оси абсцисс указана температура микроволнового фона в градусах Кельвина, по оси ординат — плотность потока в янских.

Таблица 2. Среднее число положительных $N_{\rm hot}$ и отрицательных ($N_{\rm cold}$) пиков в окрестности радиусом $7'$ в зависимости от отношения сигнал/шум (S/N) на разных уровнях σ по данным 1000 различных положений на случайной гауссовой карте CMB с разрешением $l_{\rm max} = 2500$.

	$N_{\rm hot}$			$N_{\rm cold}$		
S/N	$>1\sigma$	$>2\sigma$	$>3\sigma$	$>1\sigma$	$>2\sigma$	$>3\sigma$
Среднее	0.441	0.095	0.009	0.434	0.090	0.008
Разброс	0.999	0.364	0.095	0.969	0.352	0.089

Таблица 3. Отношение k числа горячих пятен на картах CMB миссии Planck, совпадающих с координатами радиоисточников RCR-каталога с крутыми ($\alpha \leq 0.75$), нормальными ($0.5 < \alpha < 0.75$) и плоскими ($-0.5 < \alpha \leq 0.5$) спектрами к числу радиоисточников соответствующего диапазона α в зависимости от амплитуды пятен в значениях дисперсии шума σ.

σ	$\alpha \leq 0.75$	$0.5 < \alpha < 0.75$	$-0.5 < \alpha \leq 0.5$	Весь диапазон
>1.0	0.417	0.387	0.513	0.450
>2.0	0.116	0.108	0.113	0.113
>3.0	0.009	0.009	0.004	0.007

Таблица 4. Отношение k числа холодных пятен на CMB-картах миссии Planck, совпадающих с координатами радиоисточников RCR-каталога с крутыми ($\alpha \leq 0.75$), нормальными ($0.5 < \alpha < 0.75$) и плоскими ($-0.5 < \alpha \leq 0.5$) спектрами к числу радиоисточников соответствующего диапазона α в зависимости от амплитуды пятен в значениях дисперсии шума σ.

σ	$\alpha \leq 0.75$	$0.5 < \alpha < 0.75$	$-0.5 < \alpha \leq 0.5$	Весь диапазон
>1.0	0.448	0.396	0.378	0.409
>2.0	0.009	0.054	0.070	0.075
>3.0	0.000	0.000	0.004	0.002

изображении слабый; ?s — возможное отождествление, но радиокарта имеет низкое разрешение; EF — пустое поле; * — объект смещен от радиоположения.

В 3-м столбце приведены данные по морфологии (M) радиоисточника: C, c - точечный источник (строчные буквы показывают морфологию в каталоге NVSS); D, d — двойной; T — тройной. В описании морфологии используются следующие дополнительные символы: ? — неуверенная классификация; x, w — x-shaped и winged соответственно; * — для радиоисточника в архиве NRAO имеются карты более высокого, чем у обзоров NVSS или FIRST углового разрешения.

В 4-м столбце показан угловой размер источника (LAS — Largest Angular Size) в угловых секундах — расстояние между самыми дальними компонентами или FWHM для однокомпонентных (точечных) источников. Если морфология источника обозначена малыми буквами, то величина LAS — размер радиоисточника по данным каталога NVSS.

В 5-м столбце указан спектральный индекс (Sp.I.) на частоте 1.4 ГГц.

В 6-м столбце — плотность потока S из NVSS (mJy).

В 7-м столбце — координаты родительского объекта RA+Dec(2000.0) в оптическом диапазоне.

В 8-м столбце — красное смещение z, если известно. Метка p означает фотометрическую оценку z.

В 9-м столбце отмечен тип родительского объекта: G, g, g? обозначают соответственно галактику, подтвержденную спектром, галактики по данным фотометрии и по измерениям в полосах обзора WISE; QSO, qso, qso? — обозначения для аналогичного способа классификации квазаров.

В 10-м столбце даны комментарии о видимом присутствии соседних объектов: d, d? — возможно двойная или пара галактик, буквы означают соответственно совпадение по фотометрическим оценкам z из SDSS и визуальную близость; g, g? — аналогичные случаи для трех и более близких объектов.

В 11-м столбце указа дополнительная информация (AI) из открытых баз данных NED, SIMBAD, VizieR или публикаций: cγBL — candidate gamma-ray blazar; UV — источник УФ (UV) излучения; LRG — яркая красная галактика (luminous red galaxy); X — источник рентгеновского излучения; γ — источник γ-излучения; $\in$Cl, $\in$Tr, $\in$G — галактика в скоплении, в триплете или в группе; AbLS — Absorbtion Line System; BAL — Broad Absorbtion Lines; WEL — имеется слабая эмиссионная линия (Weak Emission Line); v — переменный источник в оптике; HFP —

Таблица 5. Список объектов RCR, для которых имеется положительный отклик на картах микроволнового диапазона в эксперименте Planck. Описание содержимого столбцов и разъяснение обозначений см. в тексте.

Name	OI	M	LAS, arcsec	Sp.I.	S, mJy	RA+Dec (2000.0), hhmmss.ss+ddmmss.s	z	Type	Com.	AI
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
070451.88+050358.9	?s	d	60.7	−0.67	36.8	070453.59+050342.1		g	d?	
071414.01+045526.9	EF	c	18.2	−0.65	21.3					
071900.99+044705.2	?l	c	14.7	−1.09	179.9	071901.00+044705.3		g?		
072043.38+045026.1	?l	c	17.9	−0.26	32.7	072043.42+045028.7		g?		
072630.21+050242.0	+	c	20.1	−0.83	24.4	072630.28+050242.2				
073109.41+045235.8	?l	c	39.5	0.25	7.3	073109.41+045236.6		g?		
073126.50+045301.9	+	c	29.8	−0.10	11.9	073126.49+045300.7		g?		
073357.46+045614.1	+	C*	17.4	0.13	218.8	073357.40+045614.1	3.010	QSO		cγBL
073547.03+045102.8	?s	d	146.6	−0.96	83.7	073547.03+045102.8		g		
073831.90+050346.7	?s	d	75.6	−0.69	103.3	073831.34+050426.7		g		
074325.21+044756.1	?s	d?	40.3	−0.88	65.1	074324.76+044800.6		g		
074452.69+050009.8	+	D	2.1	−1.20	86.5	074452.63+050009.4	2.480	G		
075430.49+050111.4	?s	d	85.3	−0.81	44.7	075430.89+050057.4	0.070	G	d	$\in$G?
075457.19+050632.1	+	c	18.1	−0.67	57.2	075457.23+050632.1		qso?		
075819.07+051046.4	?s	dx?	99.7	−0.93	186.3	075816.26+051112.1	0.3p	G	g?	
080757.60+043234.6	+	C*	17.9	−0.49	509.5	080757.54+043234.6	2.877	QSO		AbL
080947.24+050109.0*	+	C*	18.1	−0.69	35.8	080947.23+050108.8	0.052	G	g	
081848.30+045354.8	?s	E	69.2	0.25	12.9	081848.34+045352.7	0.252	G		
082120.44+050049.9	?s	D?	31.9	−0.97	59.9	082120.55+050048.8		qso?		
082517.80+044921.4	?l	C	2.08	−0.64	25.4	082517.73+044922.6				
083148.89+042938.5*	+	Dw*	10.4	−0.04	1240.9	083148.88+042939.2	0.174	QSO	d	BL+G
084517.13+043946.8*	+	C	1.38	−0.35	382.3	084517.10+043947.0	0.4p	QSO		
090720.04+043619.3	?l	C	1.02	−0.68	314.8	090720.07+043619.8				
091432.29+045537.1	?l	D	20.4	−0.84	28.7	091432.33+045533.9		qso?		
092445.92+050344.9	EF	C	2.62	−0.64	34.7					
092745.31+045614.4	+	D	13.8	−0.75	66.0	092745.34+045614.7	0.341	G	g?	
093354.91+045509.2	+	C	1.49	−0.25	13.1	093354.94+045511.0		qso?		
093609.92+050349.6	+	DC	182.2	−0.79	291.2	093611.00+050202.6	1.674	QSO		
093628.80+043641.2	+	DCw?	42.6	−0.78	129.9	093628.98+043638.9	0.5p	G	g?	
094215.50+043622.3*	+	C	1.06	−0.49	123.6	094215.51+043623.0	0.3p	G		
094839.68+044957.6	+	T	50.5	0.10	12.2	094839.46+044954.8	0.3p	G	d?	
095100.48+051025.0	+	Dx	25.3	−0.72	172.4	095100.53+051026.5	0.2p	G	d?	
095102.08+050643.8	+	C	0.33	−0.50	43.2	095102.10+050643.8		g?		

Таблица 5. (Продолжение)

Name	OI	M	LAS, arcsec	Sp.I.	S, mJy	RA+Dec (2000.0), hhmmss.ss+ddmmss.s	z	Type	Com.	AI
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
100048.62+045603.5	?l	CJ?	3.0	−0.70	50.5	100048.69+045603.2				
101333.26+045752.9	?l	D	13.5	−0.70	43.5	101333.18+045754.2		qso?		
101603.12+051303.6*	+	C*	1.5	0.07	401.2	101603.12+051302.5	1.704	QSO		HFP,BL
103234.45+045925.9	+	D	46.7	−0.62	46.9	103234.44+045925.8	0.242	G		
103846.84+051229.6*	+	T	23.9	−0.05	639.9	103846.79+051229.0	0.473	QSO		blazar,GmR
103938.62+051031.3*	+	Dw*	37.5	−0.74	409.4	103938.74+051032.4	0.068	G	g	GinG
104117.65+045306.4	+	T?	70.3	−0.71	102.4	104115.62+045313.9	0.068	G		
104135.08+044549.5	+	Dw?	10.5	−0.37	31.9	104135.17+044551.1	0.7p	G	g	
104218.38+044304.5	+	C	0.5	−0.93	186.4	104218.36+044304.0				
104346.01+044030.0	+	D	48.9	−0.76	127.2	104345.29+044017.3	1.1p	G	g?	
104551.72+045552.9	+	D?	3.19	−0.84	367.5	104551.75+045551.2	0.4p	G		
105858.61+044347.5	+	C	2.61	0.68	67.8	105858.60+044347.7	2.619	QSO		
105951.12+045352.4	+	D	3.54	−0.95	247.7	105950.84+045354.9		g		
110423.68+044941.1*	+	CL	13.0	−0.79	25.4	110423.58+044942.9	0.026	G		∈G
110935.61+045604.7	+	C	1.91	0.42	8.2	110935.52+045605.7		G	g?	
112417.67+045144.7	+	D	25.1	−0.73	28.5	112418.08+045141.6	0.7p	g?		
112437.45+045618.8	+	D	12.2	−0.86	934.0	112437.40+045618.9	0.283	QSO	g	Sy2
112512.52+045534.5*	EF	C	4.35	0.06	18.7					
113033.47+044734.8	+	C	1.3	−0.31	32.2	113033.47+044733.8	2.1p	QSO?	d?	
113914.55+044330.4	+	DCw?	54.8	−0.86	69.3	113916.25+044321.8	0.5p	G	g?	
114005.50+045952.8	+	D	11.9	−0.74	112.8	114005.61+045953.1	0.6p	g	d?	
114211.28+043740.9	+	DCw	145.1	−0.64	248.0	114208.92+043733.8	0.159	G		
114521.30+045526.7	+	D	4.51	−0.42	666.4	114521.32+045526.8	1.339	QSO	g?	AbL,BAL
114631.64+045818.2	+	C*	2.27	−0.29	185.6	114631.79+045819.6		QSO?	d?	*Sp
115223.70+044814.4	+	D	7.1	−0.83	90.0	115223.72+044814.5	0.4p	G	d?	
115336.08+045505.2	+	C	0.73	0.92	6.1	115335.86+045505.5	0.313	G		
115537.84+045939.9	?l	C	4.87	−1.03	107.1	115537.76+045941.0		g?		
115851.23+045541.9	+	C	1.09	−0.09	26.9	115851.12+045545.6		qso		
121821.21+044954.8	+	T?	30.0	−0.11	23.8	121821.01+044941.3		qso?		
122154.95+042825.1*	+	CL?	6.89	−0.84	444.3	122154.91+042825.7	0.005	G		∈G
122242.25+050044.8	+*	C	2.16	−0.70	27.1	122242.32+050042.2				
123442.26+045123.2	?l	C	1.56	0.41	7.6	123442.36+045125.8				
123932.78+044305.3*	+	C*	1.09	−0.13	353.8	123932.74+044305.5	1.762	QSO		WEL,BL,γ
124145.15+045924.5	+	D	5.75	−0.61	53.9	124145.08+045924.7	0.7p	G		

Таблица 5. (Продолжение)

Name	OI	M	LAS, arcsec	Sp.I.	S, mJy	RA+Dec (2000.0), hhmmss.ss+ddmmss.s	z	Type	Com.	AI
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
125240.81+044828.7	+	C?	2.63	−0.66	265.6	125240.90+044827.6		qso?		
125917.50+044533.4	+	Dx?	68.5	−1.04	69.2	125917.55+044533.6	0.5p	G	g?	
133010.24+050037.5	+	T	27.3	−0.58	33.5	133010.43+050038.0	2.374	QSO		
133218.45+044819.4	+	D	54.6	−0.48	35.2	133219.34+044837.5	0.5p	G		
133303.89+045146.1	+	T	130.1	−0.68	61.3	133307.00+045048.6	1.405	QSO		
133510.39+045415.3	+	C	1.54	0.51	9.5	133510.24+045414.7		g?	d?	
133920.76+050159.3	+	C	3.12	−0.32	46.8	133920.67+050159.2	1.358	QSO		
134012.36+044902.2	+	DC	209.7	−0.78	145.5	134012.42+045044.2	0.2p	G		
134725.53+045509.0	+	DD?	55.0	−0.84	55.7	134725.66+045510.1	0.648	G		
140008.21+050053.9	+	Dw?	27.6	−0.79	98.2	140008.30+050051.8	0.568	G	g?	
140348.39+045632.1	+	C	2.29	0.03	10.4	140348.30+045633.4		g?		
141057.55+050517.9	+	C	3.21	−0.65	72.1	141057.52+050517.0	0.7p	G		
141247.30+045430.0	+	T	62.0	−0.67	35.7	141247.44+045431.4	0.136	G	g?	AbL
141715.51+045020.6	+	D?	4.31	−0.41	29.7	141715.56+045019.9		qso?		
141757.01+045038.1	+	D	5.84	0.52	6.4	141756.89+045044.9	0.594	G	d	
142104.21+050845.0	+	C	0.64	−0.71	290.8	142104.25+050844.9	0.455	G	d	
142409.47+043451.7	+	CJ?*	7.2	−0.19	220.2	142409.49+043452.0	0.666	QSO		BL
142545.16+045041.1	+	C		1.12	4.6	142544.96+045041.7			d?	
143433.74+044646.0	+	DC?	42.1	−0.76	89.1	143432.77+044641.2		g		
143536.42+045158.9	+	DC	152.6	−0.08	17.5	143534.06+045244.0	0.378	QSO		Sy1,BRL
143945.64+045545.2	?l	D	16.1	−1.04	138.0	143945.70+045546.9				
144037.11+050707.3	+	T	29.1	−0.58	87.0	144036.95+050707.4	0.2p	G	d	
144124.08+045557.5	+	D	9.4	−0.16	14.9	144124.13+045556.9	0.399	G	d	
144257.64+045325.5*	+	CL?		−0.27	14.7	144257.85+045330.7	0.006	G		∈Gr
144334.91+045258.5	+	C	1.3	−0.60	46.0	144334.94+045257.5		g?		
144617.88+050740.9	+	Dx?	63.4	−0.73	369.9	144617.95+050741.2	0.273	G		AbL
145032.99+050824.6*	+	D*	9.5	−0.37	103.3	145032.97+050822.5	1.635	QSO		
145323.07+045803.9	+	C	1.21	−0.87	198.6	145323.03+045803.6	0.452	G		
145333.81+045104.2	+	C	1.94	−0.10	30.3	145333.83+045104.2	0.119	G		Sy2
145426.74+044836.2	+	C	3.58	−0.44	29.4	145426.79+044835.6	0.4p	G	g?	
145625.83+045645.2	+	C	2.17	−0.94	287.9	145625.79+045644.6	2.130	QSO		
151052.23+045206.7	+	C	1.86	−0.14	6.6	151052.21+045203.8	0.081	G		∈Cl
151054.66+045410.6	+	D	83.1	−0.54	13.5	151056.32+045357.8	0.399	G	d	
151323.49+045022.6	+	T	38.6	−0.69	50.3	151323.47+045022.3	0.2p	G		

Таблица 5. (Продолжение)

Name	OI	M	LAS, arcsec	Sp.I.	S, mJy	RA+Dec (2000.0), hhmmss.ss+ddmmss.s	z	Type	Com.	AI
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
151543.71+050330.0	+	D?	4.26	−0.69	40.4	151543.63+050331.6				
151855.13+045114.5	+	C	1.2	−0.82	47.4	151855.14+045114.0		g		
152026.93+045713.3	+	C	2.18	−0.47	17.4	152026.77+045714.5		g?	g?	
152114.51+043020.0	+	C	0.89	−0.66	3927.2	152114.44+043021.8	1.296	G		
153032.13+045050.2	?l	C	2.55	−0.63	35.2	153032.02+045050.6				
153506.68+050735.4	+	D	10.8	−0.69	126.6	153506.29+050733.5	0.2p	g	d?	
154333.90+045219.3	+	C*	1.61	−0.08	282.4	154333.92+045219.3	0.040	G		∈Tr
155021.76+050630.2	+*	D?	2.31	−0.43	101.4	155021.58+050634.0		g		
155035.26+052710.6*	+	C*	1.13	−0.07	2303.3	155035.27+052710.4	1.417	QSO		HP
155148.09+045930.5	+	D	11.6	−1.10	221.6	155148.06+045930.9	1.3p	g	g?	
155431.52+051726.7	+	T?	22.5	−0.77	277.7	155431.54+051724.2		g	d?	
161637.49+045932.8*	+	C*	0.76	0.05	328.5	161637.56+045932.9	3.215	QSO	d	HFP,X
161907.23+045559.5	+	DC	35.5	−1.06	94.5	161907.33+045559.0		g	g?	
165833.47+051515.6*	+	c	18.8	−0.11	1533.8	165833.42+051516.7	0.879	QSO		HP,X
165920.67+050550.5	+	c	19.5	−0.14	36.9	165920.60+050551.0		qso?		
165957.66+045156.3	?s	c	16.8	−0.68	49.6	165957.70+045154.2				

Таблица 6. Оценки плотности потока в Янских для радиоисточников RCR-каталога по данным измерений максимумов на картах микроволнового фона эксперимента Planck. В столбцах таблицы приведены имя объекта по данным NVSS и оценки плотности потока на частотах Planck (30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц) с величиной ошибки по данным дисперсии на площадках размером $30' \times 30'$. Символ * после имени отмечает источник, измерения плотности потока которого на какой-либо из частот приведены в каталоге обзора Planck.

Name	S_{30}	S_{44}	S_{70}	S_{100}	S_{143}	S_{217}	S_{353}	S_{545}	S_{857}
0704+0503	$.06 \pm .04$	–	–	–	$.13 \pm .08$	$.11 \pm .06$	$.207 \pm .104$	–	–
0714+0455	–	–	$.03 \pm .04$	–	–	$.09 \pm .06$	–	–	$1.28 \pm .55$
0719+0447	$.07 \pm .04$	–	–	–	–	–	–	–	–
0720+0450	–	–	–	–	$.14 \pm .07$	$.21 \pm .10$	$1.2 \pm .6$	5.0 ± 2.5	18.6 ± 9.3
0726+0502	$.08 \pm .04$	–	–	$.22 \pm .10$	$.48 \pm .20$	$.26 \pm .12$	$.13 \pm .06$	$.50 \pm .25$	$1.23 \pm .55$
0731+0452	–	–	–	–	$.16 \pm .07$	$.07 \pm .05$	$.16 \pm .08$	$.22 \pm .10$	$.66 \pm .33$
0731+0453	–	–	–	–	–	$.06 \pm .08$	$.16 \pm .08$	–	–
0733+0456	–	–	$.39 \pm .15$	$.18 \pm .10$	$.21 \pm .09$	–	$.14 \pm .10$	$.38 \pm .14$	–
0735+0451	–	–	$.23 \pm .09$	$.21 \pm .10$	$.27 \pm .13$	$.33 \pm .15$	$1.5 \pm .8$	5.4 ± 2.5	18.6 ± 8.5
0738+0503	$.07 \pm .04$	–	–	–	$.08 \pm .07$	–	$.11 \pm .05$	–	–
0743+0447	–	$.18 \pm .09$	$.06 \pm .06$	$.07 \pm .07$	$.10 \pm .08$	$.05 \pm .07$	$.19 \pm .08$	$.283 \pm .14$	$.44 \pm .22$
0744+0500	–	$.17 \pm .08$	–	–	–	–	$.19 \pm .08$	$.266 \pm .13$	$.53 \pm .25$

Таблица 6. (Продолжение)

Name	S_{30}	S_{44}	S_{70}	S_{100}	S_{143}	S_{217}	S_{353}	S_{545}	S_{857}
0754+0501	–	–	–	$.06 \pm .07$	$.07 \pm .07$	$.10 \pm .06$	$.16 \pm .08$	–	–
0754+0506	$.06 \pm .04$	–	–	$.07 \pm .07$	$.06 \pm .07$	$.08 \pm .05$	–	$.12 \pm .07$	$.50 \pm .25$
0758+0510	–	$.17 \pm .08$	$.25 \pm .10$	–	–	$.02 \pm .05$	–	–	–
0807+0432	–	–	$.50 \pm .21$	$.15 \pm .10$	$.45 \pm .20$	$.24 \pm .12$	–	–	–
0809+0501*	–	–	–	–	–	$.16 \pm .08$	$.32 \pm .15$	$.28 \pm .14$	$1.07 \pm .45$
0818+0453	–	$.20 \pm .09$	–	–	–	$.06 \pm .06$	$.17 \pm .08$	$.43 \pm .21$	$1.00 \pm .50$
0821+0500	–	$.20 \pm .10$	–	–	–	$.08 \pm .05$	$.21 \pm .14$	$.39 \pm .19$	$.93 \pm .45$
0825+0449	–	–	–	–	–	–	$.11 \pm .05$	$.27 \pm .13$	$1.70 \pm .68$
0831+0429*	$.28 \pm .14$	–	$.64 \pm .20$	$.59 \pm .20$	$.58 \pm .25$	$.54 \pm .25$	$.54 \pm .26$	$.62 \pm .30$	$.78 \pm .35$
0845+0439*	–	–	–	$.10 \pm .07$	$.08 \pm .08$	$.11 \pm .06$	$.18 \pm .09$	$.31 \pm .15$	$.85 \pm .38$
0907+0436	$.11 \pm .06$	–	–	–	–	–	$.24 \pm .12$	$.54 \pm .26$	$2.43 \pm .90$
0914+0455	–	–	–	–	–	–	$.08 \pm .04$	$.51 \pm .25$	$1.24 \pm .52$
0924+0503	–	–	$.06 \pm .06$	–	–	–	$.14 \pm .07$	$.88 \pm .44$	$2.09 \pm .95$
0927+0456	–	$.19 \pm .10$	–	–	–	–	–	–	–
0933+0455	–	–	–	–	–	–	$.20 \pm .09$	$.32 \pm .16$	$.80 \pm .40$
0936+0503	$.07 \pm .04$	–	–	$.06 \pm .06$	–	–	$.09 \pm .05$	–	–
0936+0436	$.06 \pm .04$	–	–	–	–	–	$.32 \pm .16$	$.46 \pm .23$	2.68 ± 1.30
0942+0436*	–	–	$.08 \pm .08$	$.14 \pm .07$	$.20 \pm .10$	$.42 \pm .21$	$.39 \pm .18$	$.52 \pm .26$	–
0948+0449	$.06 \pm .04$	–	–	$.15 \pm .07$	$.50 \pm .20$	$.66 \pm .33$	$.16 \pm .08$	–	–
0951+0510	–	$.19 \pm .09$	–	–	–	–	–	–	–
0951+0506	–	–	–	–	–	–	–	$.13 \pm .07$	$.46 \pm .25$
1000+0456	–	$.18 \pm .08$	–	–	$.06 \pm .07$	–	–	$.20 \pm .10$	$.54 \pm .24$
1013+0457	–	–	–	$.11 \pm .08$	$.07 \pm .07$	$.17 \pm .07$	$.12 \pm .06$	$.31 \pm .16$	–
1016+0513*	–	–	–	$.09 \pm .06$	$.13 \pm .07$	$.13 \pm .06$	$.33 \pm .15$	–	$1.16 \pm .55$
1032+0459	–	–	–	–	–	–	$.21 \pm .11$	$.38 \pm .19$	$1.31 \pm .65$
1038+0512*	$1.12 \pm .2$	$.68 \pm .30$	$1.34 \pm .50$	$.27 \pm .11$	$.16 \pm .10$	$.08 \pm .06$	–	$.16 \pm .08$	–
1039+0510*	–	–	–	–	–	–	$.13 \pm .06$	$.19 \pm .10$	$1.01 \pm .49$
1041+0453	–	–	–	–	–	$.08 \pm .05$	$.08 \pm .03$	–	–
1041+0445	–	–	–	–	$.13 \pm .08$	–	–	–	$.37 \pm .18$
1042+0443	–	$.18 \pm .09$	$.02 \pm .04$	$.07 \pm .06$	–	$.04 \pm .07$	$.20 \pm .10$	–	–
1043+0440	–	–	$.06 \pm .05$	$.06 \pm .07$	$.12 \pm .07$	–	$.16 \pm .08$	$.31 \pm .15$	$.64 \pm .31$
1045+0455	$.06 \pm .04$	$.19 \pm .09$	–	$.07 \pm .06$	–	–	$.09 \pm .05$	–	–
1058+0443	–	$.186 \pm .09$	–	–	–	–	–	–	–
1059+0453	$.07 \pm .04$	–	–	–	–	–	$.12 \pm .06$	$.45 \pm .22$	–
1104+0449*	–	–	–	–	–	–	–	$.66 \pm .32$	$1.19 \pm .50$
1109+0456	–	–	–	–	–	–	$.21 \pm .10$	$1.12 \pm .50$	–

Таблица 6. (Продолжение)

Name	S_{30}	S_{44}	S_{70}	S_{100}	S_{143}	S_{217}	S_{353}	S_{545}	S_{857}
1124+0451	–	–	$.15 \pm .07$	–	–	–	–	–	–
1124+0456	–	–	–	$.10 \pm .06$	–	–	$.21 \pm .10$	$.48 \pm .24$	$1.53 \pm .69$
1125+0455*	–	–	–	–	–	$.28 \pm .14$	–	$1.5 \pm .7$	3.24 ± 1.62
1130+0447	$.07 \pm .04$	–	–	–	–	–	$.39 \pm .20$	$.53 \pm .26$	$1.83 \pm .90$
1139+0443	–	–	–	–	–	–	$.17 \pm .08$	–	$.78 \pm .37$
1140+0459	–	–	–	$.08 \pm .06$	–	–	$.17 \pm .09$	$.22 \pm .10$	$.57 \pm .28$
1142+0437	–	–	$.26 \pm .16$	–	–	$.07 \pm .09$	$.16 \pm .08$	$.59 \pm .30$	$.74 \pm .36$
1145+0455	–	–	–	–	–	$.18 \pm .16$	$.12 \pm .06$	$.22 \pm .11$	–
1146+0458	–	–	–	$.13 \pm .08$	$.23 \pm .12$	–	$.09 \pm .05$	–	–
1152+0448	–	–	–	–	–	–	$.14 \pm .07$	$.46 \pm .23$	$.66 \pm .33$
1153+0455	–	–	–	$.12 \pm .08$	$.20 \pm .10$	$.39 \pm .19$	$.13 \pm .07$	–	–
1155+0459	–	–	$.07 \pm .07$	$.09 \pm .08$	$.08 \pm .08$	$.05 \pm .06$	$.10 \pm .05$	$.14 \pm .07$	$.68 \pm .32$
1158+0455	$.09 \pm .04$	$.19 \pm .10$	–	$.08 \pm .06$	–	–	$.14 \pm .08$	–	–
1218+0449	–	$.18 \pm .09$	–	–	$.24 \pm .12$	–	–	$.18 \pm .09$	$.48 \pm .24$
1221+0428*	–	$.26 \pm .12$	–	$.07 \pm .07$	–	$.35 \pm .17$	$1.5 \pm .7$	4.9 ± 2.4	17.8 ± 8.8
1222+0500	–	–	–	–	–	–	$.13 \pm .07$	$.18 \pm .09$	$.68 \pm .34$
1234+0451	–	–	–	–	–	$.04 \pm .04$	$.10 \pm .05$	$.21 \pm .10$	$.62 \pm .31$
1239+0443*	$.28 \pm .12$	–	$1.10 \pm .40$	$.52 \pm .20$	$.43 \pm .20$	$.40 \pm .17$	$.29 \pm .15$	$.23 \pm .11$	–
1241+0459	$.07 \pm .05$	–	–	–	–	$.07 \pm .06$	$.15 \pm .08$	–	–
1252+0448	$.07 \pm .04$	–	–	–	–	–	$.25 \pm .13$	$.59 \pm .29$	$.76 \pm .38$
1259+0445	–	–	–	$.06 \pm .07$	–	–	$.17 \pm .08$	$.44 \pm .22$	$1.2 \pm .5$
1330+0500	–	–	$.05 \pm .06$	$.08 \pm .07$	$.06 \pm .07$	$.12 \pm .10$	$.15 \pm .09$	$.36 \pm .18$	$1.3 \pm .6$
1332+0448	–	–	–	–	–	–	$.11 \pm .06$	$.12 \pm .06$	$.75 \pm .37$
1333+0451	–	–	–	$.05 \pm .07$	–	–	$.18 \pm .09$	–	–
1335+0454	–	–	–	$.14 \pm .07$	$.23 \pm .12$	$.12 \pm .09$	$.17 \pm .08$	$.24 \pm .12$	$1.2 \pm .5$
1339+0501	–	–	–	–	–	–	–	$.21 \pm .11$	$.85 \pm .41$
1340+0449	–	–	–	$.09 \pm .06$	–	–	$.10 \pm .06$	–	–
1347+0455	–	–	–	$.08 \pm .07$	$.11 \pm .08$	–	–	–	–
1400+0500	–	–	–	$.08 \pm .06$	$.08 \pm .08$	–	$.21 \pm .10$	$.46 \pm .23$	$.42 \pm .21$
1403+0456	$.08 \pm .04$	$.19 \pm .10$	–	–	$.08 \pm .08$	$.11 \pm .09$	$.14 \pm .07$	$.16 \pm .08$	–
1410+0505	–	$.18 \pm .09$	$.76 \pm .35$	–	$.38 \pm .12$	$.16 \pm .08$	$.13 \pm .06$	–	–
1412+0454	$.07 \pm .04$	–	–	$.08 \pm .06$	$.05 \pm .07$	–	$.10 \pm .06$	$.18 \pm .09$	–
1417+0450	–	–	–	$.14 \pm .08$	–	$.12 \pm .09$	$.21 \pm .11$	$.15 \pm .08$	–
1417+0450	$.06 \pm .04$	–	–	–	–	–	$.09 \pm .05$	$.23 \pm .12$	$.85 \pm .42$
1421+0508	$.06 \pm .04$	–	–	$.08 \pm .06$	–	–	$.32 \pm .15$	$.77 \pm .35$	$1.0 \pm .5$
1424+0434	$.15 \pm .07$	–	$.11 \pm .06$	–	$.11 \pm .07$	$.10 \pm .07$	$.10 \pm .05$	–	–

Таблица 6. (Продолжение)

Name	S_{30}	S_{44}	S_{70}	S_{100}	S_{143}	S_{217}	S_{353}	S_{545}	S_{857}
1425+0450	–	–	–	$.08 \pm .07$	–	–	$.15 \pm .07$	$.40 \pm .20$	$.94 \pm .47$
1434+0446	–	–	$.59 \pm .29$	$.08 \pm .07$	$.06 \pm .07$	$.28 \pm .15$	$.19 \pm .10$	$.29 \pm .14$	$.64 \pm .32$
1435+0451	–	–	$.07 \pm .10$	–	–	–	–	–	$.96 \pm .48$
1439+0455	–	–	–	$.07 \pm .06$	–	$.03 \pm .06$	$.20 \pm .10$	$.40 \pm .19$	$1.2 \pm .6$
1440+0507	–	$.17 \pm .08$	–	–	–	–	$.12 \pm .07$	$.34 \pm .17$	$.42 \pm .21$
1441+0455	–	–	–	–	–	$.13 \pm .06$	$.24 \pm .12$	$.26 \pm .13$	$.50 \pm .25$
1442+0453*	–	–	–	–	–	$.03 \pm .05$	$.15 \pm .08$	$.57 \pm .28$	$1.8 \pm .9$
1443+0452	–	–	–	–	$.06 \pm .07$	–	–	$.16 \pm .08$	$.64 \pm .32$
1446+0507	–	–	–	–	$.12 \pm .07$	$.16 \pm .08$	$.15 \pm .08$	$.15 \pm .07$	–
1450+0508*	–	–	–	–	–	$.15 \pm .10$	–	–	–
1453+0458	$.09 \pm .06$	–	–	$.08 \pm .07$	–	–	$.126 \pm .060$	$.40 \pm .20$	$.6 \pm .3$
1453+0451	–	–	–	$.10 \pm .07$	–	$.22 \pm .11$	$.214 \pm .100$	$.16 \pm .08$	–
1454+0448	$.07 \pm .04$	–	$.26 \pm .11$	$.10 \pm .07$	$.28 \pm .14$	–	$.167 \pm .080$	–	–
1456+0456	–	–	$.54 \pm .20$	$.07 \pm .07$	$.08 \pm .07$	$.06 \pm .07$	–	$.09 \pm .07$	–
1510+0452	$.07 \pm .04$	–	–	–	–	–	–	–	$2.0 \pm .9$
1510+0454	–	–	–	–	–	–	$.22 \pm .14$	$1.2 \pm .6$	–
1513+0450	–	–	–	$.08 \pm .07$	–	–	$.21 \pm .11$	$.33 \pm .17$	$1.7 \pm .8$
1515+0503	$.10 \pm .06$	$.19 \pm .10$	–	$.08 \pm .07$	$.15 \pm .08$	$.14 \pm .08$	$.24 \pm .12$	$.26 \pm .13$	$.70 \pm .35$
1518+0451	–	–	$.21 \pm .12$	–	–	–	$.10 \pm .05$	$.11 \pm .06$	$.64 \pm .32$
1520+0457	–	–	–	$.09 \pm .06$	$.06 \pm .07$	$.04 \pm .06$	–	–	–
1521+0430	–	–	–	$.06 \pm .07$	–	–	$.26 \pm .15$	$.67 \pm .33$	2.5 ± 1.2
1530+0450	–	–	$.02 \pm .030$	–	–	–	$.24 \pm .13$	$.20 \pm .10$	$.74 \pm .40$
1535+0507	–	–	–	–	$.07 \pm .07$	$.05 \pm .05$	$.17 \pm .09$	$.20 \pm .10$	–
1543+0452	$.06 \pm .05$	$.21 \pm .09$	–	$.12 \pm .06$	$.18 \pm .09$	$.16 \pm .10$	$.22 \pm .11$	$.28 \pm .17$	–
1550+0506	–	–	–	–	–	–	$.14 \pm .08$	$.45 \pm .22$	$1.7 \pm .8$
1550+0527*	$2.23 \pm .50$	–	3.59 ± 1.60	$1.56 \pm .50$	$1.2 \pm .5$	–	$.58 \pm .26$	$.27 \pm .13$	–
1551+0459	–	$.20 \pm .09$	$.50 \pm .25$	–	–	–	$.31 \pm .15$	$.58 \pm .29$	$1.9 \pm .9$
1554+0517	$.06 \pm .04$	–	–	–	$.10 \pm .07$	$.20 \pm .08$	$.16 \pm .08$	$.43 \pm .21$	–
1616+0459*	$.65 \pm .20$	–	–	$.12 \pm .06$	$.22 \pm .10$	$.32 \pm .16$	$.13 \pm .06$	$.14 \pm .06$	–
1619+0455	$.07 \pm .05$	$.19 \pm .09$	–	–	$.05 \pm .07$	–	$.15 \pm .07$	–	$.67 \pm .33$
1658+0515*	$.91 \pm .30$	$.72 \pm .26$	$.21 \pm .12$	$.15 \pm .07$	$.27 \pm .15$	–	$.65 \pm .30$	2.5 ± 1.2	7.5 ± 3.7
1659+0505		–	$.76 \pm .30$	–	–	–	–	–	–
1659+0451	$.07 \pm .034$	–	–	$.10 \pm .06$	–	–	–	–	–

объект с пиком излучения на высокой частоте (high frequency peaker), HP — объект с высокой степенью поляризации в оптике (high optical polarization).

На рис. 4 показаны непрерывные спектры радиоисточников от радио до субмиллиметрового диапазона, соответствующие таблице 6, которые отсутствуют в каталоге Planck. Для удобства представления имена источников на рисунках сокращены до минутных значений: hhmm+ddmm. На отдельном рисунке (рис. 5) приведены непрерывные радиоспектры RCR-источников, имеющих отождествление в каталоге обзора Planck, по данным радиообзоров и измерениям на картах Planck. Данные из каталогов Planck отмечены заштрихованными треугольниками на высоких частотах. Оценки плотностей потоков данной работы показаны пустыми треугольниками.

На рис. 6 приведен средний спектр RCR-радиоисточников, построенный по осредненным данным в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Отметим, что спектр имеет две особенности: локальный пик на 70 ГГц и подъем в субмиллиметровом диапазоне ($\nu > 143$ ГГц).

На рис. 7 показаны типичные случаи распределения микроволнового фона (карты), построенные по данным наблюдений обсерватории Planck в области радиоисточников. На карты наложены радиоизофоты обзора NVSS.

2.5. Отождествление выборки RCR-радиоисточников в оптическом и инфракрасном диапазонах

Отождествление радиоисточников проводилось по оптическим обзорам DPOSS [29] и SDSS [30] и обзорам инфракрасного диапазона LAS UKIDSS [31] и WISE [32] по методике, описанной в работе [19, 22], с использованием радиокарт обзоров NVSS [33] и FIRST [34] с привлечением в отдельных случаях карт более высокого углового разрешения из архива NRAO.[5] Отождествление RCR-источников было проведено в [22] для всех объектов исходного списка RCR [21], но результаты были проверены по новым релизам SDSS DR10 [35] и UKIDSS DR9 LAS. Дополнительная, имеющаяся в NED, VizieR и ADS информация об источниках, включающая спектральные красные смещения и ссылки на работы с их определением, приведена в комментариях к источникам.

Результаты отождествления собраны в таблице 5. Рисунки с наложением радиоконтуров на изображения SDSS и/или BTA, UKIDSS LAS, WISE приведены в информационной системе с результатами отождествления каталога RCR[6] [36]. Ниже приведены комментарии для отдельных источников.

RCR J070451.88+050358.9 (NVSS J070455+050326 и NVSS J070451+050358). Возможный вариант отождествления с учетом сравнительно низкого углового разрешения обзора NVSS — галактика UGPS J070453.63+050342.1. На изображении в фильтре K обзора UGPS (UKIDSS Galactic Plane Survey) [37] рядом с отождествлением на расстоянии $1''.8$ и $4''.8$ находятся еще два объекта, причем ближайший отсутствует в каталоге UGPS DR6, — предположительно пара AGN.

RCR J071414.01+045526.9 (NVSS J071414+045526). Пустое поле.

RCR J071900.99+044705.2 (NVSS J071900+044705; PMN J0718+0447). На карте 2MASS (фильтр J) при визуальном осмотре обнаружен слабый объект. На картах WISE (полосы $W1$ и $W2$) также присутствует слабый объект, отсутствующий в каталоге.

RCR J072043.38+045026.1 (NVSS J072043+045026). На картах WISE ($W1$ и $W2$) при визуальном осмотре обнаружен слабый объект, отсутствующий в каталоге.

RCR J072630.21+050242.0 (NVSS J072630+050242). Отождествляется с объектом каталога WISE Data Release [32] J072630.13+050241.7.

RCR J073109.41+045235.8 (NVSS J073109+045235). На картах WISE ($W1$ и $W2$) при визуальном осмотре обнаружен слабый объект, отсутствующий в каталоге.

RCR J073126.50+045301.9 (NVSS J073126+045301). Отождествляется с объектом каталога WISE J073126.45+045301.9.

RCR J073357.46+045614.1 (NVSS J073357+045614; PMN J0733+0456). BZQ (blazar of the FSRQ type), входит в каталог Candidate Gamma-Ray Blazar Survey (CGRaBS) [38]. В этой же работе определено спектральное красное смещение.

RCR J073547.03+045102.8 (NVSS J073542+045147 и NVSS J073550+045020). Из-за низкого углового разрешения NVSS отождествление этого двойного радиоисточника с WISE J073547.03+045104.3 мы считаем возможным вариантом.

RCR J073831.90+050346.7 (NVSS J073831+050500 и NVSS J073831+050346). Возможный вариант отождествления двойного радиоисточника

[5] http://archive.nrao.edu/archive/archiveimage.html

[6] http://www.sao.ru/fetch/cgi-bin/SkyObj/rcrn.cgi

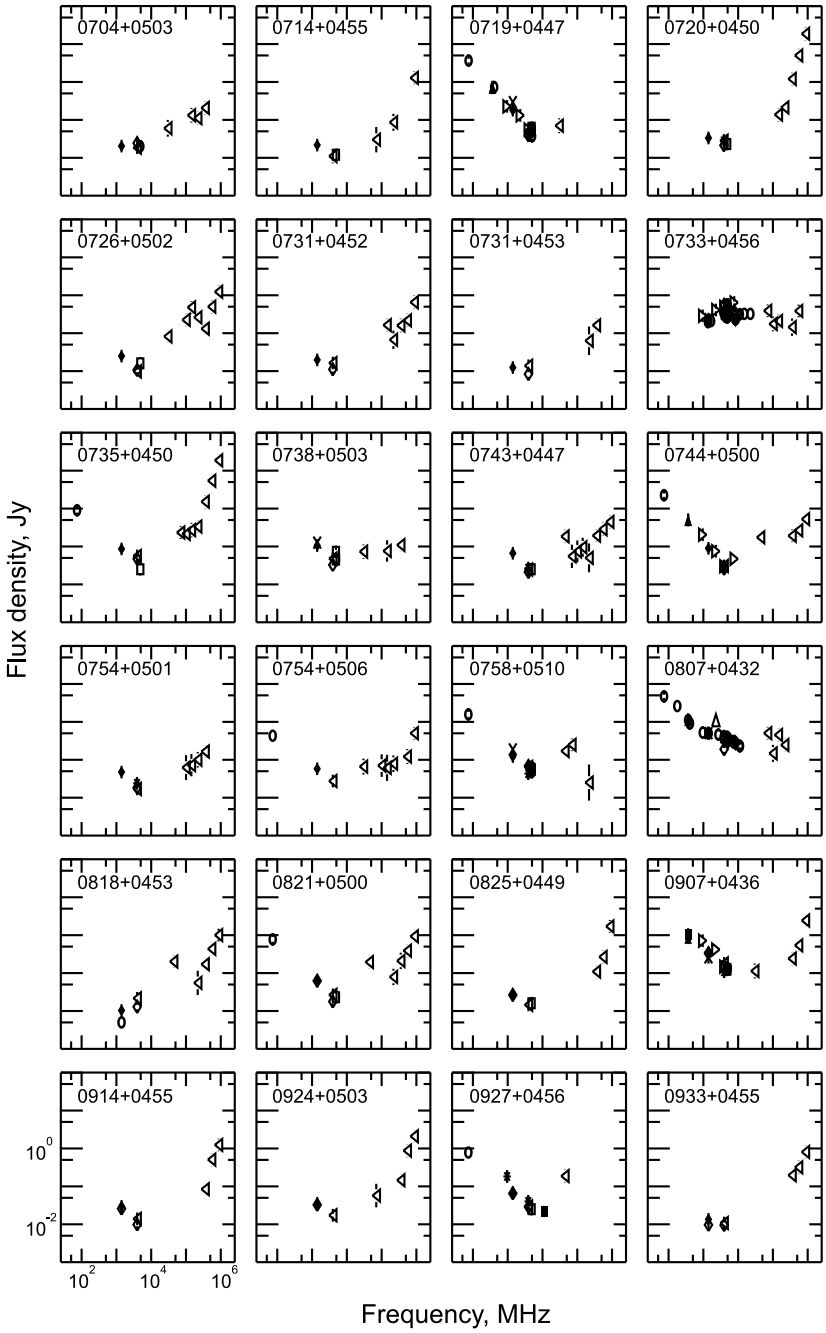


Рис. 4. Непрерывные радиоспектры RCR-источников, не имеющих отождествления в списках каталога миссии Planck, от радио до субмиллиметрового диапазона.

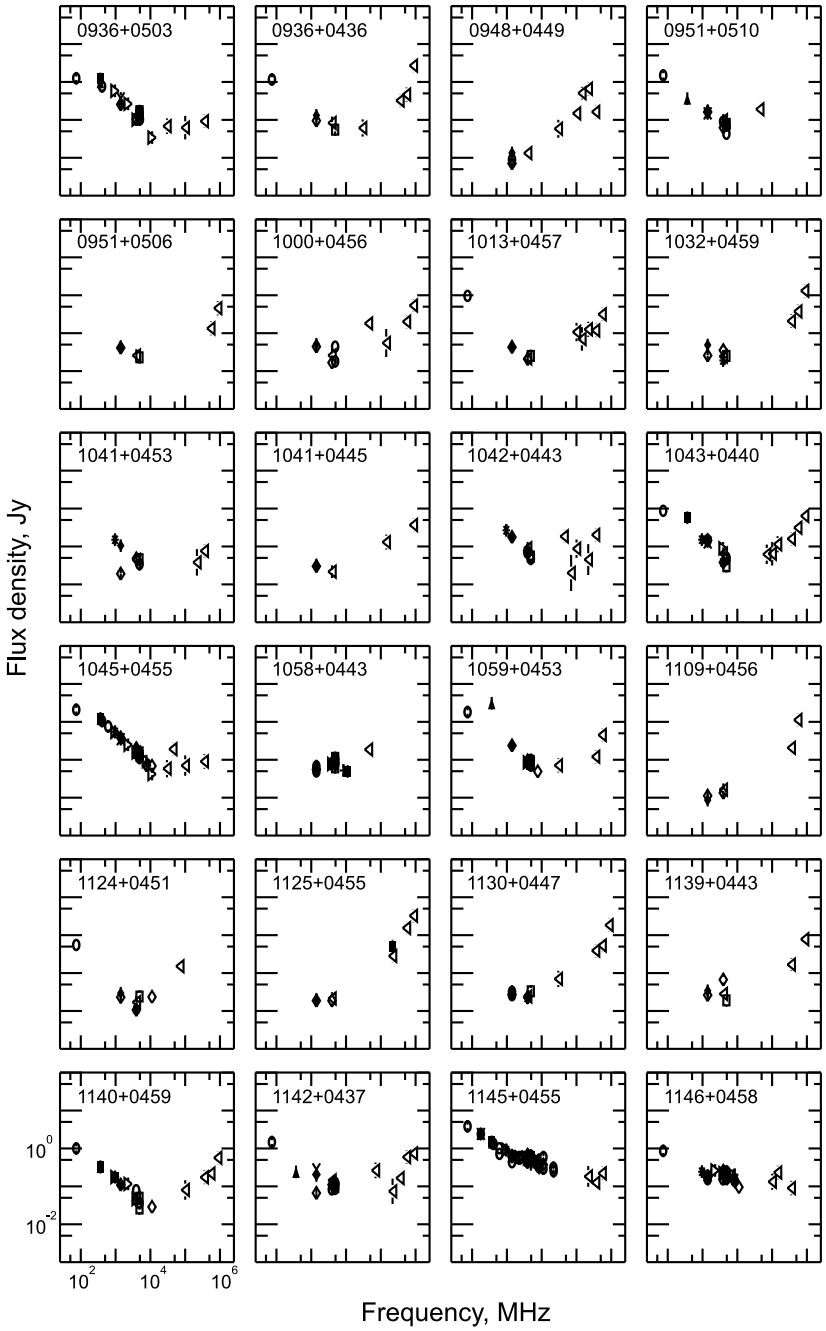


Рис. 4. (Продолжение)

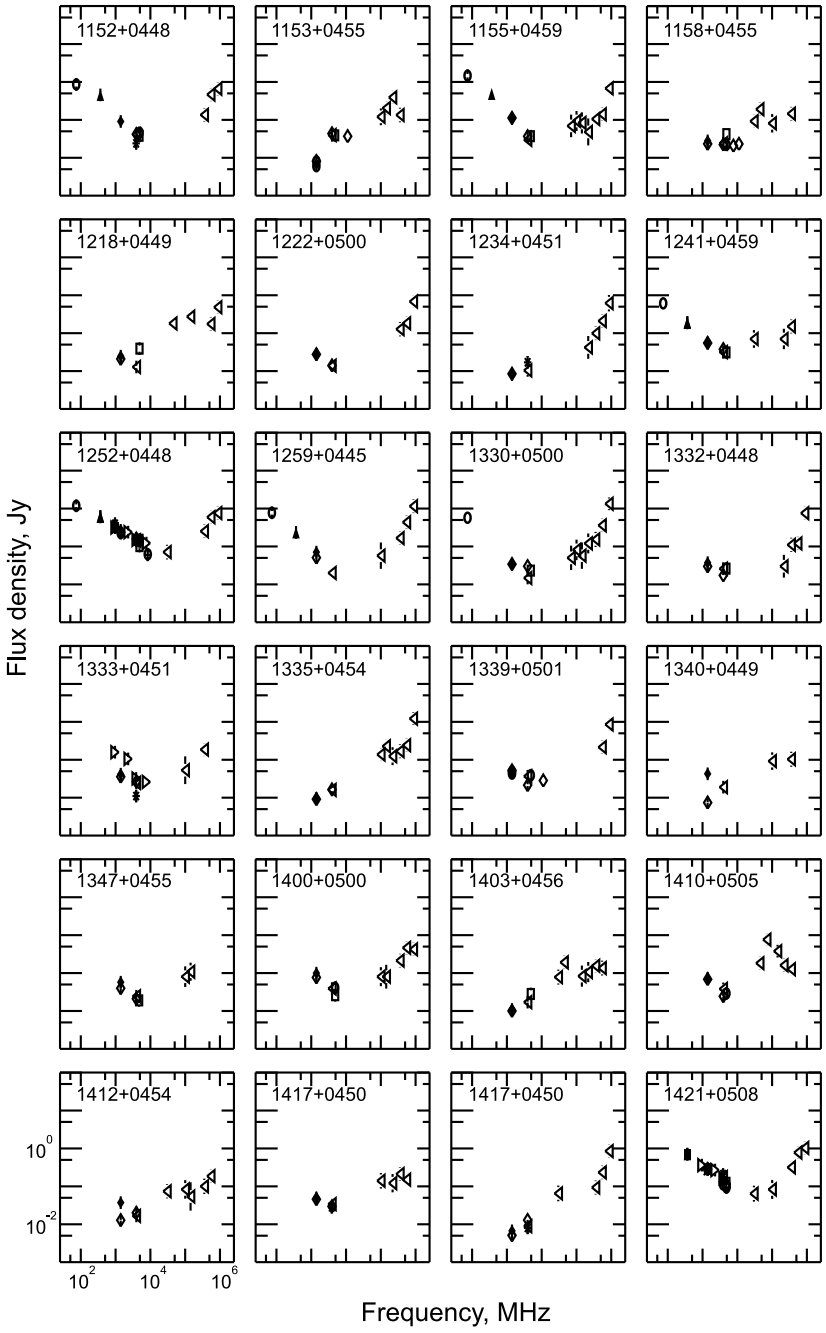


Рис. 4. (Продолжение)

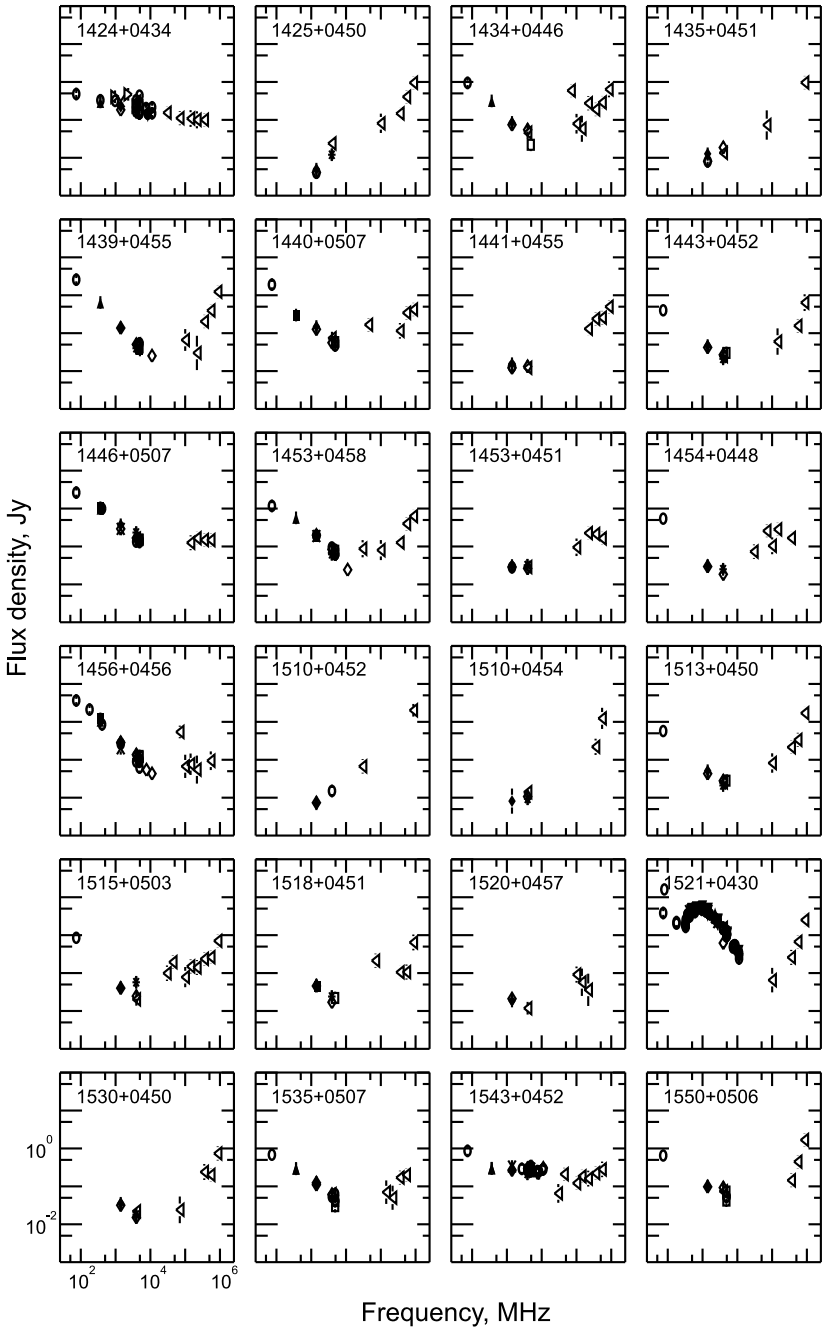


Рис. 4. (Продолжение)

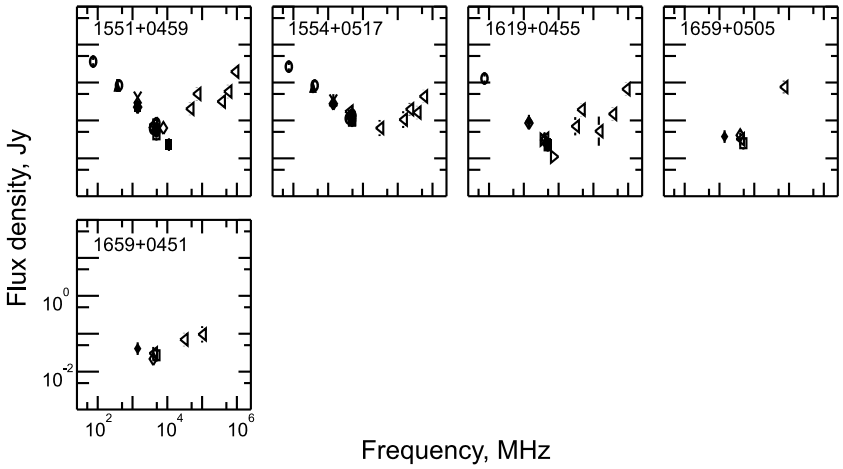


Рис. 4. (Продолжение)

с учетом сравнительно низкого углового разрешения обзора NVSS — WISE J073831.37+050426.1. На изображениях обзора 2MASS объект обнаруживается, но отсутствует в каталоге.

RCR J074325.21+044756.1 (NVSS J074325+044756). Возможный вариант отождествления радиоисточника — USNO-B1.0 0947-0144615 или WISE J074324.79+044759.7.

RCR J074452.69+050009.8 (NVSS J074452+050009). Отождествление и определение красного смещения ($z = 2.480$ по узкой линии Lyα) этой слабой галактики ($R = 24.5$) выполнено по программе "Большое Трио" [39].

RCR J075430.49+050111.4 (NVSS J075430+050111 и NVSS J075426+050011). Возможный вариант отождествления двойного радиоисточника — SDSS9 J075430.88+050057.5 ($z = 0.070065$ из 2MRS [40]). В окрестности этой галактики находится еще одна галактика SDSS9 J075430.21+050100.1.

RCR J075457.19+050632.1 (NVSS J075457+050632). Отождествляется с объектом WISE J075457.22+050633.1. На r,i-картах SDSS при визуальном осмотре обнаружен слабый объект, отсутствующий в каталоге.

RCR J075819.07+051046.4 (NVSS J075457+050632 и NVSS J075814+051157). Возможный вариант отождествления двойного радиоисточника — SDSS J075816.26+051112.0. Эта галактика входит в каталог LRG (Luminous Red Galaxies) [41]. Выделяется в окружении группы близко расположенных галактик яркостью блеска в полосах WISE $W1$,$W2$.

RCR J080757.60+043234.6 (NVSS J080757+043234; 4C 05.34). FSRS отождествлен с квазаром $z = 2.877$ [42] с несколькими ABLS (absorption line system). Объект является переменным в оптическом диапазоне и содержит рентгеновский источник с UV-избытком.

RCR J080947.24+050109.0 (NVSS J080947+050109). Отождествлен с галактикой 2MASX J08094723+050109 с $z = 0.052$ [43]. Взаимодействующая галактика, высокой светимости в ИК-диапазоне.

RCR J081848.30+045354.8 (NVSS J081848+045354 и NVSS J081853+045338). Слабый протяженный источник, который не детектируется обзором FIRST. Возможный вариант отождествления двойного радиоисточника — SDSS J081848.35+045352.7 ($z = 0.252$, SDSS DR10).

RCR J082120.44+050049.9 (NVSS J082120+050049). Отождествление этого двойного радиоисточника (по картам FIRST) осложнено близким ярким объектом, Возможный вариант отождествления — SDSS J082120.55+050048.4.

RCR J082517.80+044921.4 (NVSS J082517+044921). Отождествляется со слабым объектом, который виден на сумме кадров H и K обзора UKIDSS LAS. На картах обзора WISE ($W1$,$W2$) он различим в крыльях более яркого объекта.

RCR J083148.89+042938.5 (NVSS J083148+042938). FSRS отождествлен с BL Lac-объектом, активным в оптическом и ИК-диапазонах и демонстрирующим сильные внутрисуточные изменения поляризации и полного потока. Имеет соседа SDSS J083147.16+042950.8 с $z = 0.175$ [44].

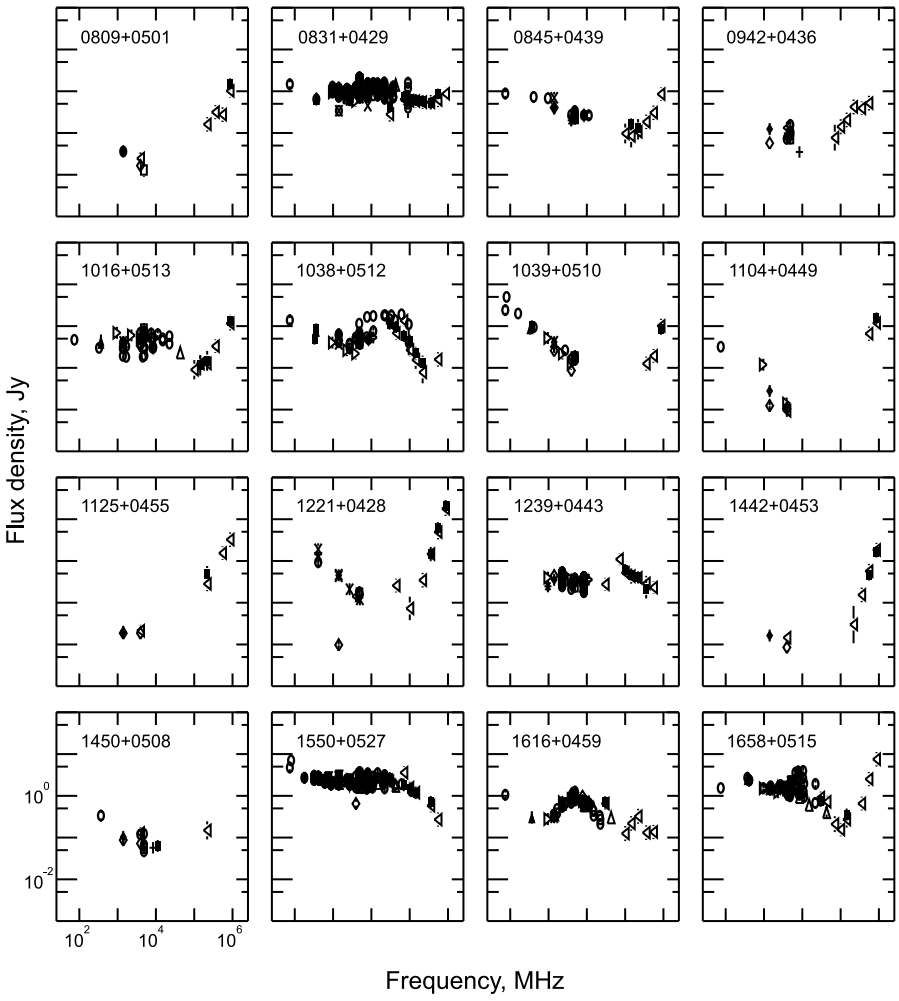


Рис. 5. Непрерывные радиоспектры RCR-источников, имеющих отождествление в каталоге обзора Planck, по данным радиообзоров и измерениям на картах Planck. Данные из каталогов Planck отмечены заштрихованными треугольниками на высоких частотах. Оценки плотностей потоков данной работы показаны пустыми треугольниками.

RCR J084517.13+043946.8 (NVSS J084517+043946). FSRS отождествлен с квазаром из фотометрического каталога квазаров SDSS [45].

RCR J090720.04+043619.3 (NVSS J090720+043619). Объект исследовался по программе "Большое Трио". По кадрам с 6-м телескопа БТА сделана оценка звездной величины $R > 23$, видны слабые следы на кадре UKIDSS LAS в фильтре K, на картах обзора WISE ($W1$,$W2$) слабо различим в крыльях более яркого объекта.

RCR J091432.29+045537.1 (NVSS J091432+045537). На картах обзора WISE слабо различим, причем во всех четырех полосах.

RCR J092445.92+050344.9 (NVSS J092445+050344). Пустое поле.

RCR J092745.31+045614.4 (NVSS J092745+045614). В окрестности родительской галактики SDSS J092745.32+045614.7 ($z = 0.341$, ABLS, SDSS DR10) расположены несколько слабых объектов.

RCR J093609.92+050349.6 (NVSS J093609+050349, NVSS J093610+050202 и NVSS J093612+050048). Отождествляется с квазаром SDSS J093610.99+050202.4 ($z = 1.675$, SDSS DR10).

RCR J093628.80+043641.2 (NVSS J093628+043641). В окрестности родительской галактики несколько слабых объектов.

RCR J094839.68+044957.6 (NVSS J094839+044957). В $2\farcs5$-окрестности родительской галактики SDSS J094839.44+044954.7 находится еще один объект, который есть на изображениях SDSS, отсутствует в базе данных SDSS и есть в каталоге UKIDSS LAS — J094839.35+044957.3.

RCR J095100.48+051025.0 (NVSS J095100+051025). В окрестности родительской галактики несколько слабых объектов.

RCR J095102.08+050643.8 (NVSS J095102+050643). Отождествляется со слабым объектом, который различим на кадрах H, K и их сумме обзора UKIDSS LAS, и в обзоре WISE — J095102.17+050644.4.

RCR J100048.62+045603.5 (NVSS J100048+045603). Отождествляется со слабым объектом, следы которого различимы на сумме кадров SDSS в i,r-фильтрах, кадре UKIDSS LAS в K-фильтре и полосах WISE $W1$,$W2$.

RCR J101333.26+045752.9 (NVSS J101333+045752). Отождествляется со слабым объектом, следы которого различимы в полосах WISE $W1$,$W2$,$W3$.

RCR J101603.12+051303.6 (NVSS J101603+051303). Отождествляется с объектом BZQ (blazar of the FSRQ type), из каталога источников Fermi LAT с потоками более 10 ГэВ [46] и переменным в гамма-диапазоне, относится к типу HFP (high frequency picker), $z = 1.7042$ [47].

RCR J103234.45+045925.9 (NVSS J103234+045925). В спектре родительской галактики SDSS J103234.31+045929.5 ($z = 0.242$, SDSS DR10) есть линии поглощения.

RCR J103846.84+051229.6 (NVSS J103846+051229). Переменный FSRS, отождествлен с квазаром SDSS J103846.78+051229.0 (BZQ), входящим в каталог CGRaBS. $z = 0.473$ определено в программе спектроскопии CGRaBS.

RCR J103938.62+051031.3 (NVSS J103938+051031). Отождествлен с взаимодействующей галактикой с $z = 0.068$ [48], излучающей в рентгеновском диапазоне. Рядом две галактики: SDSS J103938.96+051031.3 с $z = 0.068$ (ABLS, SDSS DR10) и SDSS J103939.61+051025.8 с $z = 0.071$ (ABLS, SDSS DR10)

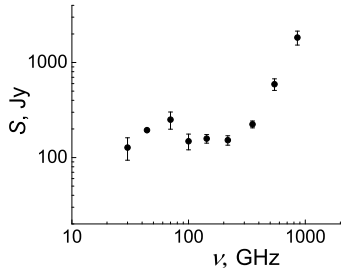


Рис. 6. Средний радиоспектр RCR-источников, построенный путем осреднения значений на общих частотах спектров объектов каталога RCR.

RCR J104117.65+045306.4 (NVSS J104117+045306). В спектре родительской галактики SDSS J104115.61+045313.8 ($z = 0.068$, SDSS DR10) есть линии поглощения.

RCR J104135.08+044549.5 (NVSS J104135+044549). Родительскую галактику SDSS J104135.17+044551.0 ($z_{\rm ph,KD} = 0.774 \pm 0.0899$, $z_{\rm ph,RF} = 0.619 \pm 0.1242$; SDSS DR10) окружают несколько слабых объектов, один из которых — галактика SDSS J104134.52+044545.3 — имеет близкую оценку красного смещения ($z_{\rm ph,KD} = 0.725 \pm 0.0854$, $z_{\rm ph,RF} = 0.691 \pm 0.1396$; SDSS DR10).

RCR J104218.38+044304.5 (NVSS J104218+044304). Отождествляем с WISE J104218.37+044304.0, следы которого различимы на сумме кадров SDSS в i,r-фильтрах, UKIDSS LAS в J и K-фильтрах.

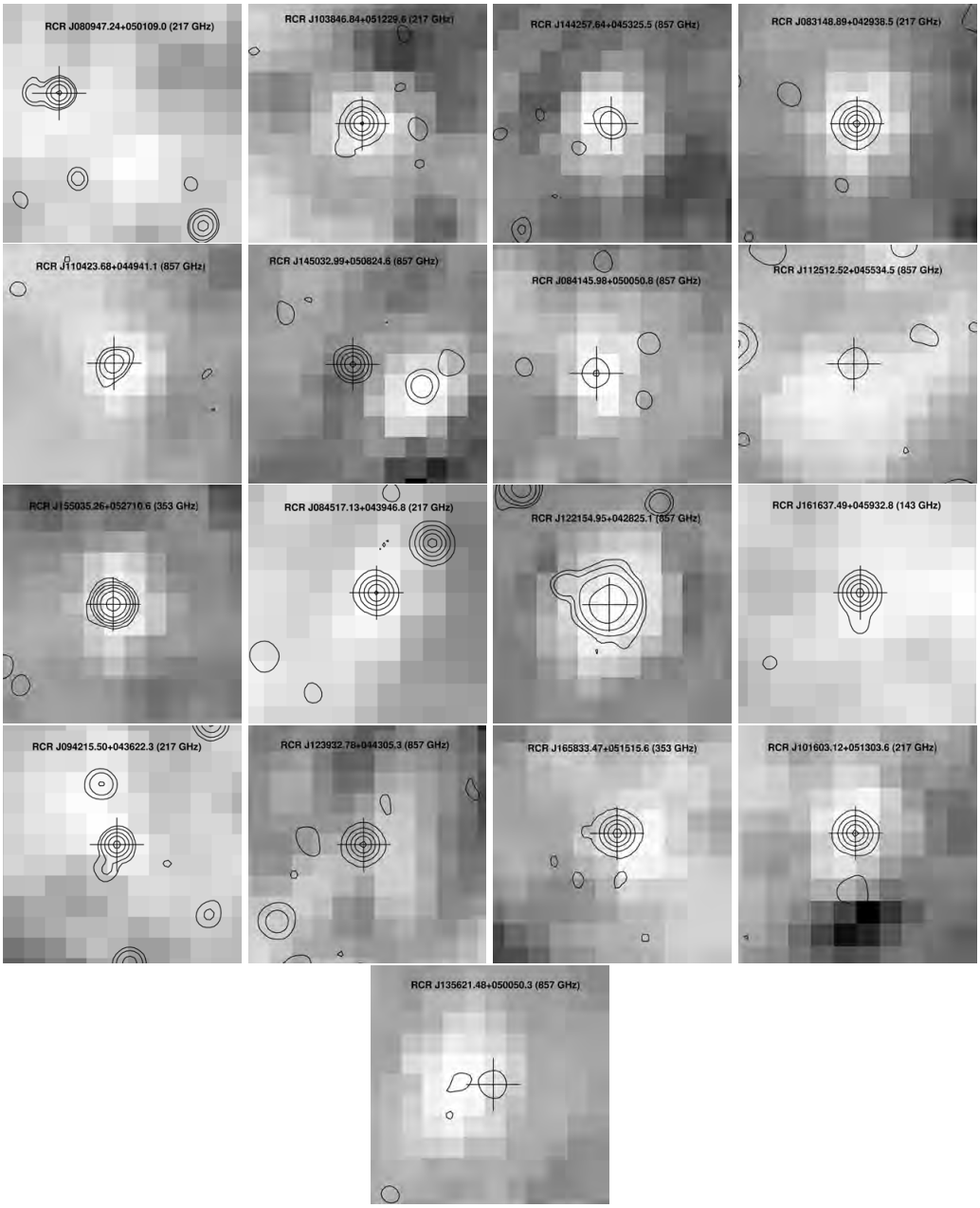


Рис. 7. Карты RCR-источников, имеющих отождествление в каталоге обзора Planck. Радиоизофоты по данными обзора NVSS на частоте 1.14 ГГц наложены на карты наблюдений Planck.

RCR J104346.01+044030.0 (NVSS J104346+044030). Объект исследовался по программе "Большое Трио". На снимках с 6-м телескопа БТА имеет звездную величину $R = 23.4$, видны следы на сумме $i + r$ SDSS, есть в каталоге UKIDSS LAS — J104345.26+044017.8. На кадре БТА в окрестности родительской галактики присутствуют слабые объекты.

RCR J105858.61+044347.5 (NVSS J105858+044347). FSRQ отождествлен с SDSS J105858.58+044347.7 ($z = 2.619$, SDSS DR10).

RCR J105951.12+045352.4 (NVSS J105951+045352 и NVSS J105948+045416). Отождествляем с UKIDSS LAS J105950.82+045354.4, следы которого различимы на сумме кадров SDSS в i,r-фильтрах.

RCR J110423.68+044941.1 (NVSS J110423+044941). Радиоисточник отождествлен с взаимодействующей кольцевой галактикой NGC 3509 ($z = 0.026$ [49], ABLS), входит в группу галактик.

RCR J112437.45+045618.8 (NVSS J112437+045618; 4C 05.50). Отождествлен с Sy2-галактикой или SDSS J112437.40+045618.9 ($z = 0.283$, SDSS DR10), которая по спектру в SDSS классифицирована как QSO AGN BroadLine, есть линии поглощения (Type 2 QSO). Объект исследовался по программе "Большое Трио".

RCR J112512.52+045534.5 (NVSS J112512+045534). Пустое поле.

RCR J113033.47+044734.8 (NVSS J113033+044734). Фотометрически отобранный квазар из SDSS с близким слабым объектом (2.″3).

RCR J113914.55+044330.4 (NVSS J113917+044301 и NVSS J113914+044330). Отождествлен с галактикой SDSS J113916.26+044320.6 с $z_{\rm ph} \sim 0.5$, возможный член группы, поскольку рядом (5″–10″) имеются два объекта с близкими $z_{\rm ph}$: SDSS J113916.24+044326.6 и SDSS J113915.80+044310.6.

RCR J114005.50+045952.8 (NVSS J114005+045952). Отождествляется с SDSS J114005.32+045952.1, который имеет близкого соседа слабее по блеску в SDSS, но одинакового по блеску в UKIDSS; в WISE они "накрываются" одним объектом WISE J114005.49+045952.8.

RCR J114211.28+043740.9 (NVSS J114211+043740, NVSS J114203+043737 и NVSS J114211+043850). Отождествлен с галактикой SDSS J114208.92+043733.5 ($z = 0.159$, SDSS DR10). В спектре есть линии поглощения.

RCR J114521.30+045526.7 (NVSS J114521+045526; 4C 05.52). Переменный в радиодиапазоне FSRQ с рентгеновским излучением, ABLS и BL (broad line). Рядом есть слабые объекты.

RCR J114631.64+045818.2 (NVSS J114631+045818). FSRS, отождествляется с объектом SDSS J114631.78+045819.4, который классифицируется по спектру SDSS DR10 как звезда класса F6 V.

RCR J115223.70+044814.4 (NVSS J115223+044814). На кадрах SDSS, UKIDSS LAS видны следы слабых объектов около родительской галактики. Объект исследовался по программе "Большое Трио".

RCR J115336.08+045505.2 (NVSS J115336+045505). Отождествляется с SDSS J115335.85+045505.4 ($z = 0.313$, SDSS DR10). В спектре есть линии поглощения (AL).

RCR J115537.84+045939.9 (NVSS J115537+045939). Отождествляется со слабым объектом, который виден в полосах $W1$,$W2$ WISE.

RCR J115851.23+045541.9 (NVSS J115851+045541). Отождествлен с SDSS J115851.07+045544.7, который классифицируется в SDSS как звездный объект. Виден во всех полосах WISE, что говорит в пользу его классификации как квазара.

RCR J121821.21+044954.8 (NVSS J121821+044954). Отождествляется с объектом LAS UKIDSS J121820.99+044941.6.

RCR J122154.95+042825.1 (NVSS J122154+042825 и NVSS J122154+042735). Радиоисточник отождествлен с Sy2-галактикой M 61, входящей в группу галактик.

RCR J122242.25+050044.8 (NVSS J122242+050044). Радиоисточник отождествлен с WISE J122242.29+050041.9.

RCR J123442.26+045123.2 (NVSS J123442+045123). Отождествляем со слабым объектом, следы которого различимы на сумме кадров SDSS в i,r-фильтрах, UKIDSS LAS в $J + K$ и полосах WISE $W1$,$W2$.

RCR J123932.78+044305.3 (NVSS J123932+044305). BZQ, $z = 1.761$ (SDSS DR10), BL, переменный источник в гамма-диапазоне [50].

RCR J125240.81+044828.7 (NVSS J125240+044828). Источник отождествляется со звездным объектом SDSS J125240.90+044827.5, который виден во всех полосах WISE, т.е. вероятный квазар.

RCR J125917.50+044533.4 (NVSS J125917+044533). Рядом с родительской галактикой SDSS J125917.54+044533.8 ($z_{\rm ph} \sim 0.5$) есть еще галактика SDSS J125916.84+044541.3 (приблизительно 13″) с $z_{\rm ph} \sim 0.5$.

RCR J133010.24+050037.5 (NVSS J133010+050037). Отождествлен с квазаром SDSS

J133010.43+050038.0 ($z = 2.374$, SDSS DR10).

RCR J133303.89+045146.1 (NVSS J133303+045146 и NVSS J133308+045029). Отождествлен с квазаром SDSS J133307.00+045048.5 ($z = 1.405$, SDSS DR10), BL. Объект исследовался по программе "Большое Трио".

RCR J133510.39+045415.3 (NVSS J133510+045415). Отождествлен с UKIDSS LAS J133510.29+045414.4, следы объекта видны на сумме кадров $i + r$ SDSS, рядом (примерно $5''$) еще один такой же слабый объект. Оба "накрываются" WISE J133510.38+045415.2.

RCR J133920.76+050159.3 (NVSS J133920+050159). Отождествлен с квазаром SDSS J133920.66+050158.9 ($z = 1.358$, SDSS DR10), BL.

RCR J134725.53+045509.0 (NVSS J134725+045509). Отождествлен с галактикой SDSS J134725.65+045509.9 ($z = 0.648$, SDSS DR10), AL.

RCR J140008.21+050053.9 (NVSS J140008+050053). Отождествлен с галактикой SDSS J140008.26+050052.3 ($z = 0.568$, SDSS DR10), AL.

RCR J140348.39+045632.1 (NVSS J140348+045632). Отождествляем с WISE J140348.23+045634.6, следы объекта различимы на сумме кадров SDSS в i,r-фильтрах, UKIDSS LAS в J и K-фильтрах.

RCR J141247.30+045430.0 (NVSS J141247+045430). В окрестности родительской галактики SDSS J141247.44+045431.5 ($z = 0.136$, SDSS DR10) имеются слабые объекты.

RCR J141715.51+045020.6 (NVSS J141715+045020). Отождествляем с WISE J141715.56+045020.5, следы объекта различимы на кадрах UKIDSS LAS в J и K-фильтрах.

RCR J141757.01+045038.1 (NVSS J141757+045038). Родительская галактика — SDSS J141756.88+045045.1 ($z = 0.594$, SDSS DR10), в $6''$ от нее есть слабый объект.

RCR J142104.21+050845.0 (NVSS J142104+050845). Родительская галактика SDSS J141756.88+045045.1 ($z = 0.455$, SDSS DR10, AbL), в $2''.9$ от нее есть слабый объект. Вошел в выборку LLC-объектов (low-luminosity compact) [51].

RCR J142409.47+043451.7 (NVSS J142409+043451). FSRS, отождествлен с SDSS J142409.50+043452.0 ($z = 0.666$, SDSS DR10), по спектру SDSS объект классифицирован как галактика (есть слабые эмиссионные линии и линии поглощения), тип BL Lac [52], измерена поляризация [53].

RCR J142545.16+045041.1 (NVSS J142545+045041). Отождествляем с WISE J142545.02+045042.1, следы объекта различимы на кадрах UKIDSS LAS в J и K-фильтрах.

RCR J143433.74+044646.0 (NVSS J143433+044646 и NVSS J143429+044629). Отождествляем с WISE J143432.78+044641.6, следы объекта различимы на кадрах UKIDSS LAS в K-фильтре.

RCR J143536.42+045158.9 (NVSS J143536+045158 и NVSS J143531+045341). Отождествлен с квазаром SDSS J143534.06+045243.8 ($z = 0.378$, SDSS DR10, BL). Классифицируется как Sy1 [54].

RCR J143945.64+045545.2 (NVSS J143945+045545). Объект исследовался по программе "Большое Трио". По кадрам с 6-м телескопа БТА оценка звездной величины $R > 25$. Следов на кадрах других обзоров не обнаружено.

RCR J144037.11+050707.3 (NVSS J144037+050707). Отождествляется с SDSS J144037.02+050707.4, на кадре UKIDSS LAS (K) видно два слабых пика, разделенных расстоянием в $1''.2$. E-пик (UKIDSS LAS J144037.02+050707.3) совпадает с SDSS J144037.02+050707.4, а W-пик совпадает с WISE J144036.95+050707.5.

RCR J144124.08+045557.5 (NVSS J144124+045557). Отождествлен с галактикой SDSS J144124.11+045556.7 ($z = 0.399$, SDSS DR10, AbL). Рядом ($3''.8$) — SDSS J144124.01+045553.0.

RCR J144257.64+045325.5 (NVSS J144257+045325). Отождествлен с IC 1048 ($z = 0.005$ [55], которая входит в группу LGG 386 [56].

RCR J144334.91+045258.5 (NVSS J144334+045258). Отождествляем с WISE J144334.97+045257.8, следы объекта видны в K-фильтре UKIDSS LAS.

RCR J144617.88+050740.9 (NVSS J144617+050740). Объект исследовался по программе "Большое Трио", $z = 0.273$ [39].

RCR J145032.99+050824.6 (NVSS J145032+050824). Отождествлен с квазаром SDSS J145032.97+050822.4 ($z = 1.635$, SDSS DR10, BL). Рядом ($5''$) находится звезда SDSS J145033.17+050826.1.

RCR J145323.07+045803.9 (NVSS J145323+045803). Отождествлен с галактикой SDSS J145323.03+045803.5 ($z = 0.452$, SDSS DR10, AGN BL, AbL).

RCR J145333.81+045104.2 (NVSS J145333+045104). Отождествлен с Sy2-галактикой SDSS J145333.82+045104.5 ($z = 0.119$, SDSS DR10, BL, AbL).

RCR J145625.83+045645.2 (NVSS J145625+045645; 4C 05.61). Объект исследовался по про-

грамме “Большое Трио”, $z = 2.130$ [39].

RCR J151052.23+045206.7 (NVSS J151052+045206). Отождествлен с галактикой SDSS J151052.20+045203.7 ($z = 0.081$, SDSS DR10, BL, AbL). Окружена слабыми объектами, в 13″ находится галактика SDSS J151053.71+ 045208.3 с $z_{\rm ph} \sim 0.09$. Имеется еще одна близкая на снимке пара галактик (9.″5) SDSS J151051.79+045211.4 ($z = 0.515$, SDSS DR10) и SDSS J151051.48+045208.7 ($z_{\rm ph} \sim 0.5$).

RCR J151054.66+045410.6 (NVSS J151054+045410). Отождествлен с галактикой SDSS J151056.34+045357.7 ($z = 0.399$, SDSS DR10, AbL). Рядом (3.″8) находится галактика SDSS J151056.32+045401.4 $z_{\rm ph} \sim 0.3$.

RCR J151543.71+050330.0 (NVSS J151543+050330). Отождествляется с WISE J151543.63+050331.5, следы объекта видны в K-фильтре UKIDSS LAS.

RCR J151855.13+045114.5 (NVSS J151855+045114). Отождествляем с WISE J151855.09+045113.7, следы объекта видны в K-фильтре UKIDSS LAS.

RCR J152026.93+045713.3 (NVSS J152026+045713). Отождествляем с UKIDSS LAS J152026.76+045714.3, следы объекта видны на $i + r$–кадре SDSS. Рядом (1.″9) — SDSS J152026.60+ 045715.0 и SDSS J152026.60+045715.0 (3.″1).

RCR J152114.51+043020.0 (NVSS J152114+043020; 4C +04.51). GPS-источник с $z = 1.296$ [57], переменный в радиодиапазоне.

RCR J153032.13+045050.2 (NVSS J153032+045050). Слабый объект, следы которого видны на H и K-кадрах UKIDSS LAS, находится рядом со звездой SDSS J153032.25+045049.2 (2.″9).

RCR J154333.90+045219.3 (NVSS J154333+045219). FSRS, отождествляется с галактикой CGCG 050-083 ($z = 0.040$ [49]) или SDSS J154333.95+045219.2, которая входит в группу.

RCR J155021.76+050630.2 (NVSS J155021+050630). Отождествляем с SDSS J155021.58+050633.9, который смещен от радиоисточника на 5″.

RCR J155035.26+052710.6 (NVSS J155035+052710; 4C 05.64). FSRS, отождествлен с квазаром SDSS J155035.27+052710.4 ($z = 1.420$, SDSS DR10, AbL) с поляризацией в радиодиапазоне и с высокой оптической поляризацией более 3% (HP). Рентгеновский и гамма-источник, есть переменность в радиодиапазоне

RCR J155148.09+045930.5 (NVSS J155148+045930). Объект исследовался по программе “Большое Трио”. По кадрам с 6-м телескопа БТА оценка звездной величины $R = 23.5$. Есть в обзоре UKIDSS LAS: J155148.07+045930.6.

RCR J155431.52+051726.7 (NVSS J155431+051726). Отождествляется с SDSS J155431.54+051724.2, рядом имеется еще одна слабая галактика SDSS J155431.18+051726.7.

RCR J161637.49+045932.8 (NVSS J161637+045932). FRSQ, HFP и рентгеновский источник с $z = 3.215$ [58]. С квазаром связано несколько AbLS. В работе [59] на глубоких снимках отмечено несколько компаньонов, причем для одного из них, находящегося на расстоянии примерно 6.″6, определено $z = 3.215$ (по Lyα).

RCR J161907.23+045559.5 (NVSS J161907+045559). Отождествляется с WISE J161907.30+045558.5, следы объекта видны в z-фильтре SDSS.

RCR J165833.47+051515.6 (NVSS J165833+051515). FRSQ с $z = 0.879$ [60], с HP и рентгеновским излучением.

RCR J165920.67+050550.5 (NVSS J165920+050550). Отождествление — GSC2.3 N3AU005047 и WISE J165920.59+050551.0.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование карт микроволнового фонового излучения в области радиоисточников RCR-каталога. Были исследованы поля радиусом 1.5 ширины диаграммы направленности на высоких частотах Planck на предмет присутствия положительного сигнала на уровне отношения сигнал/шум $1\sigma < S < 3\sigma$. Следуя гипотезе о повышенной вероятности появления положительного отклика на картах микроволнового фона разных частот, если в исследуемой области заведомо присутствует радиогалактика, по измерениям микроволновых карт Planck мы оценили плотности потока RCR-радиоисточников. Представлен каталог 117 радиоисточников с данными измерений и соответствующие непрерывные спектры от радио до субмиллиметрового диапазона. Проведено отождествление радиоисточников в инфракрасном (UKIDSS и WISE) и оптическом диапазонах (DPOSS и SDSS). Независимые оценки плотности потока исследуемых радиоисточников, представленные в каталоге эксперимента Planck (в нашем списке таких объектов 16 штук), говорят об удовлетворительной точности оценки потока по представленной методике.

Распределение энергии в спектрах радиоисточников, характеризующееся подъемом в субмилли-

метровом диапазоне, показанное на рис. 4 и 6, говорит о наличии пылевой компоненты, описанной в [61, 62] и присутствующей в активных ядрах галактик.

Наличие подобных источников, трудновычищаемых на картах микроволнового фона из-за малой интенсивности потока излучения, затрудняет проведение статистического анализа космического микроволнового фона по картам Planck на масштабах менее $7'$ и поэтому представляет отдельный интерес.

Статистика пиков космического микроволнового фона в области исследуемых радиоисточников RCR-каталога (таблицы 3 и 4) показывает отличие для объектов разных типов: (1) источники с плоскими спектрами (т.е. из спектрального диапазона $-0.5 < \alpha \leq 0.5$) в среднем в 1.2 раза чаще попадают в область положительных пиков, чем объекты с крутыми спектрами, при установке уровня обнаружения 1σ; (2) среднее число холодных пятен в диапазоне $S/N > 2.0$ в $7'$-окрестности RCR-источников очень мало как по сравнению с данными для горячих пятен, так и по сравнению с моделями. Этот факт может говорить о неслучайности выделения отобранных источников в микроволновом диапазоне, чей положительный вклад нивелирует ожидаемые статистические оценки для холодных пятен на картах CMB Planck.

В следующих работах будут исследованы статистика космического микроволнового фонового сигнала в направлении на потенциальные протоскопления галактик в окрестности далеких радиоисточников и зависимость микроволнового отклика от типа популяции радиоисточников.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны своим коллегам Н. Н. Бурсову, Н. С. Соболевой и А. В. Темировой за подготовку исходного RC-каталога и полезные дискуссии в процессе переобработки данных в диапазоне прямых восхождений $7^{\rm h}$–$17^{\rm h}$. Авторы также выражают свою признательность ESA — за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. При построении непрерывных радио спектров применялась база данных радиоастрономических каталогов CATS (`http://cats.sao.ru`) [63, 64]. В работе использованы система обработки радиоастрономических данных FADPS [65, 66] и пакет GLESP [24, 27, 67] для анализа протяженного излучения на сфере. Исследования по данной теме были частично поддержаны грантами РФФИ №13-02-00027, 14-07-00361, 12-07-00503.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **208**, 20 (2013).
2. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. Astrophys. **571**, A1 (2014).
3. M. Hasselfield, M. Hilton, and T. A. Marriage, J. Cosmol. Astropart. Phys. **07**, 008 (2013).
4. K. K. Schaffer, T. M. Crawford, K. A. Aird, et al., Astrophys. J. **743** 90 (2011).
5. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, Astrophys. Space Sci. **4**, 301 (1969).
6. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. Astrophys. **536**, A8 (2011).
7. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. Astrophys. **571** A16 (2014).
8. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. Astrophys. **571** A20 (2014).
9. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. Astrophys. **571** A28 (2014).
10. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. Astrophys. **571** A12 (2014).
11. Ю. Н. Парийский и Д. В. Корольков, в *Итоги науки и техники. Астрономия*, Ред. Р. А. Сюняев (ВИНИТИ, Москва, 1986), Т. 31, с. 73.
12. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **87**, 1 (1991).
13. W. M. Goss, Y. N. Pariiskii, N. S. Soboleva, et al., Sov. Astron. **36**, 343 (1992).
14. A. I. Kopylov, V. M. Goss, Yu. N. Pariiskii, et al., Astron. Rep. **39**, 543 (1995).
15. Y. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).
16. Yu. N. Pariiskii, V. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Astron. Rep. **42**, 425 (1998).
17. T. Pursimo, K. Nilsson, P. Teerikorpi, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **134**, 505 (1999).
18. O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **52**, 5 (2001).
19. O. P. Zhelenkova and A. I. Kopylov, Astrophysical Bulletin **64**, 109 (2009).
20. O. P. Zhelenkova and A. I. Kopylov, Astrophysical Bulletin **63**, 346 (2008).
21. N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., Astrophysical Bulletin **65**, 42 (2010).
22. O. P. Zhelenkova, N. S. Soboleva, E. K. Majorova, and A. V. Temirova, Astrophysical Bulletin **68**, 26 (2013).
23. E. Bertin and S. Arnouts, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **117**, 393 (1996).
24. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).

25. R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen, et al., Astron. Astrophys. **376**, 359 (2001).
26. A. Lewis, A. Challinor, and A. Lasenby, Astrophys. J. **538**, 473 (2000).
27. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2005).
28. M. L. Khabibullina and O. V.Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 123 (2009).
29. I. N. Reid, C. Brewer, R. J. Brucato, et al., Publ. Astron. Soc. Pac. **103**, 661 (1991).
30. D. J. York, J. Adelman, J. E. Anderson, et al., Astron. J. **120**, 1579 (2000).
31. A. Lawrence, S. J. Warren, O. Almaini, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **379**, 1599 (2007).
32. R. M. Cutri, E. L. Wright, T. Conrow, et al., AllWISE Data Release (2013).
33. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., Astron. J. **115**, 1693 (1998).
34. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, et al., Astrophys. J. **475**, 479 (1997).
35. C. P. Ahn, R. Alexandroff, P. Allende, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **211**, 17 (2014).
36. О. П. Желенкова, Информатика и ее применения **6**, 5 (2012).
37. P. W. Lucas, M. G. Hoare, A. Longmore, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **391**, 136 (2008).
38. S. E. Healey, R, W. Romani, G. Cotter, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **175**, 97 (2008).
39. Yu. N. Parijskij, A. I Kopylov, A. V. Temirova, et al., Astron. Rep. **54**, 675 (2010).
40. J. P. Huchra, L. M. Macri, K. L. Masters, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **199**, 26 (2012).
41. P. A. A. Lopes, Mon. Not. R. Astron. Soc. **380**, 1608 (2007).
42. A. Hewitt and G. Burbidge, Astrophys. J., Suppl. Ser. **87**, 451 (1993).
43. M. A. Strauss, A. Michael, J. P. Huchra, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **83**, 29 (1992).
44. R. Falomo and M.-H. Ulrich, Astron. Astrophys. **357**, 91 (2000).
45. G. T. Richards, A. D. Myers, A. G. Gray, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **180**, 67 (2009).
46. M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **209**, 34 (2013).
47. P. C. Hewett and V. Wild, Mon. Not. R. Astron. Soc. **405**, 2302 (2010).
48. F. N. Owen and R. A. White, Astron. J. **95**, 10 (1988).
49. E. Falco, M. Kurtz, M. Gellar, et al., Publ. Astron. Soc. Pac. **111**, 438 (1999).
50. Abdo A.A., Ackermann M., Ajello M., et al., Astrophys. J. **715**, 429 (2010).
51. M. Kunert-Bajraszewska, M. P. Gawronski, A. Labiano, and A. Siemiginowska, Mon. Not. R. Astron. Soc. **408**, 2261 (2010).
52. E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., Astron. Astrophys. **495**, 691 (2009).
53. J. Heidt and K. Nilsson, Astron. Astrophys. **529**, A162 (2011).
54. M. P. Veron-Cetty and P. Veron, Astron. Astrophys. **518**, A10 (2010).
55. T. Oosterloo and S. Shostak, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **99**, 379 (1993).
56. A. M. Garcia, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **100**, 47 (1993).
57. N. de Vries, I. A. G. Snellen, Schilizzi, et al., Astron. Astrophys. **464**, 879 (2007).
58. S. Djorgovski, H. Spinrad, P. McCarthy, and M. A. Strauss, Astron. J. **299**, L1 (1985).
59. S. Djorgovski, M. A. Strauss, H. Spinrad, et. al., Astron. J. **93**, 1318 (1987).
60. S. H. Pravdo and F. E. Marshall, Astron. J. **281**, 570 (1984).
61. J.D. Collier, J. K. Banfieldm, R. P. Norris, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **439**, 545 (2014).
62. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), submitted to Astron. Astrophys., arXiv:1407.5452.
63. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005).
64. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Data Sci. J. **8**, 34 (2009).
65. O. V. Verkhodanov, ASP Conf. Ser. **125**, 46 (1997).
66. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
67. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Int. J. Modern Phys. D **20**, 1053 (2011).

РАТАН-600 И РАДИОГАЛАКТИКИ*

О. В. Верходанов[1], Ю. Н. Парийский[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН

В 1974 г. учеными Специальной астрофизической обсерватории были выполнены первые наблюдения участков неба с помощью 600-м радиоастрономического телескопа РАТАН-600 Академии наук СССР (Земля и Вселенная, 1976, №4; 1977, №6; 1981, №3). Это поизошло еще до официального заверешния работ по строительству РАТАН-600 в 1977 г. Одна из основных задач этого инструмента, сформулированных на момент подготовки проекта радиотелескопа, — проведение глубоких обзоров неба на нескольких длинах волн и, в частности, поиска и исследования радиогалактик.

1. К ИСТОРИИ ОБЗОРОВ НЕБА НА РАТАН-600

Глубокие обзоры неба проводятся с хорошим разрешением и чувствительностью, чтобы шум слабых радиоисточников не мешал поиску и выделению небесных объектов. Такие обзоры часто имеют несколько целей: поиск и исследование радиоисточников, а также изучение фонового радиоизлучения неба, которое может быть связано с излучением Солнечной системы и нашей Галактики и космологическим фоном. Среди наиболее важных программ наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 — эксперимент “Холод”, проведенный с 1980-х гг. с целью исследования предельных возможностей РАТАН-600 при минимальных шумах системы радиотелескоп-радиометр. В эксперименте был использован радиометр с параметрическим усилителем, лучший в Советском Союзе в начале 1980-х гг. по флуктуационной чувствительности для поиска слабых объектов. За несколько месяцев наблюдений в 1980 г. был достигнут уровень чувствительности ниже 1 мЯн плотности потока, который определяется слабыми фоновыми радиоисточниками, видимыми на длине волны 7.6 см. При наблюдениях по программе “Холод” использовался Северный сектор радиотелескопа. Наблюдения проводились в меридиане на склонении $+4°54'$ с шириной полосы $10'$. Склонение было выбрано по координатам объекта SS 433 — самого известного микроквазара в нашей Галактике (Земля и Вселенная, 1980, №4). В эксперимент использовались дополнительные длины волн, данные по которым позволили решать разнообразные астрофизические задачи:

- радиометр на длине волны 8.2 см помогал отождествлять (обнаруживать и опознавать) локальные помехи;
- наблюдения на волнах 2.08 и 3.9 см использовались для определения флуктуаций излучения атмосферы;
- волна в 31 см применялась для распознавания локальных (в частности, автомобильных) помех, а также для выделения излучения Галактики.

Одним из основных результатов программы обзоров “Холод” стал каталог радиоисточников, который лег в основу программы исследования далеких радиогалактик “Большое Трио”, названной так по числу трех основных телескопов — РАТАН-600, VLA Национальной радиоастрономический обсерватории (NRAO, США) и БТА САО РАН, которые в нем “участвовали”.

К моменту получения первых данных в сантиметровом диапазоне длин волн в результате глубокого обзора неба в эксперименте “Холод” для исследования анизотропии космического трехградусного фонового радиоизлучения не существовало каталогов неба со слабыми объектами в изучаемой на РАТАН-600 области. Самый достоверный каталог 3CR (Кембриджский каталог 1959 г.) на частоте 178 МГц имел “порог” чувствительности около 10 Ян; основная популяция радиоисточников со стандартными спектрами обрывалась на уровне плотности потока около 0.5 Ян на волне 7.6 см. Это — на два порядка выше флуктуационный чувствительности даже одного суточного обзора неба. Только объекты с очень “крутыми спектрами” (поток радиоизлучения на длинных волнах в разы больше

*© “Издательство “Наука”, 2016”. Верходанов, О. В. РАТАН-600 и радиогалактики / О. В. Верходанов, Ю. В. Парийский. // Земля и вселенная. — 2016. — № 5. — С. 6.

Рис. 1. Северный сектор и плоский отражатель радиотелескопа РАТАН-600 (а). На заднем фоне видна гора Джисса за страницей Зеленчукская, Карачаево-Черкессия. Рупоры радиометров (б), расположенные в фокальной плоскости радиотелескопа на подвижной части приемной кабины №1, включающие матричную радиометрическую систему "МАРС-2" ($\lambda = 1$ см), приемники ($\lambda = 6.25, 3.9, 2.7$ и 1.4 см), а также первичный облучатель с совмещенными фазовыми центрами ($\lambda = 13, 31$ и 49 см). Фото Лаборатории радиометров континуума САО РАН.

потока на коротки, как у пульсаров) могли случайно совпасть с источниками каталогов обзоров в метровом диапазоне длин волн и обзоров на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне. Учитывая относительно низкую координатную точность данных, полученных на РАТАН-600 (10-30 секунд дуги), проводить глубокое оптическое отождествление (поиск для радиоисточника кандидата на родительскую галактику на оптическом снимке) слишком сложно. Положение кардинально изменилось в 1984 г. после обнародования до публикации американским радиоастрономом Дж. Дугласом самого глубокого каталога тех лет. В этот каталог занесены данные по объектам на волне 82 см с координатной точностью $1 - 3''$ и с пороговой чувствительностью в 20 раз выше, чем в каталоге 3CR. Этого было недостаточно для распознавания всех объектов с помощью РАТАН-600, но зато практически все радиоисточники с "крутыми спектрами" оказались общими для двух этих каталогов. Источники с плоскими спектрами, обнаруженные с помощью РАТАН-600, были недоступны для каталога Дугласа. Дальнейшее исследование объектов по RC-каталогу, составленному в 1980 г. на основе обзора неба с помощью РАТАН-600, была связано с поиском кандидатов в самые удаленные объекты во Вселенной с помощью данных об их радиоспектрах.

RC-каталог содержит 1140 радиоисточников в узкой полосе неба шириной около $40'$ вокруг склонения SS433. Около 10% объектов имели достаточно крутые двухчастотные спектры, которые стали основой международной программы "Большое Трио" с участием радиоинтерферометра VLA

(NRAO, США) и 6-м оптического телескопа САО РАН. При относительной небольшой области обзора (200 квадратных градусов) и значительно большей глубине эта выборка оказалась более, чем в сотни раз, “плотной” по числу объектов с очень “крутыми спектрами” на квадратный градус, а также первой, использующей сантиметровый диапазон при селекции таких спектров.

Перед тем, как перейти к описанию программы “Большое Трио”, кратко рассмотрим важные свойства радиогалактик.

2. РАДИОГАЛАКТИКИ

Среди небесных объектов радиогалактики выделяются особо (Земля и Вселенная, 1978, №1; 1980, №2 и №5) не только своей светимостью и размером, но и уникальной ролью в эволюции вещества во Вселенной. Их физические свойства астрономы используют при определении динамических и физических параметров Вселенной.

Что представляет собой радиогалактика? В радиодиапазоне излучают все галактики, но причины и мощность этого излучения различны. Исторически радиогалактиками называли объекты предельной высокой радиосветимости, достигающей 10^{14} светимости Солнца (до 10^{48} эрг/с). В видимом свете такие объекты, как правило, отождествлялись с галактиками. Если же радиоисточник выглядел точечным объектом, то его классифицировали как квазар. Позднее, после проведения более чувствительных обзоров неба на различных радиотелескопах и массовом оптическом отождествлении радиоисточников, появилась необходимость уточнить смысл термина “радиогалактика”.

Так, радиоизлучение обычной галактики может быть связано с процессами, происходящими в ее ядре, — с вылетающими струями плазмы из центрального объекта, с остатками сверхновых или с облаками нейтрального водорода и других молекул. Но, с другой стороны, разные классы объектов имеют схожие причины возникновения радиоизлучения и вообще оказываются связанными между собой эволюционно и/или представляют собой различные виды проекции на небе близких по свойствам источников. Когда Космический телескоп Хаббла обнаружил звездное “окружение” у всех квазаров, то строгое разделение на радиогалактику или квазар стало “размытым”.

Итак, будем называть радиогалактиками такие галактики, у которых, во-первых, радиосветимость сравнима с оптической (причем последняя определяется суммарной светимостью звезд) и, во-вторых, радиоизлучение которых связано с активностью ядра галактики. Такие объекты, как правило — самые мощные (кроме вспышечных) источники излучения из известных, за исключением самой Вселенной. Этот факт позволяет проводить их изучение на больших красных смещениях: $6 > z > 1$, то есть когда возраст Вселенной был от 1 до 6 млрд лет.

3. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ

3.1. Первые обнаруженные радиогалактики

Стандартное представление о радиогалактиках как о протяженных радиоисточниках сформировалось еще в начале 1950-х гг.; оно помогает и сегодня при описании объектов данного класса. Имена первых исследованных радиогалактик в то время присваивались очень простым способом: к названию созвездия добавлялось символьное обозначение A, B, C, указывающее на уменьшение радиояркости объекта в данном созвездии. Четыре из первых открытых радиогалактик — Лебедь A, Центавр A, Дева A и Печь A (Земля и Вселенная, 1983, №1).

Лебедь A — самый мощный из известных в то время внегалактический дискретный источник радиоизлучения, отождествленный в 1951 г. с эллиптической галактикой 16^m, входящей в состав богатого скопления. Галактика вращается вокруг оси, лежащей в картинной плоскости и направленной вдоль прямо, соединяющей два ярких компактных компонента радиоизлучения. Угловое расстояние между яркими областями компонент двойной структуры — около $2'$ (120 кпк); компоненты “выстреливаемых” струй вылетают их ядра со скоростью 0.02 скорости света; в ядре галактики обнаружен компактный радиоисточник.

Центавр A (NGC 5128) — радиоисточник в созвездии Центавра, ближайшая к нам радиогалактика (расстояние до нее — примерно 4 Мпк). Она имеет сфероидальную форму, разделенную газово-пылевым диском (поглощающим свет звезд), она наблюдается практически “с ребра”. Центавр A содержит протяженный радиоисточник, который представляет собой старую, сильно расширившуюся структуру общей протяженностью около 500 кпк.

Дева A (M87, NGX 4486) — радиоисточник сравнительной небольшой радиосветимости (10^{42} эрг/с), принадлежащий массивной эллиптической галактике типа cD в центре скопления галактик в созвездии Девы на расстоянии около 18 Мпк.

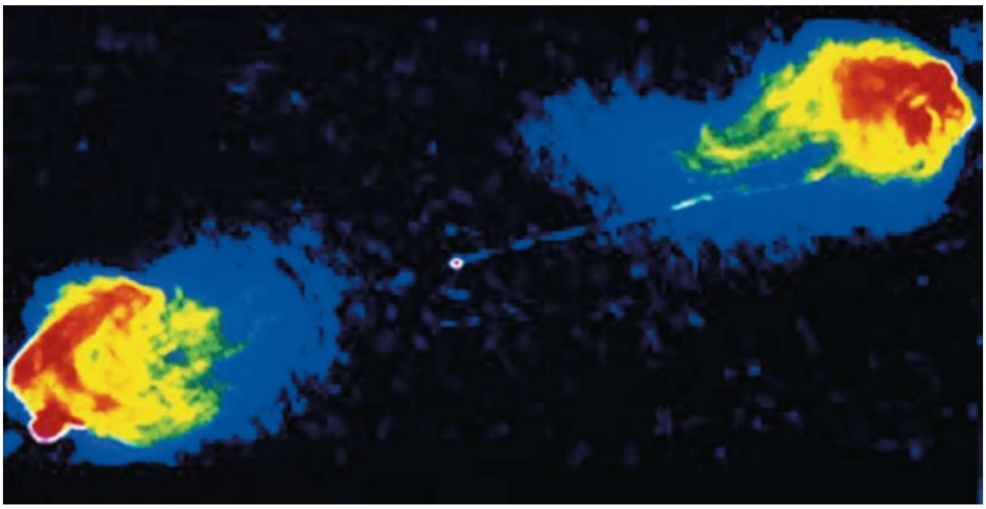


Рис. 2. Радиогалактика Лебедь А. Из центрального источника-квазара, находящегося внутри эллиптической галактики, “выстреливаются” две струи плазмы (джеты). При столкновении со средой джеты формируют протяженные компоненты с горячими пятнами. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

Рис. 3. Радиогалактика Центавр А (NGC 5128). На оптическое изображение галактики наложено радиоизображение с помощью радиоизофот-линий одинаковой радиояркости. Центр галактики, где находится квазар со сверхмассивной черной дырой, обрамляет пылевой тор, видимый в инфракрасном свете. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

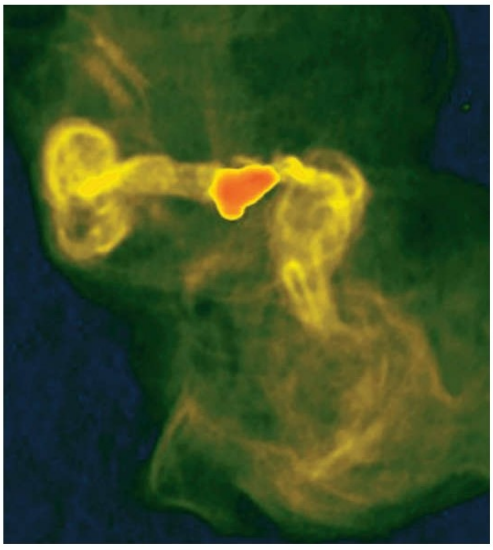


Рис. 4. Радиогалактика Дева А (M87, NGC 4486) в центре скопления галактик. Гигантская эллиптическая галактика типа cD — гигантский радиоисточник, формирующий структуру-радиококон. Из центрального квазара вылетают две струи плазмы (джеты). Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

У центра галактики наблюдается односторонний выброс вещества — джет длиной около $20''$ (порядка 1.5 кпк). Он разбивается на отдельные сгустки (узлы) и излучает не только в радио-, но и в оптическом диапазоне.

Радиоисточник Печь А (NGC 1316) находится на периферии скопления галактик и состоит из двух больших компонент, имеющих сложную структуру размером примерно 200 кпк каждая, которые подпитываются струями плазмы из центра галактики. Причина выделения энергии в центре NGC 1316 — слияние (мерджинг), а, точнее, — поглощение (малый мерджинг) небольших соседних галактик. Спиральная галактика на севере может быть следующей жертвой такого галактического "каннибализма".

4. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОГАЛАКТИК

Можно выделить два подхода в радиоастрономической классификации внегалактических радиоисточников: первый — по виду непрерывного радиоспектра (зависимость выделяемой энергии от частоты) и второй — по структуре радиоизображения (случай морфологической классификации). Оба типа классификации важный при поиске самых далеких радиогалактик.

4.1. Радиоспектры

Радиоспектр источника связан с механизмом радиоизлучения и, соответственно, с природой самого объекта. Остановимся на внегалактических радиоисточниках. Их непрерывный спектр формируется нетепловым (синхротронным) излучением. Оно возникает, когда электрон движется с околосветовой скоростью в магнитном поле по спиральной траектории, "наматывающейся" на силовую линию поля. В этом случае плотность потока излучения падает с ростом частоты.

4.2. Морфологическая классификация радиогалактик

При изучении формы источника в радиодиапазоне (то есть при распределении яркости галактик в радиодиапазоне) выделяют их различные морфологические особенности:

- ядро — компактная структура размером менее $0.1''$, не разделимая на детали; совпадает с ядром в оптике, имеет плоский или сложный радиоспектр;
- протяженные структуры — большие по длине области радиоизлучения;
- джеты (струи) — тонкие и конусообразные структуры, связывающие ядро с внешними областями;
- горячие пятна — максимумы интенсивности, расположенные во внешних пределах протяженных структур радиоисточников;
- узла — области усиления яркости свечения в джетах;
- гало — протяженная область радиоизлучения (радиококон), окружающая радиогалактику (например, как у радиогалактики Дева А).

Используя особенности структуры и распределения радиояркости для объектов каталога 3CR, в 1974 г. астрофизики Б. Фонарёв и Дж. Райли ввели классификацию протяженных радиоисточников, разбив их на два класса. Первый тип радиогалактик (FR I) имеет спадающее к краям источника распределение радиояркости, второй (FR II) — концентрирующееся преимущественно в боковых компонентах, с горячими пятнами. Границы светимости между обоими классами не всегда строгая и существуют "перекрытия" в светимости объектов, отобранных как FR I и FR II на основании их структуры.

Источники типа FR I часто (но не всегда) отождествляются с яркими большими галактиками (классы E, D или cD) — с более плоскими профилями в радиальном распределении яркости, чем средняя эллиптическая галактика. Эти объекты часто располагаются в богатых скоплениях с горячим газом. Источники типа FR II, с основном, принадлежать к гигантским эллиптическим галактикам — как правило, более мощным, чем FR I. Одна из популярных эволюционных моделей основана на оптических данных, она исследует родительские галактики и их окружение. Оба класса источников могут быть связаны — принадлежать к одной эволюционной последовательности. По этой гипотезе радиоисточники типа FR II — более молодые и с особенно мощным выделением энергии; когда подпитывающий ядро газ заканчивается, источник за сотни миллионов лет угасает и переходит в тип FR I.

5. КОСМОЛОГИЯ

Чем же полезны радиогалактики для космологии? В поисках ответа на вопрос о том, как устроена Вселенная (каковы ее физические параметры, динамика расширения, геометрия и форма) наблюдательная космология использует астроно-

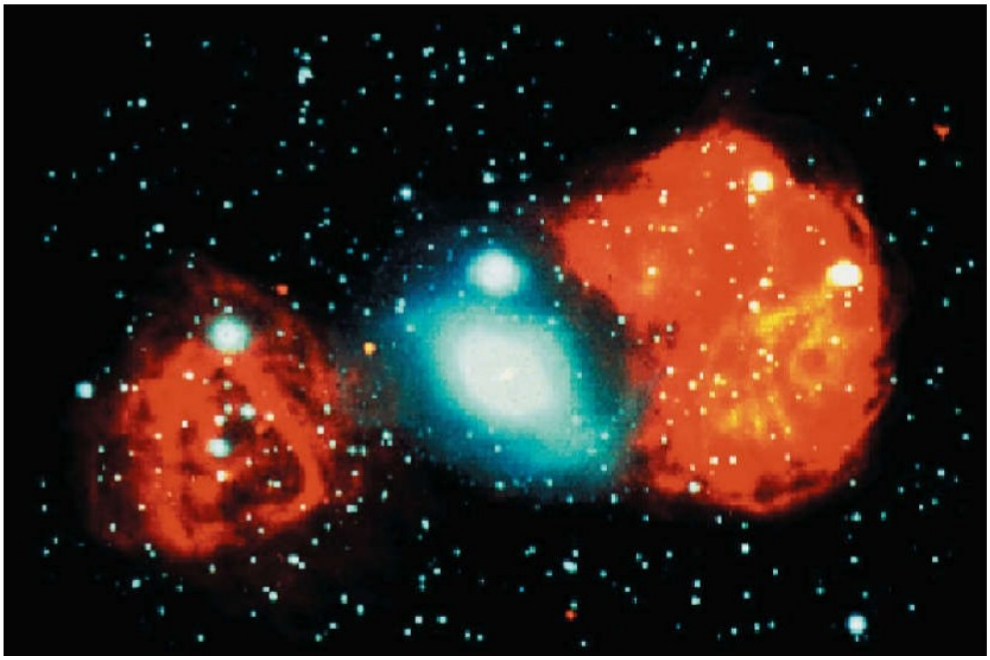


Рис. 5. Радиогалактика Печь А (NGC 1316). В центре — оптическое изображение гигантской эллиптической галактики, расположенной в середине скопления галактик в созвездии Печь, рядом с которой находятся два протяженных радиокомпонента, связанных с активностью центральной черной дыры. Вокруг центрального объекта другим оттенком отмечено рентгеновское гало. Над NGC 1316 расположена карликовая галактика, которая будет "съедена" через 100 млн лет. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

мические тесты и физику элементарных частиц. Стандартные космологические тесты — наблюдения с целью определения параметров Вселенной, применяемые в области радиоастрономии, можно условно разбить на три группы по типу изучаемых объектов: реликтовое излучение, радиогалактики и пульсары.

К первой группе тестов относятся:

- построение спектра мощности реликтового излучения, по которому определяются основные космологические параметры: все типа плотности, постоянная расширения Хаббла и другие;
- статистика реликтового сигнала и определение топологии Вселенной;
- уровень сглаживания фонового излучения при гравитационном линзировании скоплений галактик (тест на плотность барионной и темной материи и на постоянную Хаббла);
- корреляционные спектры поляризации (тест на время образования первых звезд и "зажигания" первых активных ядер галактик (Е-мода поляризации); на уровень первичных гравитационных волн (И-мода поляризации).

Тесты второй группы (для радиогалактик):

- зависимость "$\log N - \log S$" (число источников – плотность потока) — тест на плотность активных галактических ядер, эволюцию радиоисточников и евклидову космологическую модель;
- зависимость "плотность потока – красное смещение" (тест "стандартная свеча");
- возраст звездных систем (тест "стандартные часы") для исследования параметров плотности и динамики Вселенной;
- гравитационное линзирование (тест на плотность видимой и темной материй, темной энергии) также применяется при поиске и исследовании очень далеких объектов;
- поиск далеких скоплений и протоскоплений галактик, отражающих формирование крупномасштабной структуры (измерение параметров плотности разных типов энергетических компонентов Вселенной);
- скорости вращения галактик и поиск темной материи по наблюдениям водорода;
- поиск сверхмассивных черных дар (исследование проблемы их возникновения и роста в рамках проверяемых космологических моделей);

- исследование радиогало скоплений и галактик для поиска частиц — кандидатов в темную материю.

Тесты третьей группы (для пульсаров):

- двойные пульсары (исследование излучения гравитационных волн);
- пространственная сетка пульсаров (регистрация и изучение гравитационных волн).

Кроме того, есть различные комбинированные тесты: например, одновременно для реликтового излучения и радиогалактик; их результатом может стать определение согласованной со всеми экспериментами космологический модели.

Перед тем, как перейти к рассмотрению основных космологических тестов для радиогалактик, отметим несколько важных фактов об их физических и эволюционных свойствах. Активность радиогалактик связана с активностью их ядер (или "центральных машин"). Среди применяемых гипотез простейший вариант "центральной машины" — квазар, содержащий сверхмассивную черную дыру массой $10^9 - 10^{10} M_\odot$ и аккреционный диск из обращающегося и падающего на нее разогретого газа. Из ядра галактики истекают коллимированные струи (джеты) ионизованного вещество со скоростью до 1/3 от световой и перпендикулярные плоскости аккреционного диска. Джеты сталкиваются с окружающей средой, образуя протяженные радиоизлучающие компоненты, в которых наблюдаются горячие пятна с "крутым" радиоспектром. Вследствие этого формируется радиоисточник типа FR II (гантелевидной формы и с высокой светимостью). Если вещество в аккреционном диске иссякает, то "затухает" и активность радиоисточникам; тогда образуется радиогалактика типа FR I (с выделяющимся центром и двумя симметрично расположенными широкими радиокомпонентами). Квазар в эллиптической галактике может быть экранирован от наблюдателя пылевым тором; тогда звезды галактики не "засвечиваются" ядром. Отсюда следует: для того, чтобы радиоисточник "загорелся", необходимо наличие и газа, и сверхмассивной черной дыры. Источником газа в "спокойной" эллиптической галактике может стать другая галактика, ранее "съеденная" (или испытавшая слияние — мерджинг) родительской галактикой. Процесс мерджинга галактик чаще происходит там, где их плотность повышена, а именно — в скоплениях галактик. Самые массивные галактики скоплений — гигантские эллиптические галактики (gE) — чаще других испытывали слияния и чаще других являются мощными радиоисточникам, особенно в ранние эпохи. В стандартных схемах эволюции галактик мерджинг обеспечивает как быстрый рост самой галактики, так и рост ее центральной черной дыры. Отметим, что именно существование радиогалактик высокой светимости привело к необходимости привлечения гипотезы о существовании сверхмассивных черных дыр. Гигантские эллиптические галактики вырастают и набирают массу до $10^{12} M_\odot$ довольно быстро — за первый миллиард лет существования Вселенной. С учетом того, что мощность радиоизлучения связана с массой центральной черной дыры галактики, выполнены оценки потока излучения от таких объектов. Эти оценки показали, что в эпоху "зажигания" первых радиоисточников они настолько мощные, что их можно увидеть с Земли на современных радиотелескопах на уровне 1-10 мЯн.

Итак, внутри горизонта нашей видимой Вселенной мы можем зарегистрировать сигнал практически от всех образовавшихся радиогалактик. Столь огромная мощность излучения позволяет исследовать их на любых расстояниях в Метагалактике и использовать как "пробные частицы" для изучения физических условий и динамики Вселенной в разные космологические эпохи. Еще одним важным моментом является то, что радиогалактики — это, в основном, галактики типа gE, содержащие пассивно эволюционирующее звездное "население"; для них созданы удовлетворительные модели эволюции: по светимости gE на разных длинах волн можно оценить возраст звездного "населения", а, значит, и время образование галактики.

6. РАДИОГАЛАКТИКИ КАК КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ РЕПЕРЫ

Для того, чтобы воспользоваться радиогалактиками как "пробными частицами" (или реперными точками), необходимо ориентироваться на известные стандартные параметры галактик: например, на такие, как размер, светимость, масса, возраст и их соотношения, которые либо почти не изменяются в ходе эволюции, либо меняются по известному закону. Тогда, сопоставив их наблюдаемые величины в различные космологические эпохи с ожидаемыми в космологических теориях, можно сделать несколько выводов: об удаленности объектов и возрасте Вселенной на разных красных смещениях; о плотности и свойствах окружающей материи и пространства; оценить динамические параметры Вселенной. Кроме того, наблюдаемая связь между различными физическими параметрами радиогалактик: массой галактики, массой центральной черной дыры, оптическое и радио светимостью и другими позволяет говорить о существовании так называемой фундаментальной плоскости радиогалактик. Эта связь упрощает применение некото-

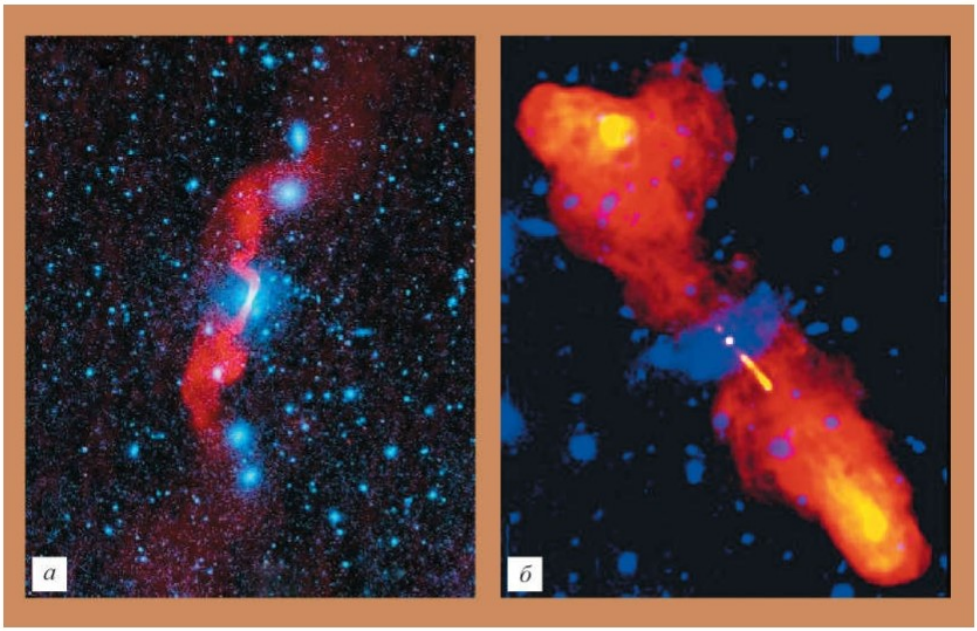


Рис. 6. Радиогалактики: а — 3C31 (класс FR I) в созвездии Рыбы, б — 3C219 (класс FR II) в созвездии Большой Медведицы. Радиоизображения наложены на оптические. NRAO, США.

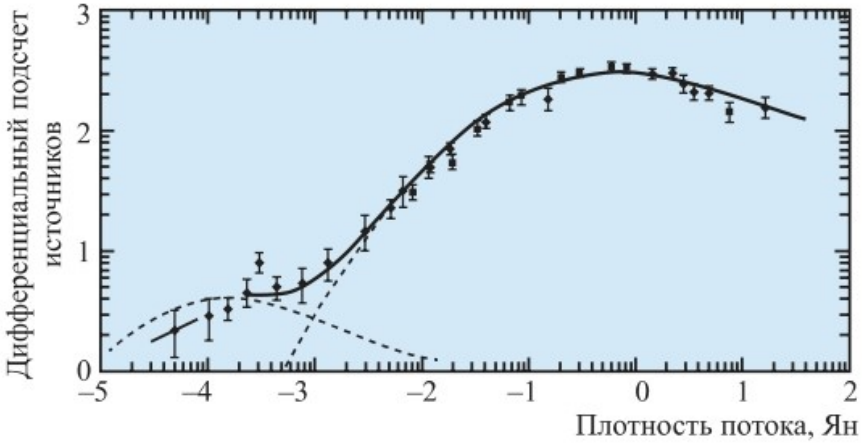


Рис. 7. График зависимости числа радиоисточников от их плотности потока (1 Ян = 10^{-26} Вт/м^2 Гц), обнаруженных на частоте 1.4 ГГц. Штриховыми линиями показан "вклад" спиральных и эллиптических галактик. Избыток числа источников объясняется эволюцией и более высоким темпом из образования в ранние эпохи. По данным американского радиоастронома Дж. Кондона, 1984 г.

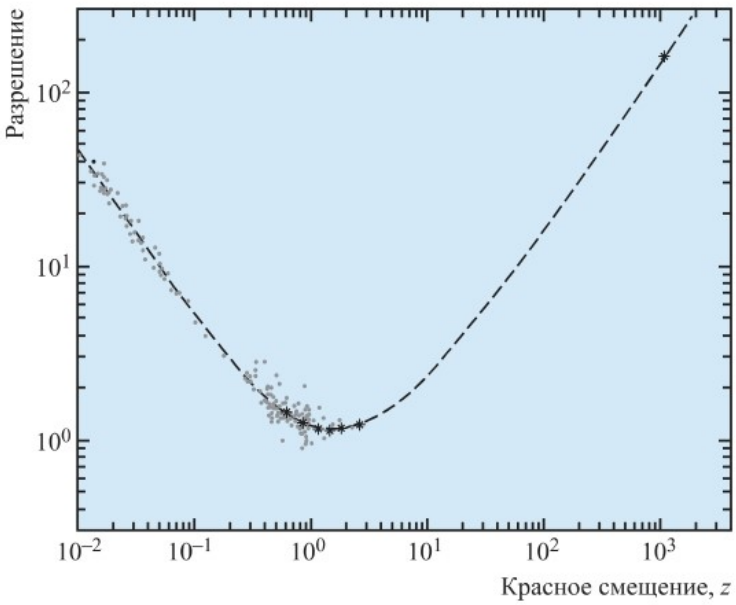


Рис. 8. Диаграмма "угловой размер - красное смещение". Каждая светлая звездочка - бин (шаг осреднения), содержащий 77 радиоисточников с миллисекундным размером. Темные звездочки соответствуют пятнам на карте реликтового излучения. Верхняя звезда справа соответствует размеру акустического горизонта Вселенной.

рых космологических тестов.

Определить космологические параметры сложно — нужна достаточно большая выборка объектов на различных красных смещениях (z), передавших нам информацию из нескольких космологических эпох. Здесь особенно важен поиск объектов на больших красных смещениях ($z > 2$), где радиоисточников известно не так много. Измерение красных смещений для наиболее далеких объектов — занятие трудоемкое, так как требует большого времени накопления сигнала. Для ускорения процесса применяют различные методы отбора кандидатов в далекие объекты, позволяющие увеличить вероятность того, что радиогалактика находится от нас далеко. В мире работает по этому направлению несколько групп ученых: В Голландии, Великобритании, Германии, Индии, США и в России.

Остановимся на описании некоторых космологических тестов, базирующихся на физических свойствах радиогалактик.

7. СТАНДАРТНАЯ ЛИНЕЙКА

Зависимость размера источника от значения красного смещения является одним из наиболее часто используемых тестов для определения параметров Вселенной в области наблюдательной космологии. К примеру, если мы знаем физический размер объектов на различных красных смещениях, то их угловой размер характеризует динамику расширения Вселенной. У радиогалактик, являющихся эволюционирующими радиоисточниками, в качестве "стандартной линейки" можно использовать две предельные величины: минимальную — размер ядра радиогалактики, определяемый размером (или массой) сверхмассивной черной дыры — и максимальный размер, определяемый скоростью и временем разлета струй из ядра галактики. Комбинируя данные различных экспериментов по угловому размеру, можно довольно точно определить космологическую модель. По такому пути пошли британские астрономы Дж. Джексон и А. Джанентта в 2006 г., объединив данные об угловых масштабах миллисекундных радиоисточников, теоретически характеризующих размер ядра, и о пятнах флуктуаций реликтового излучения (вплоть до горизонта Вселенной на $z = 1100$ для пятен размером ($\sim 25'$). Это можно сделать, используя параметр расширения Хаббла - зависимость $H(z)$, представляющую собой функцию, содержащую значения плотности разных компонентов Вселенной.

Полученная диаграмма позволяет проводить совместные оценки космологических параметров,

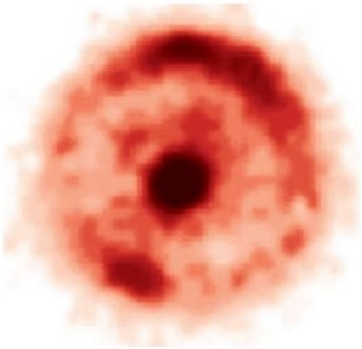


Рис. 9. Гравитационная линза типа “энштейновское кольцо” - радиоисточник JVAS B1938+666 в созвездии Дракона. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

получаемых при анализе данных от принципиально “независимых” экспериментов. В результате авторы получают следующие оценки значений параметров: плотность материи $\Omega_m = 0.302$, темная энергия $\Omega_\lambda = 0.694$, а также параметр кривизны $K = 0.013$. Отметим интересный момент — плавную стыковку масштабов, придающую символический смысл объединению разных подходов в космологии в одной диаграмме.

Вторая возможность использовать “стандартную линейку” — определить космологические параметры по физическому разносу струй (максимальному размеру радиоисточников) — расстоянию между горячими пятнами в протяженных компонентах. Для этого нужно знать общие эволюционные свойства радиогалактики: скорость движения струй, типичные время активности и размер радиоисточника в выбранную эпоху, ряд других свойств. Тогда можно найти и применить “стандартную линейку”, изменяющуюся с космологическим временем по известному закону. В 2000 г. эту работу проделала группа астрофизиков под руководством Р. Дэйли (США), подтвердив присутствие темной энергии как одного из компонентов плотности.

Отметим, что большое разнообразие форм радиоисточников размером порядка килопарсека затрудняет точное измерение параметров. Для определения размера парсека необходимо иметь представление о механизме радиоизлучения, дающем представление о действительном размере активного ядра. Тем не менее стандартные параметры, описывающие “центральную машину” — такие, как масса центральной черной дыры, скорость аккреции, угловой момент и величина магнитного поля — поддаются измерению. Это позволяет надеяться, что предлагаемые подходы для оценки космологической модели работают удовлетворительно.

8. СТАНДАРТНАЯ СВЕЧА

“Стандартная свеча” — один из часто применяемых тестов в космологии; именно с его помощью была открыта темная энергия, когда в качестве стандарта использовалась светимость вспышки сверхновой типа Ia. Применение теста “стандартной свечи” в изучении радиогалактик имеет проблемы, близкие для теста “стандартная линейка”. Радиоисточники эволюционируют, и довольно сложно установить, на каком этапе находится исследуемая радиогалактика. Радиосветимость объекта зависит от массы центральной черной дыры, темпа аккреции, типа мерджинга и от времени жизни радиоисточника. Зная функцию светимости радиогалактик (с учетом предела Эддингтона, определяемого равновесием между давлением излучения и гравитацией звезды), можно оценить число объектов с максимально возможной мощностью на заданном красном смещении. Отобрав в заданных интервалах красного смещения объекты с максимальной радиосветимостью, можно построить шкалу расстояний. Желательно иметь полную выборку радиогалактик на небе и знать функцию их светимости. В этой категории тестов радиогалактики сильно проигрывают сверхновым Ia.

Рассмотрим оптическую светимость радиогалактик. Как мы уже говорили выше, мощные радиогалактики, как правило, идентифицируются с гигантскими эллиптическими галактиками. Такие объекты имеют сравнительно однородное, пассивно эволюционирующее звездное “население”, эволюция которых легко описывается. Кроме того, если гигантские эллиптические (gE) галактики, являясь центральными галактиками скоплений, возникали приблизительно в одну космологическую эпоху, то они должны иметь схожую историю звездообразования и, таким образом, являться стандартом в послереионизационный период эволюции Вселенной. В качестве основного зонда в ранние эпохи ($z > 1$) для поиска gE-галактик как раз и используются радиогалактики. Основным здесь является тест “инфракрасная звездная величина — красное смещение” (диаграмма Хаббла для K-величины “$K - z$”). В применении к радиогалактикам тест “чувствителен” как к эволюции их звездного “населения”, так и к выбору космологической модели.

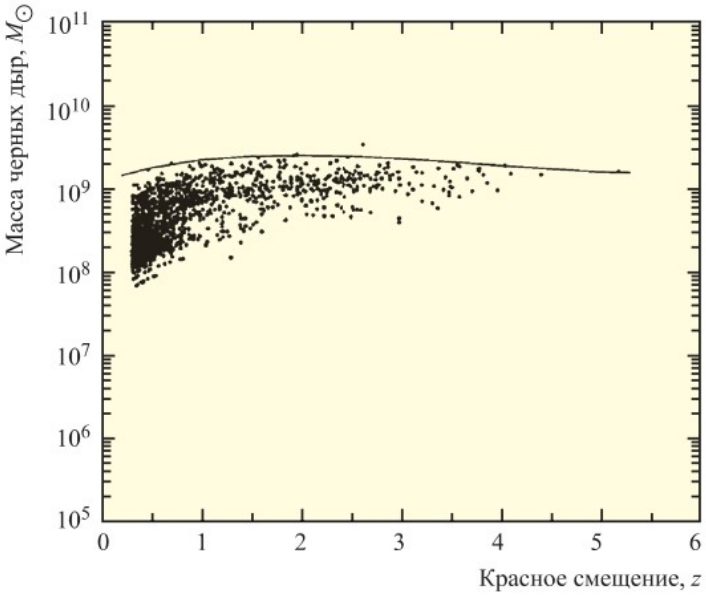


Рис. 10. График распределения значений масс черных дыр, рассчитанных по светимости на длине волны 6см для 2400 радиогалактик. По данным М. Хабибуллиной и О. Верходанова, 2011 г.

9. "СТАНДАРТНЫЕ ЧАСЫ" — ВОЗРАСТ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

Возраст галактики также позволяет создать независимый от космологии тест, основанный лишь не скорости термоядерных реакций внутри звезд, — для оценки динамики расширения Вселенной. Если мы знаем эпоху возникновения галактик и можем измерить их возраст по составу звездного "населения", то может и оценить возраст Вселенной (t) на заданном красном смещении (z). Возраст галактик характеризует и эволюцию вещества во Вселенной в целом, и эволюцию активности ядер галактик, и связанные с ними сверхмассивные черные дыры. Так, например обнаруженная радиогалактика TNJ0924-2201 в созвездии Гидры с $z = 5.19$ показала, что для массивной черной дыры, "отвечающей" за активность галактики (при возрасте Вселенной около 1 млрд лет), важен очень быстрый и эффективный процесс ее образования, который на тот момент необходимо было объяснить. Другая интересная проблема связана с существованием очень старого звездного "населения" на больших красных смещениях. Загадка, связанная с быстрым формированием гигантских эллиптических галактик, решается в иерархической схеме в рамках современной стандартной модели ΛCDM (с доминирующей темной энергией и холодной темной материей), когда галактики типа gE быстро "вырастают" за счет слияний сотен мелких (при z = 10–13). Это было продемонстрировано в модельном эксперименте построения крупномасштабной структуры Вселенной — "Миллениуме".

Для оценки возраста звездной системы требуются фотометрические измерения и знание распределения энергии в спектре эллиптических галактик; оно определяется составом звездного "населения" и зависит от возраста звезд галактики. Это зависит от выбора оптимальной модели спектра, соответствующей фотометрическим данным. Тогда, используя максимальный возраст галактик из имеющихся в выборке на заданных z, можно построить огибающую кривую $t(z)$, характеризующую возраст Вселенной, и, как следствие, — определить динамику ее расширения. Последняя описывается параметрами плотности разных компонентов Вселенной, от которых зависит скорость ее расширения — параметр Хаббла $H(z)$.

10. ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ

Открытие предсказанных Эйнштейном гравитационных линз дало мощный толчок в развитии методики измерения космологических параметров и поиске далеких объектов. Радиогалактики на этом

пути были практически первыми объектами, которые применялись в качестве зондов при поиске гравитационных линз. Это связано и с тем, что родительские галактики являются, в основном, самыми массивными галактиками скоплений, наиболее сильно искривляющими пространство.

Поисковые обзоры гравитационных линз важны для космологии. При внушительном числе зарегистрированных гравитационных линз оценку космологических параметров можно сделать большому их количеству на различных красных смещениях. Например, оценки, полученные в 2002 г. в обзоре неба CLASS на радиотелескопе VLA (США), показали, что доля материи во Вселенной составляет $\Omega_m = 0.31$. Гравитационные линзы в настоящий момент являются одним из наиболее важных независимых тестов при исследовании космологических параметров плотности материи. Кроме того, фокусируя и усиливая проходящее около них излучение, они позволяют обнаружить далекие объекты, недоступные для наблюдения с помощью существующих инструментов. Таким образом (наряду с предоставлением возможности измерения параметров) линзы являются "гигантскими космическими телескопами" для исследования очень далекой Вселенной. Отметим, что самая первая гравитационная линза типа "эйнштейновское кольцо" наблюдалась в обзоре "Холод" на РАТАН-600 и выглядела как двойной радиоисточник RX1131+0456 в созвездии Льва, и в 1988г. в обзоре Массачусетского технологического института была распознана как гравитационная линза.

11. СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Одной из главных проблем в исследовании далеких радиогалактик ($z > 3$) является проблема определения происхождения и скорости роста сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в их ядрах. Открытие радиогалактик на больших красных смещениях ($z = 5.19$ и 4.515), когда возраст Вселенной составлял 1.1–1.3 $\times 10^9$ лет, а квазаров 800-900 млн лет ($z = 6.43$ и 7.085) после Большого взрыва — показало, что существует загадка быстрого образования СМЧД массами $10^9 M_\odot$ в самую раннюю эпоху. Быстрое (в течение 800 млн лет) образование черных дыр в рамках модели ΛCDM требует применения особых моделей, объясняющих такую скорость роста. Если формирование массивных черных дыр описывается иерархической схемой (как и формирование их родительских галактик), то этот процесс должен быть быстрым и эффективным. Для объяснения существования СМЧД привлекаются и модели с первичными массивными черными дырами, сформировавшимися после Большого Взрыва (но до образования галактик).

В рамках иерархической модели, соответствующей космологической модели ΛCDM удается объяснить рост СМЧД слиянием меньших черных дыр. Тогда максимум активности ядер галактик будет приходиться на $z = 2$. Наши оценки масс черных дыр для 2400 далеких радиогалактик тоже помогают выделить эту эпоху массового слияния галактик, соответствующую иерархической модели.

12. ПРОГРАММА "БОЛЬШОЕ ТРИО"

Российский проект "Большое Трио", проводимый в САО РАН, также направлен на поиск и исследование далеких радиогалактик. Обзор исследований радиогалактик и результатов проекта "Большое Трио" приведен в монографии авторов "Радиогалактики и космология" ("Физматлит", 2009). Отбор кандидатов в далекие радиогалактики проходил в несколько этапов:

- селекция обнаруженных в обзоре "Холод" на РАТАН-600 объектов по спектральным индексам с использованием низкочастотного (365 МГц) каталога Техасского обзора;
- картографирование этих объектов с помощью VLA с целью морфологической классификации и для уточнения их координат;
- оптическое отождествление по Паломарским картам (позднее и по другим обзорам: DSS2, SDSS);
- желательная вторичная селекция объектов с признаками двойственности, характерными для FR II;
- глубокая многоцветная фотометрия (оценка фотометрических и цветовых красных смещений и цветового возраста звездного "населения");
- спектроскопия наиболее интересных объектов;
- определение физических характеристик: расстояние, размеры, энергия релятивистских частиц и магнитного поля, ожидаемый поток рентгеновского излучения с учетом комптоновского рассеяния реликтовых фотонов на космических лучах в радиокомпонентах; распределение по красному смещению и по цветовому возрасту звездного "населения"; оценка момента формирования родительской галактики, массы сверхмассивной черной дыры в их центре, темпов роста черных дыр);
- оценка космологических параметров по тесту "стандартные часы".

Рис. 11. Крупные инструменты, использовавшиеся в наблюдения по программе “Большое Трио”: а — радиотелескопы РАТАН-600 САО РАН, б — VLA (NRAO, США). Фото САО РАН и NRAO, США.

Рис. 11. (Продолжение). Крупные инструменты, использовавшиеся в наблюдения по программе “Большое Трио”: в — оптический 6-м телескоп БТА САО РАН. Фото САО РАН.

В программе “Большое Трио” далекие объекты выбирались из источников с наиболее крутым радиоспектром. Это увеличивало вероятность того, что радиогалактика находится от нас далеко. Далее на радиоинтерферометре VLA строились карты радиоисточников и из них отбирались объекты типа FR II как более молодые и мощные. Подготовленные списки источников использовались в фотометрических и спектральных наблюдениях на БТА.

Одним из выдающиеся результатов программы “Большое Трио” стало обнаружение радиогалактики RC J0311-0507 (созвездие Кита) на красном смещении $z = 4.514$, когда возраст Вселенной составлял 1.3 млрд лет. Эта радиогалактика стала второй по дальности и первой из наиболее отдаленных (дальше 12.5 млрд св. лет, или $z > 4$) по радиомощности. Оценка массы центральной сверхмассивной черной дыры по радиосветимости составила приблизительно $10^{10} M_{\odot}$, что говорит о ее быстром росте в ранние эпохи эволюции Вселенной.

Используя результаты программы “Большое Трио”, мы также провели космологический тест, связанный с возрастом звездного “населения” (по фотометрическим данным наблюдений БТА и других телескопов). Применив этот подход для выборки далеких радиогалактик и гигантских эллиптических скоплений, мы определили с точностью до 10% плотность материи ($\Omega_m = 0.2$) и темной энергии ($\Omega_\lambda = 0.8$), а также постоянную Хаббла ($H_0 = 71.5$ км/с/Мпк). Несмотря на различие параметров от измеренных позднее с помощью европейской космической обсерватории “Планк” (Земля и Вселенная, 2014, №1), они не противоречили стандартной космологической модели ΛCDM. Важно отметить, что методы (с использованием цветовых и спектральных возрастов галактик) основаны на измерении скорости расширения Вселенной с помощью физических процессов, связанных не с космологией, а с темпами термоядерных реакций в звездах.

Приведем важные результаты программы “Большое Трио”:

- построены радиоспектры объектов; 10% (104 источника) из них оказались “крутыми” (по данным РАТАН-600);
- построены радиоизображения радиоисточников с секундным или с субсекундным разрешением (по данным радиоинтерферометра VLA);
- проведено сравнение в видимом свете радиоисточников с “крутыми спектрами” с объектами Паломарского атласа неба и снимками 6-м телескопа САО РАН в глубоком обзоре;
- для 50 объектов (в основном, ярче 22^m) измерены красные смещения;
- подготовлен атлас оптических изображений радиогалактик и квазаров для RC-каталога;
- обнаружена радиогалактика с красным сме-

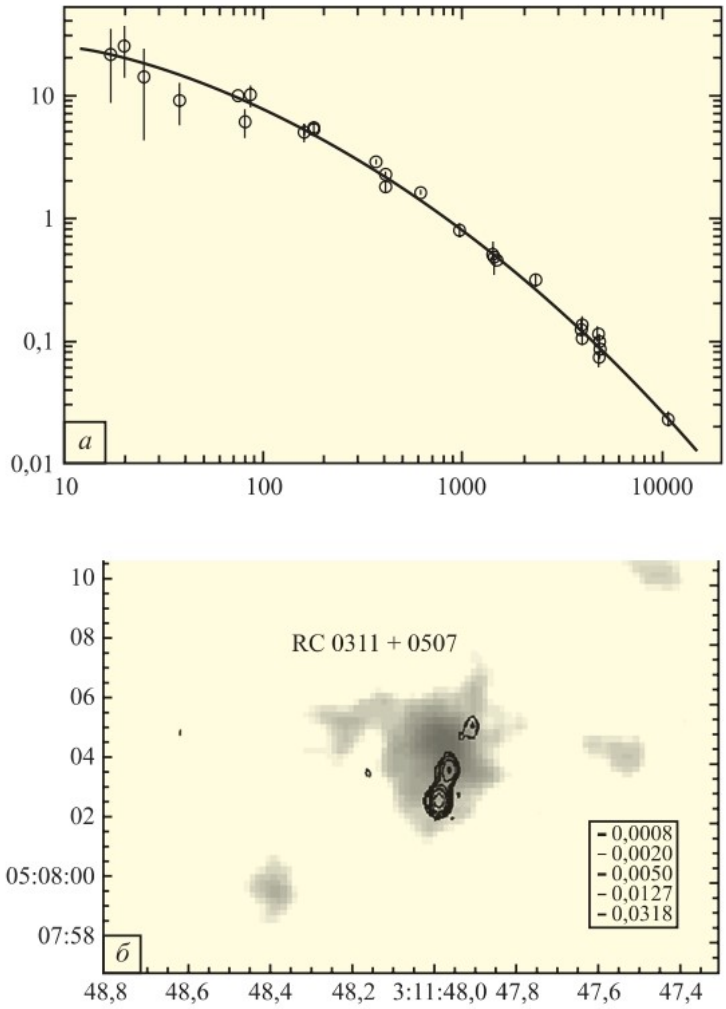


Рис. 12. Графики радиоспектра источника RC J0311+0507 в созвездии Кита: а —- спектральный индекс равен 1.31 в диапазоне частот 365-4850 МГц; б —- наложение линий равной радиояркости (радиоизофот) объекта RC J0311-0507 на изображение родительской галактики в фильтре R по данным БТА. По данным А. Копылова и других, 2006 г.

щением $z = 4.514$ — вторая по дальности и первая среди очень далеких ($z > 4$) по радиомощности;

- оценены возрасты звездных систем и z их образования по фотометрическим данным и синтетическим моделям спектров;
- построена зависимость $t(z)$, по которой оценены космологические параметры Хаббла (H_0) и плотности темной энергии (Ω_λ).

13. СОВРЕМЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторы рассмотрели основные этапы исследования радиогалактик, открытых на радиотелескопе РАТАН-600 в ходе выполнения программы “Большое Трио”. Удивительным фактом стало открытие среди относительно небольшого первичного списка радиоисточников RC-каталога новой, второй по дальности среди известных, радиогалактики. Для небесных объектов программы “Большого

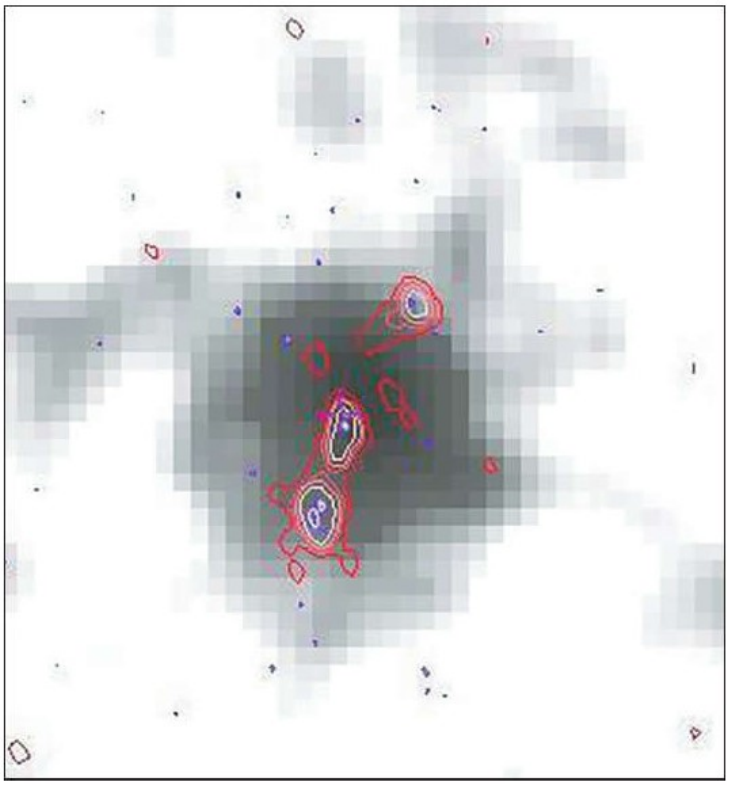


Рис. 13. Радиогалактика RC J0311+0507, удаленная от нас на 12.5 млрд св. лет. На оптическое изображение, полученное на телескопе ББТА, наложены линии равной радиояркости (радиоизофоты), демонстрирующие форму радиоисточника. Радиоизмерения сделаны на телескопе MERLIN (Великобритания). По данным Ю. Парийского и других, 2014г.

Трио" измерено множество физических параметров, характеризующих эволюцию звездного населения и сверхмассивных черных дыр в далеких радиогалактиках. Отметим, что изучение радиогалактик не ограничивается анализом их физических свойств, но позволяет понять эволюцию Вселенной. К настоящему времени мы, скорее всего, уже знаем стандартную космологическую модель, соответствующую фундаментальным параметрам:

- известен химический состав Вселенной: $\sim$ 75%H, $\sim$ 25%He; малая часть (0.01%) включает остальные химические элементы;
- подтверждено существование реликтового излучения и его флуктуации (позволившие по данным космических обсерваторий "WMAP" и "Планк" определить все основные космологические параметры);
- определена крупномасштабная структура Вселенной;
- темная материя доминирует над видимой в галактиках и скоплениях галактик (по данным обсерватории "Планк", плотность темной материи составляет $\Omega_{\Lambda\mathrm{CDM}} = 0.259$, плотность видимой материи — $\Omega_h = 0.049$);
- Вселенная расширяется, ускоряясь (по данным обсерватории "Планк"; плотность темной энергии $\Omega_\lambda = 0.691$, постоянная Хаббла $H_0 = 67.74$ км/с/Мпк).

Однако может оказаться, что существуют и "пропущенные" параметры в космологической модели ΛCDM, они измеряются независимо (как это случилось с плотностью темной энергии в конце прошлого века). Независимые космологические тесты, основанные на разнообразных данных (в том числе и по радиогалактикам), могут помочь в подобных исследования.

На радиотелескопе РАТАН-600 исследования радиогалактик продолжаются. Строятся новые радиотелескопы — SKA, ALMA, LOFAR, которые от-

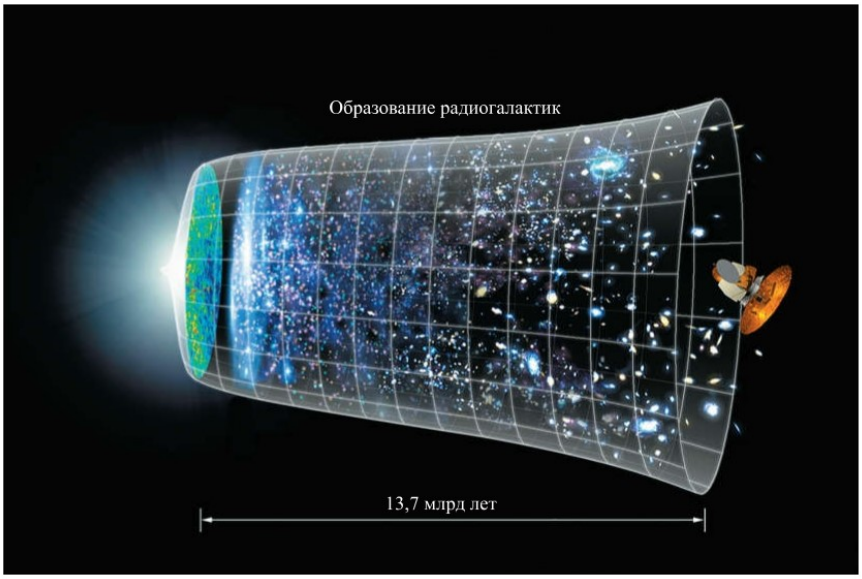


Рис. 14. Современная модель этапов эволюции Вселенной. Эпоха возникновения первых радиогалактик соответствует возрасту Вселенной — 0.7–1.2 млрд. лет. Рисунок NASA.

крывают новые возможности в исследовании радиогалактик, в понимании физики происходящих в них процессов; они позволяют заглянуть в эпоху формирования первых звезд и галактик, "увидеть" слияние сверхмассивных черных дыр. Можно ожидать, что дальнейшие исследования радиогалактик подарят нам еще много интересного.

Авторы выражают признательность своим коллегам, принимавшим участие в программе "Большое Трио" на разных этапах ее выполнения: Н.С. Соболевой (СПбФ САО), О.П. Желенковой (САО), Уи.М. Госсу (НРАО, США), А.И. Копылову (САО) и А.В. Темирову (СПбФ САО).

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ РАДИОГАЛАКТИК РАЗНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ПО МИКРОВОЛНОВЫМ ДАННЫМ МИССИИ PLANCK*

О. В. Верходанов[1], Д. И. Соловьев[2], О. С. Улахович[3], М. Л. Хабибуллина[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия
[3]Приволжский (Казанский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Методом стэкинга исследованы области карт микроволнового фонового излучения (CMB), построенных по данным обсерватории Planck, в окрестности различных популяций радиоисточников и гигантских эллиптических галактик. Выборки объектов включают в себя гигантские радиогалактики (ГРГ), радиоисточники, отобранные по радиоспектральному индексу и красному смещению, а также гамма-всплески, используемые как вторичная сравнительная выборка. Исследованы топологические свойства сигнала CMB в окрестности среднего объекта популяции, а именно поиск присутствия максимумов и минимумов в средней площадке. Обнаружено отличие сигнала в окрестности ГРГ от других типов объектов.

Ключевые слова: радиоконтинуум: галактики — гамма-всплески: общее — космический микроволновой фон — методы: анализ данных

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытый доступ к многочастотным картам космической миссии Planck[1] [1] позволяет провести разнообразные исследования физических и статистических свойств объектов различных популяций космических объектов. Среди важных выигрышных характеристик Planck ESA по сравнению с предыдущей космической миссией WMAP NASA можно отметить более высокое разрешение (в три раза), более высокую чувствительность (в десять раз) и девять частотных полос, позволивших разделить компоненты излучения [2]. Все это дает возможность изучать более слабые объекты по сравнению с доступными по данным обсерватории WMAP.

Одним из методов, широко применяемых для анализа популяций слабых радиоисточников, является осреднение площадок вокруг объектов исследуемой выборки в заданном диапазоне длин волн [3–6]. Такая процедура осреднения данных для разных областей неба получила название стэкинг (stacking). Если статистические свойства сигнала в поле источника отличаются от ожидаемого распределения для большинства объектов выборки, как в случае присутствия положительного (для радиоисточника) или отрицательного (при наличии СЗ-эффекта) источника, то осреднение позволяет выявить общее поведение искомого сигнала на фоне шума. Например, на картах реликтового излучения (Cosmic Microwave Background — CMB) неслучайные источники приводят к изменению распределения пиков космологического шума, которые при таком осреднении подавляются, в то время как сигнал самих источников усиливается по отношению к фону [7–9].

Особый интерес для изучения в микроволновом диапазоне с помощью стэкинга представляют гигантские эллиптические галактики (gE). Они интересны тем, что

1) являются, скорее всего, результатом слияния (мерджинга) галактик в скоплениях, указывая тем самым направление на скучивание материи в крупномасштабной структуре, что отражается в микроволновом фоне посредством эффекта Сюняева–Зельдовича [10];

*Астрофизический бюллетень. 2016. 71(2). С. 150
[1]http://www.rssd.esa.int/Planck/

2) они являются родительскими галактиками для радиоисточников, тем самым давая возможность наблюдателю отбирать кандидаты в далекие ($z > 1$) скопления по радиоизлучению [11];
3) в случае регистрируемого радиоисточника они наблюдаемы на больших красных смещениях ($z > 2$), что, в свою очередь, обусловлено присутствием в их центре СМЧД [12–15];
4) родительские gE-галактики с большим содержанием пыли видны в микроволновом диапазоне из-за присутствия мощной тепловой компоненты в распределении энергии в спектре [16];
5) как сами массивные gE-галактики, так и скопления, в которых они находятся, создают усиливающий эффект гравитационного линзирования, который позволяет отбирать далекие объекты из их окружения в микроволновом диапазоне [17];
6) в их окружении на больших z в субмиллиметровом диапазоне наблюдаются далекие галактики со вспышкой звездообразования [17];
7) короткие гамма-всплески, обусловленные слиянием проэволюционировавших массивных звезд [18, 19], происходят в основном в старых звездных системах;
8) кроме того, они сами могут приводить к СЗ-эффекту, обусловленному взаимодействием фотонов CMB с горячими электронами, присутствующими в окружении массивной gE-галактики [20].

В предлагаемой работе мы исследуем свойства популяции gE-галактик, являющихся родительскими для гигантских радиогалактик (ГРГ), в микроволновом диапазоне, а также сравниваем их с популяциями gE, связанными с другими классами объектов. Для этой цели мы проводим стэкинг площадок, вырезанных из карт микроволнового фона, полученных в космической миссии Planck, в окрестности ГРГ и других выборок источников. В анализе мы используем выборку ГРГ, впервые подготовленную по данным литературы (см. раздел 2.1), выборку радиоисточников обзора WENSS [21] в диапазоне прямых восхождений $0^{\rm h} \leq \mathrm{RA} < 2^{\rm h}$, выборку далеких радиогалактик с красными смещениями $z > 0.3$ [22–24], список гигантских эллиптических галактик из работы [25], а также выборки гамма-событий из каталогов BATSE [26] и BeppoSAX [27], которые применялись в сравнительном анализе.

Работа изложена следующим образом. Сначала описываются выборки радиогалактик и объектов, которые могут быть связаны с эллиптическими галактиками, например, гамма-всплески (GRB). Также представлен каталог ГРГ, скомпилированный по данным разных работ, который используется для изучения популяции этих объектов. Для подготовленных списков строятся и анализируются средние изображения, выделенные из карт CMB Planck из многочастотных карт наблюдений миссии. Исследуются топологические свойства средних изображений и средние спектры разных популяций. В Заключении обсуждаются основные результаты работы.

2. ВЫБОРКИ

Используемые в данной работе выборки объектов, родительские галактики которых связываются с гигантскими эллиптическими галактиками, разнообразны как по методам разбиения, так и по объему. Тем не менее даже минимальные выборки — гигантские эллиптические галактики в скоплениях (25 объектов) и радиоисточники обзора WENSS в диапазоне прямых восхождений $\mathrm{RA} < 2^{\rm h}$ с радиоспектральными индексами $\alpha \geq 0$ (19 объектов) — позволяют уменьшить гауссовый шум на средней площадке более чем в четыре раза и изучить топологические свойства CMB (наличие минимумов и максимумов) в окрестности среднего объекта популяции внутри области радиусом $7'$ (порядка 1.5 диаграммы направленности антенны обсерватории Planck на высоких частотах). Ниже мы опишем используемые выборки, включающие отобранные объекты по радиоморфологии, радиоспектральному индексу, дальности, нахождению в скоплении и возможной связи с гамма-всплесками.

2.1. Гигантские радиогалактики

Выборка гигантских радиогалактик (ГРГ), где собраны все доступные из литературы объекты с установленными линейными размерами $B > 1$ Мпк и угловыми размерами $\theta > 4'$, представлена в таблице 1.

Таблица 1. Список гигантских радиогалактик, используемых в осреднении процедурой ‘`stacking`’. Величины в скобках в столбце красных смещений — фотометрические оценки из работы [28].

Name	FR-type	Size, Mpc	z	Reference
J 000332+035114	II	2.08	0.097	[29]
J 003406-663935	II	2.0	0.1103	[30, 31]
J 004817-830842	II	1.34	0.2591	[32]
J 005332+403059	II	1.52	0.1488	[33–35]
J 011204+493004 (3C35)	II	1.1	0.0670	[33–35]
J 011625-472218	II	1.5	0.1461	[31]
J 013936+395712 (4C39.04)	II	1.6	0.2107	[34–39]
J 014345-543029	II	1.0	0.1791	[32]
J 020033+404912 (4C40.09)	I/II	1.9	0.0827	[34, 35]
J 021309-474356 (PKS 0211-47)	II	1.6	0.2200	[40]
J 021419+325114	II	1.6	0.2605	[35]
J 023714-643006	II	2.2	0.364:	[32]
J 031305+412001	II	1.8	0.1340	[34, 35]
J 031822+682932	II	1.74	0.0901	[33, 36, 41]
J 032037-451937	II	1.3	0.9792	[31, 36, 42, 43]
J 032555-773006	II	1.7	0.2771	[32]
J 033143-771552	II	2.7	0.1456	[30–32]
J 042218+151239	I	3.98	0.409	[29]
J 043911-242215	II	1.1	0.8340	[36]
J 045258+520429 (3C130)	I	1.1	0.1090	[37, 44]
J 045908-525208	II	1.1	0.0957	[30, 31]
J 050542-284017		2.5	0.0383	[31, 45, 46]
J 051332-302850		1.2	0.0576	[30, 31]
J 063143-540730	II	1.0	0.2036	[32]
J 063634-203530 (PKS 0634-20)	II	1.2	0.0552	[40, 47]
J 065434+732036	II	1.9	0.1145	[35]
J 070202+485922	I/II	1.9	0.0650	[35]
J 070531-451312		1.1	0.1242	[30, 31]
J 070922-360134		1.0	0.1109	[31]
J 072018+283754	II	1.5	0.2705	[28, 48]
J 072519+302545	II	1.2	(0.70)	[28]
J 074844+554911 (DA240)	I/II	2.0	0.0240	[34, 35]
J 081105-680029	II	1.3	0.2311	[32]
J 081637+334754	II	1.2	(0.42)	[28]
J 082003+753837	II	2.3	0.2374	[35, 36]

Таблица 1. (Продолжение)

Name	FR-type	Size, Mpc	z	Reference
J 082606+691955 (8C 0821+695)	II	3.0	0.5380	[**?**, 34]
J 091252+350929	II	1.58	0.2489	[28, 33, 37, 38, 48]
J 092753+351053	II	2.2	(0.55)	[28]
J 095014+731533 (4C73.08)	II	1.5	0.0581	[34, 35]
J 100604+345427 (3C236)	II	5.7	0.1005	[34–36]
J 101114+311118	II	1.7	(0.50)	[28]
J 102756-231202	II	1.1	0.3090	[36]
J 103309+564420 (HB 13)	I	2.6	0.0450	[34]
J 115549+402905	II	1.4	(0.53)	[28]
J 121159+741925 (4CT74.17)	II	1.2	0.107	[34–36]
J 121611+415938	II	1.6	0.2426	[35, 38]
J 123530+212052 (3C274.1)	II	1.0	0.4220	[36]
J 125311+404118	II	1.0	0.2302	[28, 48]
J 125435+293406	II	1.6	(0.42)	[28]
J 125913-773706	II	1.5	>0.3	[32]
J 130459-324914		1.3	0.1528	[30, 31]
J 131146+405853	II	1.0	0.0358	[34, 35]
J 131406+693657 (DA340)	II	1.3	0.1060	[34–36]
J 133035+385018	II	1.9	0.63?	[28, 48]
J 133612-801818	II	2.3	0.2478	[32]
J 134302+375834	II	3.1	0.2267	[28, 36–38]
J 135047+642916 (3C292)	II	1.1	0.7100	[36]
J 135520+292354	II	1.5	(0.43)	[28]
J 140044+301806	II	2.6	0.206	[34–38, 44, 49]
J 142027-054642	II	4.7	0.3067	[50]
J 142817+291808	II	1.9	0.0870	[28, 35]
J 142849+393853	II	1.6	(0.50)	[28]
J 144529+305142	II	1.7	0.42	[28, 48]
J 145133+335806	II	1.1	0.3251	[28, 48]
J 145306+330827	II	1.7	0.249	[28, 35, 37, 38, 48]
J 144851-400806	II	1.5	0.123	[51]
J 151331+384130	II	1.7	0.52?	[28, 48]
J 152503+334606	II	1.3	(0.47)	[28]
J 153709+842253	II	2.1	0.201	[35, 36]
J 154902-321747	I/II	1.11	0.1081	[31, 33]
J 155212+200512 (3C326)	II	2.5	0.0895	[36–38]

Таблица 1. (Продолжение)

Name	FR-type	Size, Mpc	z	Reference
J 155429+394506	II	1.1	(0.35)	[28]
J 155504+365306	II	1.3	0.2472	[28, 48]
J 160421+373106	II	1.3	0.814	[28, 48]
J 162811+514656	II	1.6	0.0547	[34, 35, 52]
J 163120+823404 (NGC 6251)	I/II	3.0	0.0247	[34, 35]
J 164908+311406	II	1.2	0.4373	[28, 48]
J 171225+355830	II	1.0	0.3357	[28, 48]
J 172515+392330	II	1.2	0.2898	[28]
J 172834-723730	II	2.2	0.4735	[32]
J 174840-233542	II	1.4	0.24	[53]
J 183514+620421	II	1.1	0.518	[54]
J 191054-704918	I	1.2	0.2172	[32]
J 191921-795942	II	1.8	0.3462	[32]
J 194709-822254	II	2.1	0.333:	[32]
J 204244+750812 (4C74.26)	II	1.6	0.1040	[34–36, 44]
J 214535+815523	II	3.7	0.1457	[35]
J 215909-721830	II	1.0	0.0974	[30–32]
J 231600-282359	II	2.2	0.2293	[33, 55, 56]

2.2. Выборки сравнения

Первая выборка сравнения сформирована из радиоисточников обзора WENSS [21] с прямыми восхождениями в диапазоне $0^{\rm h} \le {\rm RA} < 2^{\rm h}$, которые ранее исследовались в микроволновом диапазоне [57]. Обзор WENSS (The Westerbork Northern Sky Survey) [21] выполнен на частоте 325 MHz и имеет предельный поток на уровне около 18 мЯн (порядка 5σ) с разрешением $54'' \times 54'' \,{\rm cosec}(\delta)$. Он покрывает Северную часть неба выше 29° по склонению. С использованием базы данных CATS [58] были проведены отождествление источников из первых двух часов по прямому восхождению, аппроксимация радиоспектров в процедуре `spg` [59] пакета FADPS [60, 61] и отбор источников с линейными спектрами. Последние были разбиты на подвыборки, содержащие объекты с различными радиоспектральными индексами α ($S \sim \nu^{-\alpha}$): $\alpha < -1.1$; $-1.1 \le \alpha < -0.75$; $-0.75 \le \alpha < -0.5$; $-0.5 \le \alpha < 0$ и $\alpha \ge 0$.

Следующая выборка объектов для сравнения популяций представляет собой список далеких ($z > 0.3$) радиогалактик и описана в работах [22–24]. Этот список ранее уже использовался для исследования данных микроволнового фона, в частности, для поиска крупномасштабных течений вещества [62]. Радиоисточники выборки принадлежат популяции галактик самой высокой светимости (достигающей у отдельных объектов 10^{48} эрг с$^{-1}$, как, например, у PKS 0637-752 [63]), благодаря чему возможно изучать их на больших красных смещениях и тем самым использовать как зонды состояния Вселенной в другие космологические эпохи. Чрезвычайно важным моментом при исследовании этих источников может считаться наиболее вероятная гипотеза, что для большей части далеких мощных радиоисточников родительскими галактиками являются гигантские эллиптические галактики (gE), которые на начальном этапе селекции могли бы использоваться как стандартные свечи, линейки и часы. В пользу этой гипотезы говорят и радиояркость gE, связанная с присутствием сверхмассивной черной дыры, являющейся триггером активности, и оптические данные, с использованием которых строится диаграмма Хаббла K-z, подтверждающая наличие типич-

ного для gE звездного населения в ранние космологические эпохи [64,65]. Отождествление далеких радиогалактик с gE также важно и при прослеживании эволюции звездных систем на больших красных смещениях, и при поиске далеких групп галактик или протоскоплений, в центре которых они находятся, и при исследовании процессов слияния и взаимодействия, на которые может указывать проявляющаяся активность их ядер. Каталог радиогалактик [22] содержит 2442 источника со спектроскопическими красными смещениями, фотометрическими величинами и плотностями потоков в радиодиапазоне, размерами радиоисточников, именами исходных каталогов, координатами, а также радиоспектральными индексами, которые вычислялись по результатам кроссидентификации с радиокаталогами из базы данных CATS[2] [58]. Основные параметры входящих в каталог объектов — красное смещение $z > 0.3$ и морфологические свойства радиогалактики. Он, в основном, очищен от объектов с красными смещениями, определяемыми фотометрическим методом, и обладающих свойствами квазаров по имеющимся литературным данным. Несмотря на то, что в каталоге радиогалактик не исключено присутствие объектов с другими классификационными признаками, явление AGN наблюдается в областях с повышенной плотностью материи — в группах и скоплениях галактик, так что в данной работе достаточен сам факт наличия радиоисточника в данной области. Стоит отметить, что в каталог отобранных галактик включены также объекты из других списков, в том числе источники с ультракрутыми спектрами ($\alpha < -1.0$). Именно среди таких объектов высок процент далеких радиогалактик [66–71], и с помощью этого критерия были открыты самые далекие, с красным смещением $z = 5.199$ [72] и $z = 4.514$ [73, 74]. Выборку далеких радиогалактик мы разбили на подвыборки, содержащие источники из разных диапазонов красных смещений: $0.3 \le z < 0.7$, $0.7 \le z < 1.0$, $1.0 \le z < 1.5$, $1.5 \le z < 2.0$, $2.0 \le z < 2.5$ и $z \ge 2.5$.

В выборку гигантских эллиптических галактик из 45 скоплений списка [25] мы включили 25 галактик типа gE (и cD), являющихся центральными галактиками скоплений, для которых имеются данные в оптическом и близком инфракрасном диапазонах. Ранее эта выборка уже использовалась при исследовании радиогалактик как дополнительная [75]. Красные смещения скоплений галактик лежат в диапазоне $0.1 < z < 1.3$.

Для сравнительного анализа также были использованы объекты из списков GRB космических обсерваторий BATSE [26] и BeppoSAX [27], отклик CMB и результаты стэкинга для которых исследовались в работах [76, 77]. При изучении среднего сигнала CMB в направлении на GRB было обнаружено, что имеется незначительное различие на уровне $|S/N| > 1.4$, что может случайно выпадать в менее 20% случаев для гауссовых шумов, в распределении среднего сигнала микроволнового фона в направлении на гамма-всплески. При этом короткие ($t < 2$ с) всплески на осредненной площадке попадают в локальный минимум фона, а длинные ($t > 2$ с) — в локальный максимум. Если следовать предположению, что короткие GRB, гипотетически связанные со слиянием нейтронных звезд, возникают в старых эллиптических галактиках, образованных за счет мерджинга менее массивных галактик и расположенных в скоплениях галактик, то локальный минимум может быть обусловлен эффектом Сюняева–Зельдовича [10]. Для длинных всплесков попадание в локальный максимум распределения фона, вероятно, может быть связано с другим эффектом. Если длинные всплески связаны со вспышками сверхновых, т.е. с галактиками со звездообразованием, то, даже несмотря на расположение в скоплении галактик, собственное излучение галактик, содержащих пыль и газ, в микроволновом диапазоне будет преобладать над эффектами окружения и приводить к появлению локального максимума на картах CMB. Следуя примененной ранее методике разделения выборок GRB на короткие и длинные события [76,77], в данной работе мы разделили выборки списков BATSE и BeppoSAX таким же образом.

3. СРЕДНИЙ ПОПУЛЯЦИОННЫЙ МИКРОВОЛНОВОЙ СИГНАЛ

При анализе среднего сигнала популяции объектов каждой из подвыборок использовались многочастотные карты архива космической миссии Planck [1], а также карта CMB SMICA, построенная методом разделения компонент многочастотного сигнала [78]. Из архивных карт Planck с помощью процедуры '`mapcut`' пакета GLESP[3] [79] в окрестности радиоисточников выделялись области размером $1^\circ \times 1^\circ$. Сигнал для дальнейшего анализа в выделенных площадках сохранялся в виде файлов в формате FITS Basic [80]. Осреднение полей проводилось с помощью процедуры '`difmap`' пакета GLESP [79,85,86]. В процедуре стэкинга применялось осреднение выбранных площадок неба одинакового углового размера по пикселам вдоль каждой колонки. Выбранные области анализировались пакетом SExtractor [81], что включало определение интегральной яркости центральных объектов и дисперсии сигнала.

[2] `http://cats.sao.ru`

[3] `http://www.glesp.nbi.dk`

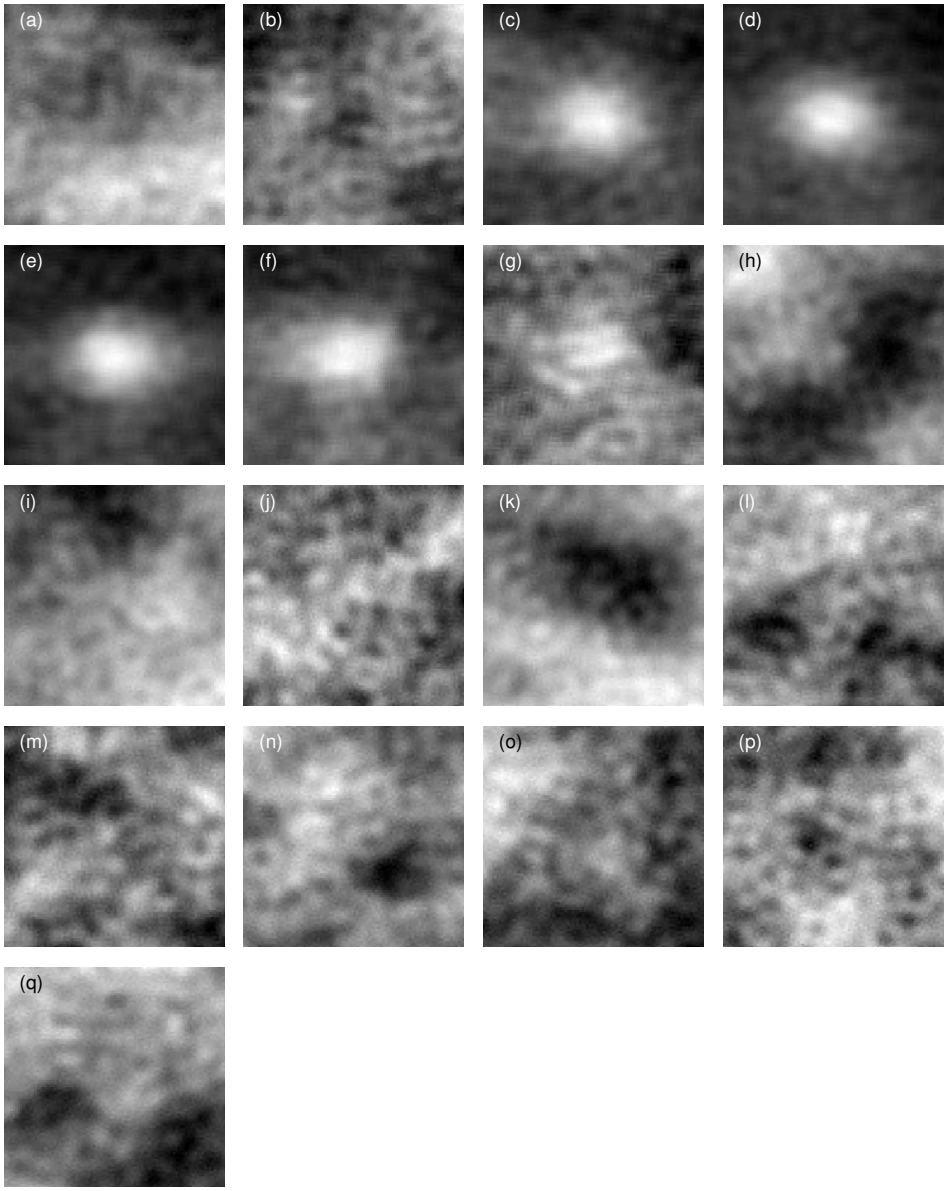


Рис. 1. Зоны стэкинга размером $1^\circ \times 1^\circ$, построенные по данным карты CMB SMICA Planck 2.02. Слева направо сверху вниз изображения средних карт для популяций объектов (в скобках указано число объектов выборки): (a) ГРГ с угловыми размерами $\theta > 4'$ и линейными > 1 Мрс (89), (b) галактики типов gE и CD (25), (c) радиоисточники (RS) обзора WENSS со спектральными индексами $\alpha < -1.1$ (224), (d) WENSS RS с $-1.1 \le \alpha < -0.75$ (661), (e) WENSS RS с $-0.75 \le \alpha < -0.5$ (497), (f) WENSS RS с $-0.5 \le \alpha < 0$ (238), (g) WENSS RS с $\alpha \ge 0$ (19), (h) далекие RG с красными смещениями $0.3 \le z < 0.7$ (1797), (i) HZRG с $0.7 \le z < 1.0$ (205), (j) HZRG с $1.0 \le z < 1.5$ (149), (k) HZRG с $1.5 \le z < 2.0$ (103), (l) HZRG с $2.0 \le z < 2.5$ (77), (m) HZRG с $z \ge 2.5$ (81), (n) события BATSE длительностью $t < 2$ s (495), (o) BATSE, $t > 2$ s (1540), (p) BeppoSAX, $t < 2$ s (87), (q) BeppoSAX, $t > 2$ s (694). Исходные данные CMB приведены в шкале термодинамических температур.

Таблица 2. Параметры выборок, используемых в исследовании.

Каталог	Параметры селекции	Объем выборки	Средний сигнал CMB, K	Разброс, K
GRG mixed	$\theta > 4'$	89	−9.71e−06	6.5e−06
cluster list	gE, cD-RG, $0.1 < z < 1.3$	25	−2.74e−05	8.5e−06
WENSS, RA $< 2^{\rm h}$	$\alpha < -1.1$	224	4.36e−05	5.2e−06
WENSS, RA $< 2^{\rm h}$	$-1.1 \le \alpha < -0.75$	661	3.54e−05	2.7e−06
WENSS, RA $< 2^{\rm h}$	$-0.75 \le \alpha < -0.5$	497	3.85e−05	3.0e−06
WENSS, RA $< 2^{\rm h}$	$-0.5 \le \alpha < 0$	238	3.57e−05	4.0e−06
WENSS, RA $< 2^{\rm h}$	$\alpha \ge 0$	19	5.12e−05	1.3e−05
Distant RG	$0.3 \le z < 0.7$	1797	3.58e−06	2.3e−06
Distant RG	$0.7 \le z < 1.0$	205	5.02e−06	4.0e−06
Distant RG	$1.0 \le z < 1.5$	149	9.34e−06	3.6e−06
Distant RG	$1.5 \le z < 2.0$	103	shifted min	1.2e−05
Distant RG	$2.0 \le z < 2.5$	77	7.22e−06	4.7e−06
Distant RG	$z \ge 2.5$	81	8.98e−06	6.0e−06
BATSE	$t < 2$ s	495	2.60e−06	2.3e−06
BATSE	$t \ge 2$ s	1540	shifted min	1.9e−06
BeppoSAX	$t < 2$ s	87	−1.24e−05	4.9e−06
BeppoSAX	$t \ge 2$ s	694	shifted max	3.4e−06

Изучение и сравнение подвыборок объектов разных популяций проведено по двум направлениям: исследования среднего сигнала по данным карты CMB Planck и среднего спектра по данным измерения термодинамической температуры на различных частотах. Параметры выборок, используемых в исследовании, приведены в таблице 2, где также указан средний уровень детектируемого сигнала в окрестности радиусом $7'$ и его отклонения в области стэкинга. Изображения осредненных областей вокруг объектов разных популяций, рассчитанных по данным карты CMB SMICA, показаны на рис. 1. Средний сигнал CMB в области ГРГ демонстрирует сложную топологию, включающую локальный максимум на уровне шумов в области более глубокого (детектируемого) минимума (таблица 2). Отметим, что шумовой сигнал на изображениях — это средний космологический шум, построенный по данным флуктуаций CMB. На эти флуктуации накладывается дополнительный сигнал вторичной анизотропии, связанный с присутствием радиоисточников разной природы и СЗ-сигнала от скоплений галактик. Если вторичная анизотропия, привносимая поздними источниками ($z < 9$) не случайна, то мы можем использовать форму (топологию) сигнала как характеристику среднего популяционного источника.

На рис. 2, 3, 4 и 5 приведены спектры средних объектов из разных популяций радиоисточников и гигантских эллиптических галактик в микроволновом диапазоне по многочастотным данным Planck. На каждом из рисунков для сравнения приведены распределения энергии для гигантских радиогалактик. Для данных ГРГ на частотах выше 217 ГГц отсутствует значимый для детектирования сигнал в окрестности положения галактики. Сравнение спектров средней популяционной ГРГ с микроволновыми данными для радиоисточников WENSS показывает существенное отличие распределения энергии в спектрах в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах (рис. 2). Спектр средней ГРГ плоский, в то время как у средних источников обзора WENSS он растет с частотой в рассматриваемом диапазоне. Такое поведение популяционных радиоисточников уже было отмечено ранее в работах [7–9] и связывалось с излучением пыли в родительских галактиках. Заметим, что сильный подъем участка спектра на высоких

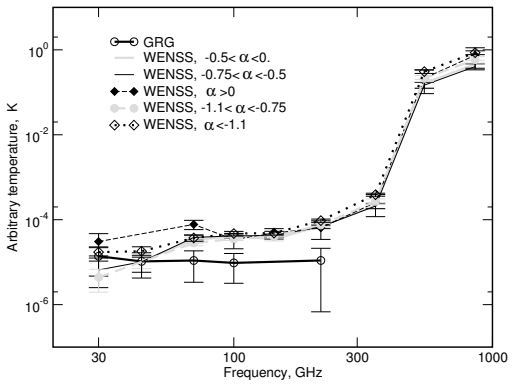


Рис. 2. Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\rm CMB}$, K, для $\nu < 500$ ГГц и Jy sr^{-1} для $\nu > 500$ ГГц, по данным осреднения областей вокруг радиоисточников каталога WENSS из диапазона прямых восхождений $0^{\rm h} \le {\rm RA} < 2^{\rm h}$ на многочастотных картах наблюдений Planck. Здесь и на последующих рисунках шкала по оси абсцисс линейная.

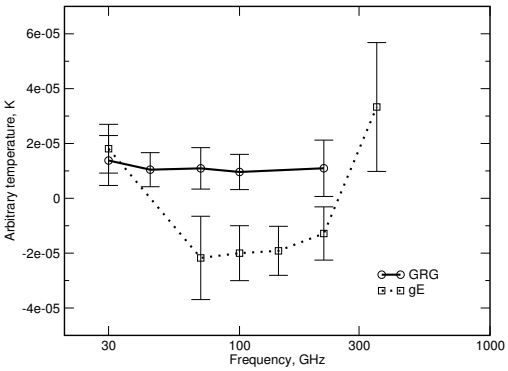


Рис. 3. Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре, по данным осреднения областей вокруг гигантских эллиптических галактик типов gE и cD.

частотах $\nu > 500$ ГГц (рис. 2) не имеет физической природы, а вызван переходом от термодинамической температуры $T_{\rm CMB}$ на более низких частотах в другие единицы (а именно, Ян ср$^{-1}$). В данном случае более важна не условность спектра, а его форма (топология), отражающая реальный рост плотности потока с увеличением частоты, что показано в работах [8, 9]. Отсутствие высокочастотного сигнала для средней ГРГ говорит в пользу меньшей запыленности родительской галактики и о возможной связи размера радиоисточника и плотности пылевой компоненты в области центральной машины. Отметим, что зоны средних объектов выборок из WENSS обращают на себя внимание яркостью источников на средней карте CMB. Этот факт связан с двумя проявившимися эффектами: большим числом осредняемых объектов (и увеличением отношения S/N) и присутствием множества сильных радиоисточников в каждой подвыборке WENSS. Вторым эффектом эти подвыборки отличаются от свойств списков далеких радиогалактики, где сильных радиоисточников мало. Не экранированные масками сильные источники WENSS прошли через процедуру разделения компонент при восстановлении карты CMB, и их остаточное излучение наблюдается на этой карте.

Существенное отличие между популяциями в микроволновом диапазоне наблюдается при сравнении данных для средней ГРГ и среднего отклика от гигантских эллиптических галактик. В последнем случае в спектре доминирует сигнал, обусловленный эффектом Сюняева–Зельдовича [10]. Если в области средней ГРГ присутствует слабый положительный сигнал, то для гигантских эллиптических галактик в миллиметровом диапазоне доминирует отрицательный сигнал, переходящий в положительный на частоте 217 ГГц. Отметим, что СЗ-сигнал от средней ГРГ, предсказываемый в работе [82] в предположении действия обратного комптоновского эффекта при рассеянии CMB на электронах плазмы ГРГ, не наблюдается. Однако в области ГРГ на осредненном снимке CMB имеется зона с понижением яркости со слабым источником в центре (рис. 1а). Это могло бы говорить о том, что СЗ-сигнал подавляется собственным излучением ГРГ, но при этом ожидаемый положительный пик в субмиллиметровом диапазоне все же не виден. Таким образом, вопрос о возможности СЗ-эффекта в ГРГ остается открытым.

Сравнение спектров ГРГ с данными по далеким радиогалактикам (HZRG) показывает, что ГРГ близки к последним по наклону спектра в миллиметровом диапазоне (рис. 4) для положительного отклика и отсутствию роста спектра на субмиллиметровом участке (последнее — для подвыборок с $0.3 \le z < 0.7$ и $2 \le z < 2.5$). Распределение энергии в спектре HZRG до высоких частот с включением отрицательного сигнала, когда в 7-минутной окрестности центра объекта обнаруживаются и минимум, и максимум, позволяет выделить различия в свойствах радиогалактик на различных красных смещениях. Среди особенностей — четкий минимум на частоте 70 ГГц для объектов с красными смещениями из интервала $1.5 \le z < 2$ и отсутствие значимого сигнала на других частотах, а также наличие отрицательного сигнала на 30, 70 и 100 ГГц для галактик из интервала $2 \le z < 2.5$. На средних картах CMB (рис. 1) для первого случая обнаруживается минимум, а во втором случае — слабый локальный максимум на

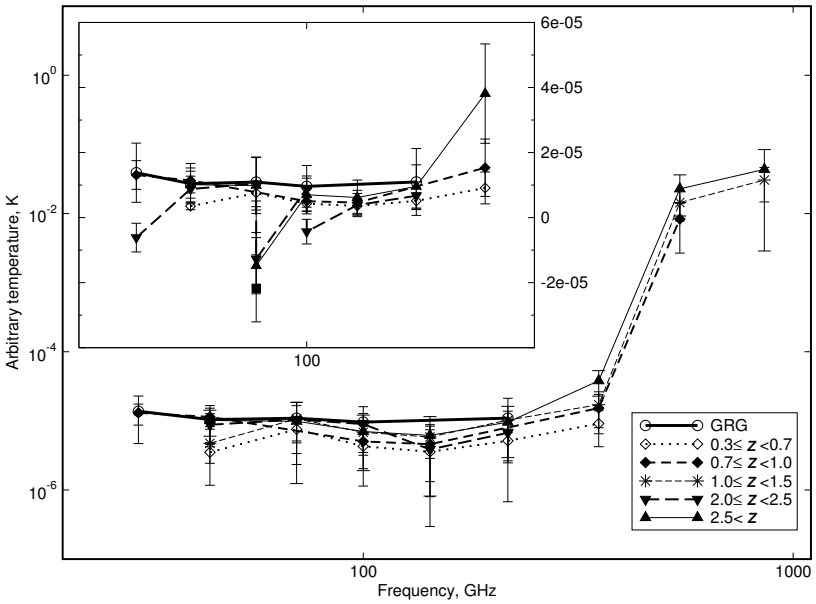


Рис. 4. Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\rm CMB}$, K, для $\nu < 500$ ГГц и $\mathrm{Jy\,sr^{-1}}$ для $\nu > 500$ ГГц, по данным осреднения областей вокруг далеких радиогалактик на многочастотных картах наблюдений Planck с удалением отрицательного среднего сигнала и включением данных по высоким частотам (545 ГГц и 857 ГГц). На врезке представлено это же распределение энергии, но с учетом отрицательного среднего сигнала и исключением высоких частот.

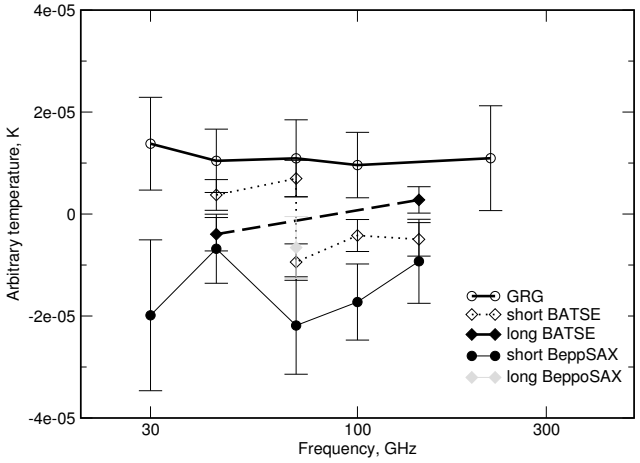


Рис. 5. Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\rm CMB}$, K, по данным осреднения областей вокруг гамма-всплесков каталогов BATSE и BeppoSAX на многочастотных картах наблюдений Planck.

фоне спадающего сигнала CMB. И для той, и для другой популяций HZRG можно говорить о возможном влиянии СЗ-эффекта. Отметим, что в эпохи $1.5 \leq z < 2$ и $2 \leq z < 2.5$ происходит формирование скоплений галактик, включающее активный мерджинг, и нельзя исключить, что здесь может наблюдаться эффект Сакса–Вольфа [83], обусловленный влиянием переменного гравитационного потенциала на частоту фотона CMB, пролетающего через формирующееся скопление.

Сравнение спектра ГРГ с данными по гамма-всплескам говорит о том, что в микроволновом диапазоне эти объекты принадлежат разным популяциям. Причем для коротких GRB наблюдаются свойства, соответствующие СЗ–эффекту: отрицательный сигнал на низких частотах (< 217 ГГц) и его рост на более высоких частотах, что обсуждалось ранее [77].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование отклика среднего объекта, полученного методом стэкинга площадок размером $1^\circ \times 1^\circ$ вокруг источников разных популяций по данным микроволновых карт миссии Planck. Основная исследуемая популяция объектов — 89 гигантских радиогалактик с угловыми размерами больше $4'$, линейные размеры которых (менее 1 Мпк) подтверждены в литературе; они впервые представлены в данной работе единым списком. Для сравнения свойств ГРГ со свойствами других популяций изучались подвыборки объектов разных классов с селекцией по спектральным индексам, красным смещениям, оптической морфологии (галактики типов gE и cD), а также гамма-всплески из каталогов BATSE и BeppoSAX.

Для средней ГРГ в микроволновом диапазоне, область вокруг которой построена методом стэкинга, обнаружено, что

1) есть положительный сигнал в миллиметровом диапазоне, обсуждаемый в [37, 38, 84];
2) спектр в миллиметровом диапазоне — плоский;
3) сигнал в субмиллиметровом диапазоне отсутствует;
4) топологические свойства на средней карте флуктуаций CMB имеют особенности: слабый незначимый максимум ($< 1\sigma$) находится в зоне минимума;
5) значимый СЗ-эффект, связанный с рассеянием фотонов CMB на электронах плазмы джетов ГРГ [82] не наблюдается.

Сравнение с другими популяциями объектов показало, что к наиболее близким к ГРГ по средним микроволновым свойствам можно отнести далекие радиогалактики из диапазонов красных смещений $0.3 \leq z < 0.7$ и $2 \leq z < 2.5$.

Также можно отметить, что, несмотря на схожесть (возможное пересечение) популяций источников, содержащих выборки объектов, объединенных по разным параметрам — радиоисточники WENSS с разными спектральными индексами и далекие радиогалактики, — особенности формы спектров у них различны. Спектр среднего объекта, построенный для популяций источников обзора WENSS, в микроволновом диапазоне растет с ростом частоты (рис. 2), но отличается от обнаруженного ранее поведения термодинамической температуры для RCR-источников [7–9], где на спектре имеется локальный максимум на частоте 70 ГГц, как у подвыборки объектов WENSS с $\alpha > 0$. Однако, если посмотреть на спектры далеких радиогалактик (рис. 2), такой максимум наблюдается практически для всех диапазонов z. Существование локального максимума на 70 ГГц в принципе может быть объяснено сложением излучения, производимого различными механизмами в разных диапазонах частот: плоского синхротронного — в низкочастотной части спектра и пылевой компоненты родительской галактики — в высокочастотной области. Для выяснения причин появления локального максимума требуется дополнительное исследование индивидуальных источников. Можно упомянуть еще один момент, касающийся свойств среднего сигнала CMB в направлении на далекие радиогалактики (рис. 1): для объектов из диапазонов $1.5 \leq z < 2$ и $2.5 \leq z$ обнаруживается минимум, а для $2 \leq z < 2.5$ — слабый локальный максимум на фоне спадающего сигнала CMB. Для этих популяций HZRG можно говорить о возможном влиянии СЗ-эффекта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания при прочтении рукописи. Авторы также выражают свою признательность ESA за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. В работе использован пакет GLESP для анализа протяженного излучения на сфере. Исследования по данной теме поддержаны грантом РФФИ № 13-02-00027.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Adam, et. al. (Planck Collab.), Astron. and Astrophys., 2015 (in press).

2. P. A. R. Ade, et al. (Planck Collab.), Astron. and Astrophys. **571**, A12 (2014).
3. Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, O. V. Verkhodanov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 125 (1996).
4. B. R. Granett, M. C. Neyrinck, and I. Szapudi, Astrophys. J. **683**, L99 (2008).
5. S. Ilić, M. Langer, and M. Douspis, Astron. and Astrophys. **556**, A51 (2013).
6. P. A. R. Ade, et al. (Planck Collab.), Astron. and Astrophys. **571**, A19 (2014).
7. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., Astrophysical Bulletin **70**, 156 (2015).
8. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al. Astron. Lett. **41**, 457 (2015).
9. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al. Astron. Rep. **60**, 2016 (in press).
10. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, Astrophys. Space Sci. **4**, 301 (1969).
11. B. P. Venemans, H. J. A. Röttgering, G. K. Miley, et al., Astron. and Astrophys. **461**, 823 (2007).
12. R. J. McLure, M. J. Kukula, J. S. Dunlop, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **308**, 377 (1999).
13. S. Rawlings and M. J. Jarvis, Mon. Not. R. Astron. Soc. **355**, L9 (2004).
14. C. J. Willot, R. J. McLure, and M. J. Jarvis, Astrophys. J. **587**, L1 (2003).
15. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, Astron. Rep. **55**, 302 (2011).
16. C. Tadhunter, D. Dicken, R. Morganti, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **445**, L51 (2014).
17. P. A. R. Ade, et al. (Planck Collab.), Astron. and Astrophys., 2015 (in press).
18. E. Berger, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **52**, 43 (2014).
19. M. H. P. M. van Putten, G. M. Lee, M. Della Valle, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **444**, L58 (2014).
20. B. V. Komberg, D. I. Nagirner, and I. V. Zhuravleva, Astron. Rep. **52**, 707 (2008).
21. R. B. Rengelink, Y. Tang Y, A. G. de Bruyn, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **124**, 259 (1997).
22. M. L. Khabibullina and O. V.Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 123 (2009).
23. M. L. Khabibullina and O. V.Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 276 (2009).
24. M. L. Khabibullina and O. V.Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 340 (2009).
25. S. A. Stanford, P. R. Eisenhardt, M. Dickinson, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **142**, 153 (2002).
26. W. S. Paciesas, C. A. Meegan, G. N. Pendleton, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **122**, 465 (1999).
27. D. Riccia, F. Fioreb, and P. Giommia, Nucl. Phys. B **69**, 618 (1999).
28. J. Machalski, M. Jamrozy, S. Zola, and D.Koziel, Astron. and Astrophys. **454**, 85 (2006).
29. V. R. Amirkhanyan, V. L. Afanasiev, and A. V. Moiseev, Astrophysical Bulletin **70**, 45 (2015).
30. J. M. Malarecki, L. Staveley-Smith, L. Saripalli, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **432**, 200 (2013).
31. J.M. Malarecki, D.H.Jones, L.Saripalli, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **449**, 955 (2015).
32. L. Saripalli, R. W. Hunstead, R. Subrahmanyan, and E. Boyce, Astron. J. **130**, 896 (2005).
33. D. I. Solovyov and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **66**, 416 (2011).
34. A. P. Shoenmakers, A. G. de Bruyn, H. J. A. Röttgering, and H. van der Laan, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **146**, 293 (2000).
35. A. P. Shoenmakers, K.-H. Mack, A. G. de Bruyn, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **146**, 293 (2000).
36. J. Machalski, K. T. Chyzy, and M. Jamrozy, Acta Astron. **54**, 249 (2004).
37. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh, et al., Astron. Rep. **54**, 571 (2010).
38. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and M. Singh, Astrophysical Bulletin **66**, 171 (2011).
39. R. G. Hine, Mon. Not. R. Astron. Soc. **189**, 527 (1979).
40. I. J. Danziger, W. M. Goss, and R. H. Frater, Mon. Not. R. Astron. Soc. **184**, 341 (1978).
41. A. P. Shoenmakers, K.-H. Mack, L. Lara, et al., Astron. and Astrophys. **336**, 455 (1998).
42. P. A. Jones, Proc. Astron. Soc. Australia **8**, 81 (1989).
43. L. Saripalli, R. Subrahmanyan, and R. W. Hunstead, Mon. Not. R. Astron. Soc. **269**, 37 (1994).
44. L. Saripalli, K.-H. Mack, U. Klein, et al., Astron. and Astrophys. **306**, 708 (1996).
45. L. Saripalli, Gopal-Krishna, W. Reich, and H. Kuhr, Astron. and Astrophys. **170**, 20 (1986).
46. M. Jamrozy, J. Kerp, U. Klein, et al., Baltic Astronomy **14**, 399 (2005).
47. C. Simpson, M. J. Ward, and A. S. Wilson, Astrophys. J. **454**, 683 (1995).
48. K. Chyzy, M. Jamrozy, S. J. Kleinman, et al., Baltic Astronomy **14**, 358 (2005).
49. P. Parma, H. R. de Ruiter, K.-H. Mack, et al., Astron. and Astrophys. **311**, 49 (1996).
50. J. Machalski, D. Koziel-Wierzbowska, M. Jamrozy, and D.J. Saikia, Astrophys. J. **679**, 149 (2008).

51. M. Molina, T. Venturi, A. Malizia, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **451**, 2370 (2015).
52. H. J. A. Röttgering, Y. Tang, M. A. R. Bremer, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **282**, 1033 (1996).
53. M. Molina, L. Bassani, A. Malizia, et al., Astron. and Astrophys. **565**, 2 (2014).
54. L. Lara, I. Marquez, W. D. Cotton, et al., Astron. and Astrophys. **348**, 699 (1999).
55. D. I. Solovyov and O. V. Verkhodanov. Astrophysical Bulletin **69**, 141 (2014).
56. D. I. Solovyov and O. V. Verkhodanov, Astron. Rep. **58**, 506 (2014).
57. O. V. Verkhodanov and O. S. Ulakhovich, in *Program and Abstracts 32 Russian Conf. on Modern Problems of Extragalactic Astronomy, Puschino, 2015* (PRAO, ASC FIAN, Puschino, 2015), p.17.
58. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005).
59. О. В. Верходанов, в *Сб. тр. конф. по проблемам современной радиоастрономии, С.-Петербург, 1997* (ИПА РАН, С.-Петербург, 1997), т.1, с. 322.
60. O. V. Verkhodanov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne, ASP Conf. Ser., **125**, 46 (1997).
61. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
62. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **66**, 183 (2011).
63. F. Tavecchio, L. Maraschi R. M. Sambruna, and C. M. Urry, Astrophys. J. **544**, L23 (2000).
64. C. J. Willott, S. Rawlings, M. J. Jarvis, and K. M. Blundell, Mon. Not. R. Astron. Soc. **339**, 173 (2003).
65. B. Rocca-Volmerange, D. Le Borgne, C. De Breuck, et al., Astron. and Astrophys. **419**, 71 (2004).
66. G. Blumenthal and G. Miley, Astron. and Astrophys. **80**, 13 (1979).
67. R. D. Dagkesamanskii, Nature **226**, 432 (1970).
68. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).
69. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Astron. Astrophys. Trans. **18**, 437 (1999).
70. C. de Breuck, W. van Breugel, H. J. A. Röttgering, and G. Miley, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **143**, 303 (2000).
71. G. Miley and C. De Breuck, Astronomy and Astrophysics Review **15**, 67 (2008).
72. W. van Breugel, C. De Breuck, S. A. Stanford, at al., Astrophys. J. **518**, 61 (1999).
73. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Yu. N. Pariiskii, et al., Astron. Lett. **32**, 433 (2006).
74. Yu. N. Parijskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **439**, 2314 (2014).
75. O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, and A. A. Starobinsky, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 5 (2005).
76. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S. V. Karpov, Astrophysical Bulletin **65**, 238 (2010).
77. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and V. V. Sokolov, Astrophysical Bulletin **69**, 472 (2014).
78. R. Adam, et al., (Planck Collab.), Astron. and Astrophys., 2015 (in press).
79. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
80. R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen, et al., Astron. and Astrophys. **376**, 359 (2001).
81. E. Bertin and S. Arnouts, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **117**, 393 (1996).
82. S. Colafrancesco and P. Marchegiani, Astron. and Astrophys. **535**, A108 (2011).
83. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, Astrophys. J. **147**, 73 (1967).
84. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, M. Singh, et al., in *Proc. Intern. Conf. on Problems of Practical Cosmology, St.-Petersburg, 2008*, Ed. by Yu. V. Baryshev, I. N. Taganov, and P. Teerikorpi (St.-Petersburg, 2008), p.247.
85. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2005).
86. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Int. J. Mod. Phys. D **20**, 1053 (2011).

СРАВНЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАРТ CMB КОСМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ WMAP И PLANCK*

О. В. Верходанов[1], Я. В. Найден[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Сравниваются анизотропные свойства карт космического микроволнового фона (CMB), построенные в результате проведения экспериментов NASA WMAP девятого года наблюдений и ESA Planck (релиз 2015 г). Для анализа применяются два двумерных эстиматора величины разброса значений сигнала на сфере, являющихся алгоритмами картографирования отношения величин разброса на северной и южной полусферах в зависимости от способа разбиения (а именно, поворота и разрезания) неба на полусферы. Разброс вычисляется либо как стандартное отклонение σ, либо как разность максимального и минимального значений на выбранной полусфере. Применение обоих эстиматоров к данным анизотропии CMB, измеренной в двух экспериментах Planck и WMAP, позволило сравнить вариации фона на различных угловых масштабах. Показано, что на картах с разрешением $\ell \leq 100$ разделение на области с разным уровнем статистической анизотропии проходит близко к эклиптической плоскости, а после предварительного удаления гармоник $\ell \leq 20$ из данных CMB начинает доминировать анизотропный сигнал, связанный с Галактикой.

Ключевые слова: реликтовое излучение — методы: анализ данных

1. ВВЕДЕНИЕ

Публикация данных космического эксперимента Planck первого и второго релиза подтвердила существование крупномасштабных (более 10°) аномалий в распределении космического микроволнового фонового излучения (Cosmic Microwave Background — CMB) [1–5]. Асимметрия распределения сигнала между северным и южным галактическими полусферами [6,7], Ось Зла [8,9], Холодное Пятно [10–12], нарушение четности спектра мощности [3,13,14], были обнаружены ранее в наблюдательных данных космической миссии NASA WMAP [15,16]. Проявление крупномасштабных аномалий в распределении сигнала, приводящих к различному распределению флуктуаций CMB в разных направлениях, является признаком статистической анизотропии — особым типом негауссовости микроволнового фона [17]. Исторически проблема статистической анизотропии формулировалась с помощью спектра мощности распределения материи, который описывает такое распределение неоднородностей, когда первичные флуктуации (скалярные возмущения) локально гауссовы, но при этом их статистические гауссовы свойства отличаются по разным направлениям [18]. Сейчас задача исследования статистической анизотропии формулируется в обобщенном виде, где в распределении фонового сигнала подразумевается следующее свойство коррелятора: $\langle a_{\ell m} a_{\ell' m'} \rangle \neq 0$ при $\ell \neq \ell'$ и/или $m \neq m'$ (см., например, [19]). В этом плане мы можем говорить уже не только о спектре мощности, но и использовать для анализа распределение положения пятен, что в частности, применяется в функционалах Минковского. Кроме того, в обобщенном определении статистической анизотропии можно изучать даже отдельные мультиполи, например, квадруполь [20]. И здесь среди простых методов анализа дисперсия или разброс (точнее, отношение соответствующих величин на разных полусферах) являются показательными характеристиками. В стандартной инфляционной космологической модели предполагается, что статистические свойства распределения реликтового излучения одинаковы по разным направлениям на больших (больше 10°) масштабах, т.е. микроволновый фон должен быть одновременно анизотропен (есть минимумы и максимумы на карте) и статистически изотропен. В случае статистической анизотропии, напротив, изучаются обусловленные разными факторами статистические свойства сигнала CMB, различающиеся по разным направлениям на больших масштабах.

*Астрофизический бюллетень. 2016. 71(4). С. 401

В литературе рассматривается несколько причин низкочастотных аномалий распределения сигнала на сфере, связанных с первичными магнитными полями и новой физикой [21–28], с излучением Галактики [29–34], распределением вещества в Солнечной системе [35–41], методами обработки [42–47].

Для проверки гипотез, объясняющих эффекты наблюдаемой статистической анизотропии, проводят сравнение положения холодных и горячих пятен CMB и выделенных направлений на небесной сфере, связанных, например, с ориентацией в галактической, эклиптической или экваториальной системах координат [8, 38], движением Местной группы галактик [3, 8] и крупномасштабным движением вещества [48–51]. Все эти подходы основаны на фундаментальной гипотезе о первичной статистической изотропии CMB и поиске и объяснении нарушения изотропных свойств зарегистрированного излучения реликтового фона с помощью статистических алгоритмов — эстиматоров.

В предыдущих работах [40, 47] мы исследовали карты CMB WMAP7 и Planck 1-го релиза, применив эстиматоры анизотропии, построенные с использованием углового спектра мощности C_ℓ и сравнения сигнала на всевозможных полусферах. Так как спектр мощности является инвариантом относительно вращения при вычислении на полной сфере, мы применили специальное преобразование распределения сигнала, которое зависит от поворота, тем самым меняя форму C_ℓ и позволяя с помощью спектра мощности построить производный эстиматор анизотропии для оценки сигнала в полусферах. В качестве такого преобразования мы использовали отображение сигнала одной полусферы на другую относительно экватора с положительным или отрицательным знаком.

Распределение величины оценки анизотропии, полученное в результате применения эстиматоров, свидетельствует о существовании статистической анизотропии, проявляющейся в низких мультиполях (см. результаты действия Σ_1-эстиматора на рис. 1, воспроизводящем рис. 3 из работы [47]). Причем карта CMB SMICA, восстановленная из многочастотных данных Planck, имеет те же особенности, что и данные микроволнового фона из архива WMAP [40]. В результате применения эстиматоров, построенных на минимизации вариации спектра мощности, обнаруживаются меньшие по относительной амплитуде различия (менее 15%) для данных WMAP девятого года наблюдений и Planck R1.0, чем у эстиматора, построенного на основе параметра четности, дающего относительную разность по минимальному и максимальному значениям порядка 40% для WMAP9 и Planck [47].

Следует отметить, что как октуполь CMB, так и квадруполи и октуполи карт, построенных с помощью эстиматоров, указывают на ортогональное к эклиптике направление в анизотропном сигнале. Оно может быть связано либо с устойчивыми структурами, например, в области облака Оорта, либо с воздействием солнечного ветра или магнитного поля солнечной системы. Проявление экваториальной системы в данных, полученных в точке L2, по-видимому, может указывать на воздействие на микроволновой сигнал излучения, связанного с Землей, через далекие лепестки диаграммы направленности антенны Planck. Кроме того, выводы о локальной природе статистической анизотропии, куда включены и эффекты систематики в наблюдениях и анализе данных, подтверждаются и простым сравнением карт CMB, построенных по данным WMAP и Planck для мультиполей, различие мощности которых в спектре миссий наиболее заметно [52]. Отметим также, что предлагаемые эстиматоры используются скорее для выделения направления при разбиении сигнала на полусферы по его статистическим отличиям, чем для конкретной локализации (определения положения) статистически анизотропной области (отличающейся свойствами от других зон), как это делается, например, вейвлет-анализом [10] или разностью мультиполей [52].

В данной работе мы рассмотрим применение двух простых картографирующих эстиматоров сигнала на сфере, использующих оценки статистического разброса. Даже обычные карты, характеризующие уровень флуктуаций, демонстрируют не только анизотропию сигнала, но и ее неоднородность по направлению — статистическую анизотропию (рис. 2). Направления и области максимальной и минимальной анизотропии можно выделить, применив простейшие статистические методы. Описание предлагаемого нового подхода дано в следующем порядке. В разделе 2 мы излагаем метод построения двух эстиматоров (σ- и T-эстиматоры). В подразделах 2.1 и 2.2 мы приводим результаты их применения к данным космических миссий Planck и WMAP. В разделе 3 приводится обсуждение полученных результатов.

2. ЭСТИМАТОРЫ

Ниже предлагается упрощенный (и более быстрый в вычислениях) подход к исследованию статистической анизотропии в распределении сигнала между полусферами. Мы строим два безразмерных эстиматора, позволяющих делать двумерное преобразование карты неба на основе разброса значений карты. Первый, σ-эстиматор, представляет

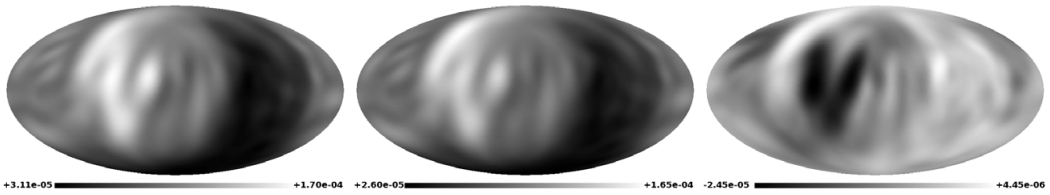


Рис. 1. Результаты построения $\mathbf{\Sigma}_1$-карты для данных WMAP9 (слева), Planck (в центре). Справа показана разность между обеими картами. Эстиматор построен на основе C_ℓ-спектра. Из работы [47].

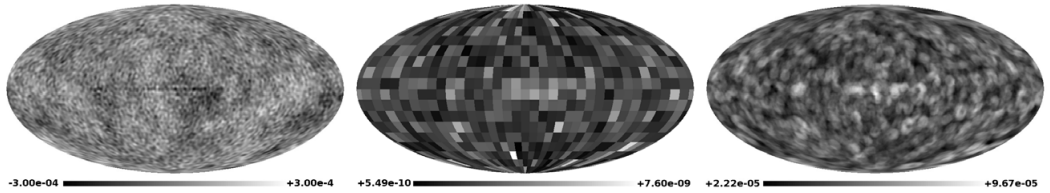


Рис. 2. Слева: карта CMB SMICA [53] космической миссии Planck, сглаженная до углового разрешения 1°. В центре: мозаичная карта дисперсии, рассчитанной с разбиением карты CMB SMICA на пикселы со стороной 10°. Справа: карта дисперсии CMB SMICA, рассчитанной со скользящим окном 10°×10°.

собой картографирующий алгоритм отношения величин разброса (стандартного отклонения) сигнала на северной и южной полусферах:

$$e_\sigma(\theta,\phi) = \frac{\sigma^{\rm North}_{\theta,\phi}}{\sigma^{\rm South}_{\theta,\phi}}\,. \qquad (1)$$

Здесь σ — стандартный разброс флуктуаций температуры CMB. Верхние индексы North и South обозначают полусферы, на которых производится вычисление соответствующих значений σ. Нижние индексы θ и ϕ — полярные координаты, соответсвующие углу поворота сферы и последующего разделения ее на северную и южную полусферы. Таким образом, каждому пикселу новой карты с координатами (θ,ϕ) ставится в соответствие величина отношения стандартного отклонения сигнала на северной и южной полусферах, на которые разделена сфера после поворота на угол, соответствующий координатам пиксела. Карты, построенные с помощью σ-эстиматора, будем называть σ-картами.

Существенным отличием предлагаемого σ-эстиматора от применяемых ранее, основанных на построении углового спектра мощности C_ℓ, является возможность использования данных без отображения одной полусферы на другую, как было ранее. В результате появляется выигрыш по времени (не требуется дополнительное разложение на гармоники при вычислении спектра) и не применяется операция генерации симметричных данных на сфере. Отношение разброса (как и дисперсии) сигнала на полусферах чувствительно и к малым, и к большим угловым масштабам. На рис. 3 и 4 приведены примеры влияния соответственно амплитуд квадруполя и октуполя на результирующую карту, создаваемую σ-эстиматором. При моделировании использовались следующие значения комплексных коэффициентов разложения на сферические гармоники: для квадруполя — $a_{20} = (1.0,0.0)$, $a_{21} = (1.0,1.0)$ и $a_{22} = (0.0,0.0)$, для октуполя — $a_{30} = (1.0,0.0)$, $a_{31} = (1.0,1.0)$ и $a_{32} = a_{33} = (0.0,0.0)$. Обнуление мультиполей $Y_{\ell,m=\ell}$ позволяет минимизировать вклад галактической плоскости в применяемой модели. При генерировании случайной гауссовой карты использовался угловой спектр мощности C_ℓ в космологической модели ΛCDM. Моделирование по спектру мощности проводилось с помощью процедуры '`cl2map`' пакета GLESP[1] [54]. При этом увеличение амплитуды добавляемой гармоники модифицировало тестовую карту, внося в нее дополнительный исскуственный негауссовый сигнал, отклоняющийся от ожидаемого в модели ΛCDM. На рис. 5 показан уровень влияния амплитуды квадруполя и октуполя на дисперсию новой карты, которую строит σ-эстиматор, для разных случайных гауссовых карт. Как видно из рис. 5, в принципе, могут реализовываться разные ситуации с добавлением сигнала к случайной карте: когда дисперсия уменьшается, т.е. наблюдается подавление низкочастотного сигнала (и потом с ростом вклада опять начинается рост дисперсии), и когда амплитуда искажений сразу увеличивается.

Второй эстиматор (T-эстиматор) строится с использованием экстремальных статистик: картографирование оценки разброса проводится с помощью

[1] `http://www.glesp.nbi.dk`

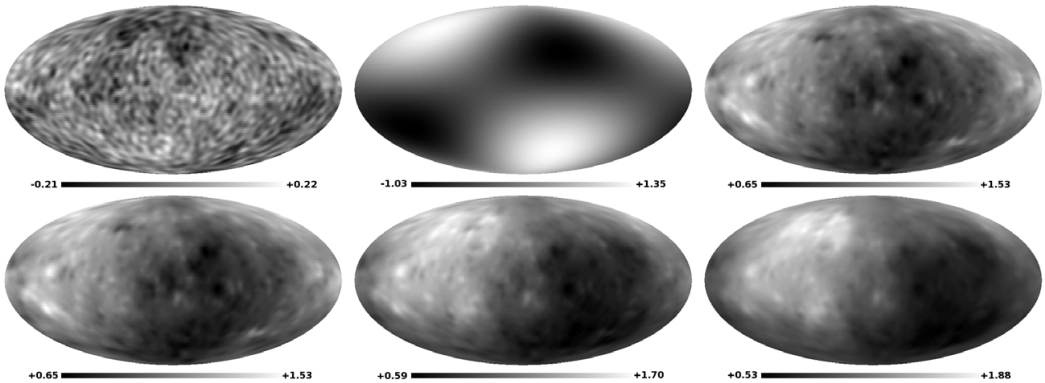


Рис. 3. Слева направо сверху вниз: пример карты случайной реализации $G_{\rm CMB}$ гауссова сигнала CMB в космологии ΛCDM, карта добавляемого квадруполя к случайной реализации CMB, карта σ-эстиматора для случайной гауссовой реализации (вклад квадруполя равен 0), карта σ-эстиматора для $G_{\rm CMB}$ с вкладом квадруполя $k = 0.1$, далее соответственно карты с $k = 1.0$ и 2.0.

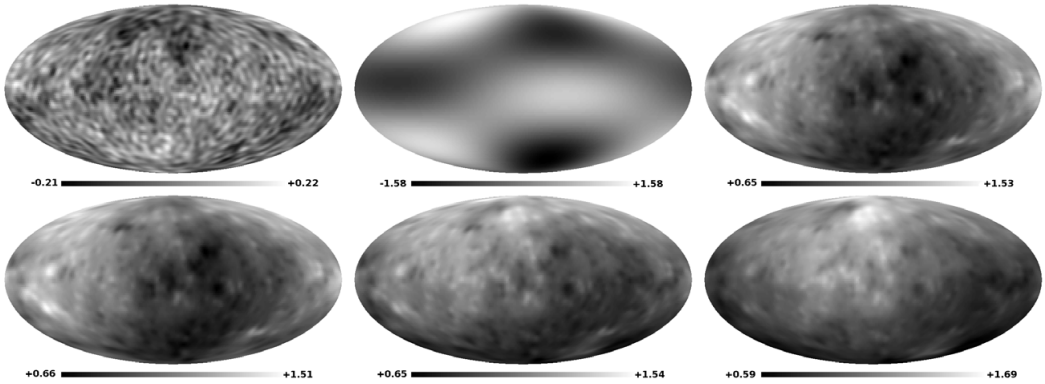


Рис. 4. Слева направо сверху вниз: пример карты случайной реализации $G_{\rm CMB}$ гауссова сигнала CMB в космологии ΛCDM, карта добавляемого к случайной реализации CMB октуполя, карта σ-эстиматора для случайной гауссовой реализации (вклад октуполя равен 0), карта σ-эстиматора для $G_{\rm CMB}$ с вкладом октуполя $k = 0.1$, далее соответственно карты с $k = 1.0$ и 2.0.

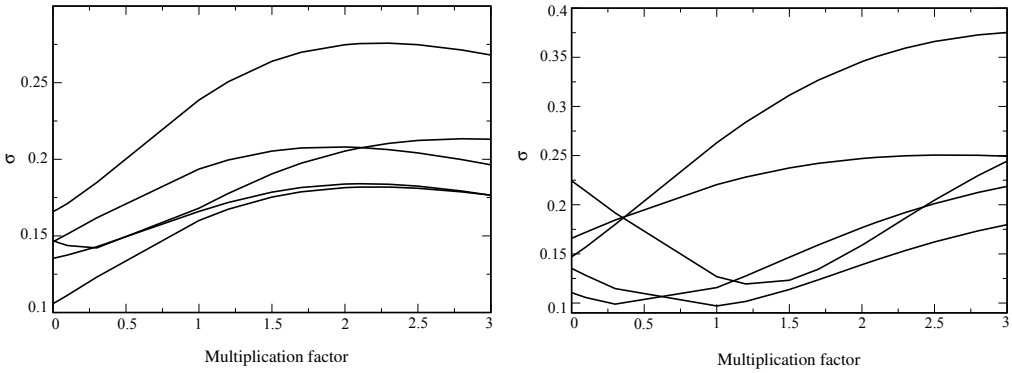


Рис. 5. Зависимость стандартного отклонения карты σ-эстиматора от добавленного негауссова вклада в гауссовый сигнал CMB в космологии ΛCDM. Уровень добавочного сигнала в виде множителя для суммируемой дополнительной карты отражается по оси абсцисс. Слева добавочный сигнал в виде квадруполя, справа — в виде октуполя. Разные треки соответствуют разным гауссовым реализациям сигнала.

вычисления отношения разностей максимума и минимума сигнала на соответствующих полусферах:

$$e_{\mathrm{T}}(\theta,\phi) = \frac{(\max - \min)^{\mathrm{North}}_{\theta,\phi}}{(\max - \min)^{\mathrm{South}}_{\theta,\phi}}\,. \qquad (2)$$

Этот эстиматор аналогичен представленному формулой (1), но вместо дисперсии сигнала в исследуемой области используется его максимальный разброс, описываемый разностью максимального и минимального значения в пикселах. Отметим, что подход построения эстиматора на основе экстремальных статистик ранее уже применялся для обнаружения источников [55,56] и является непараметрическим методом [57]. Карты, построенные с помощью T-эстиматора, будем называть T-картами. Особенность работы T-эстиматора и его отличие от σ-эстиматора заключается в выделении зон максимального разброса (по значению разности $(\max - \min)$ на заданной полусфере). Если при повороте сферы и дальнейшем разбиении ее по экватору на полусферы в областях сохраняются экстремальные значения, то величина экстремального разброса не меняется в отличие от стандарта (статистического разброса) или дисперсии. Применение такого эстиматора позволяет скачкообразно очертить границы чувствительности зон к изменению экстремальных статистических характеристик. На рис. 6, 7 и 8 приведены карты и вариации их чувствительности к негауссову вкладу, аналогичные описанным выше для σ-эстиматора (см. соответственно рис. 3, 4 и 5).

Таким образом, мы связываем разброс, рассчитываемый по предложенной методике, с пикселом карты, соответствующим данному повороту $(\Delta\theta,\Delta\phi)$. И результатом действия эстиматора является новая карта. Одно из важных свойств предложенного картографирующего эстиматора — возможность поиска выделенных направлений в распределении неоднородного сигнала на сфере, которые вычисляются как координаты максимумов и минимумов на картах низких гармоник. Далее мы применяем этот метод к данным CMB экспериментов Planck релиза R2.01 (использовалась карта CMB SMICA) [53] и WMAP 9 [58]. Отметим, что задача, решаемая с помощью обоих эстиматоров, заключается не в определении уровня вариации сигнала и проверке на гауссовы статистические свойства, а в сравнении свойств восстановленных карт CMB, полученных в экспериментах Planck и WMAP. Приведенные модели показали, что эстиматор чувствителен к начальным условиям (когда, например, добавочный негауссовый сигнал из-за случайности своего положения может подавлять сигнал низких мультиполей в комбинации с фоном, но может его и усиливать), а рост искусственного сигнала будет приводить к росту отношения разбросов на разных полусферах. Этого достаточно, чтобы воспользоваться для анализа анизотропии полученными разностями распределения фона на полусферах карт различных экспериментов и выделить особые способы разбиения неба на полусферы с повышенным контрастом.

При анализе карт мы используем стандартное разложение анизотропии сигнала на сфере по сфе-

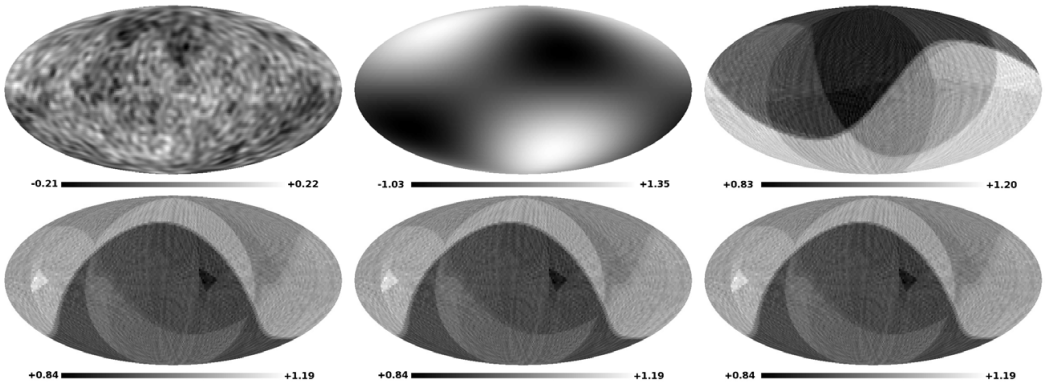


Рис. 6. Слева направо сверху вниз: пример карты случайной реализации $G_{\rm CMB}$ гауссова сигнала CMB в космологии ΛCDM, карта добавляемого к случайной реализации CMB квадруполя, карта T-эстиматора для случайной гауссовой реализации (вклад квадруполя равен 0), карта T-эстиматора для $G_{\rm CMB}$ с вкладом квадруполя $k = 0.1$, далее соответственно карты с $k = 1.0$ и 2.0.

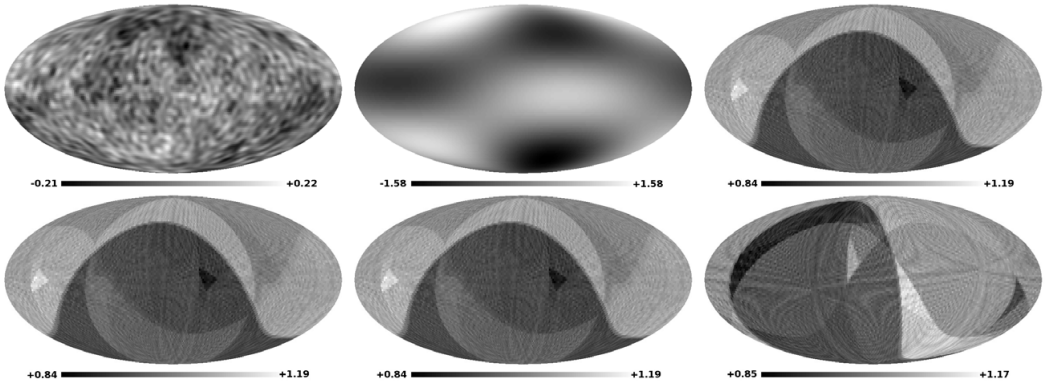


Рис. 7. Слева направо сверху вниз: пример карты случайной реализации $G_{\rm CMB}$ гауссова сигнала CMB в космологии ΛCDM, карта добавляемого к случайной реализации CMB октуполя, карта T-эстиматора для случайной гауссовой реализации (вклад октуполя равен 0), карта T-эстиматора для $G_{\rm CMB}$ с вкладом октуполя $k = 0.1$, далее соответственно карты с $k = 1.0$ и 2.0.

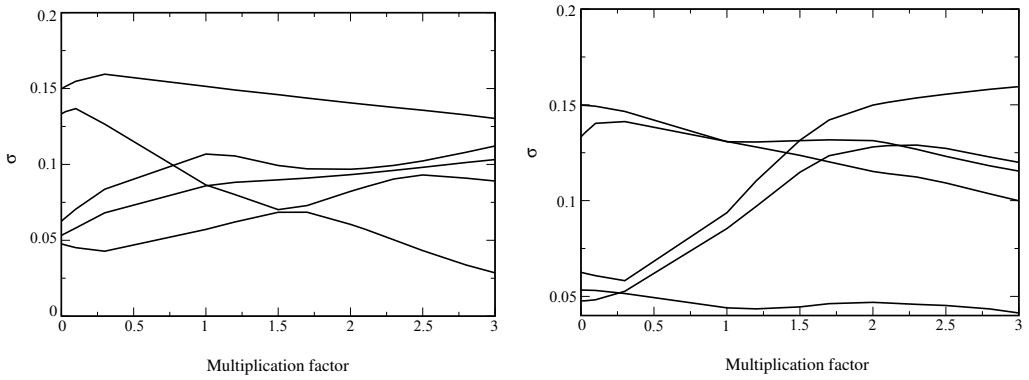


Рис. 8. Зависимость стандартного отклонения карты T-эстиматора от добавленного негауссова вклада в гауссовый сигнал CMB в космологии ΛCDM. Уровень добавочного сигнала в виде множителя для суммируемой дополнительной карты отражается по оси абсцисс. Слева добавочный сигнал в виде квадруполя; справа — в виде октуполя. Разные треки соответствуют разным гауссовым реализациям сигнала.

рическим гармоникам (мультиполям):

$$\Delta T(\theta,\phi) = \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta,\phi)\,, \qquad (3)$$

где ΔT — вариация температуры фона, θ и ϕ — полярные координаты, $Y_{\ell m}(\theta,\phi)$ — сферические функции, ℓ — номер сферической гармоники (мультиполя), m — номер моды мультиполя, $a_{\ell m}$ — комплексные коэффициенты при сферических гармониках[2]. При разложении на гармоники карт, построенных с помощью двумерных эстиматоров, будем использовать для обозначения номера мультиполя символ 'L'.

Угловой спектр мощности в виде D_ℓ или C_ℓ мы вычисляем как $D(\ell) = \ell(\ell+1)C_\ell/2\pi$, где

$$C_\ell = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2\,. \qquad (4)$$

Для построения карт и анализа данных использовался пакет GLESP, в частности, процедуры '`mappat`', '`mapcut`' и '`difmap`' [54]. Были установлены следующие параметры разрешения производных карт эстиматора: число колец $N_x = 101$, число пикселов на экваторе $N_\phi = 202$. Для разбиения неба на всевозможные полусферы в рамках заданной пикселизации мы применили процедуру вращения сферы на углы (взятые с обратным знаком), которым соответствует положение пикселов как старой, так и новой карты. Величина отношения мер разброса на полусферах присваивалась пикселу новой карты, который соответствует углу поворота. Вращение сферы проводилось в гармонической области с применением рекуррентного алгоритма расчета гармоник Рисбо [60], реализованного в процедуре '`difmap`'. Перед использованием эстиматоров исходные карты CMB сглаживались до разрешения $\ell_{\max} = 100$. В работе не применялись маски для экранирования Галактической плоскости.

2.1. Сравнение данных с помощью σ-эстиматора

Карты, построенные с помощью σ-эстиматора (выражение (1)) по данным Planck R2.01 и WMAP9, а также разности этих карт показаны на рис. 9. Разность карт показывает существенные различия (выше 10% в пикселах максимального различия сигналов) на σ-картах в данных WMAP9 и Planck R2.01. Значительная часть сигнала разности заключена в невязках с абсолютными максимумами амлитуд в эклиптическом диполе вблизи полюсов, а также в плоскости Галактики. Максимум отношения дисперсий на северной и южной полусферах ($r \simeq 2.3$ раза) достигается на σ-карте, построенной по данным с $\ell \le 20$. Для карты с $\ell \le 100$ эта величина равна $r = 1.61$, для карт с $\ell \in [21;100]$ — $r = 1.24$. В разложении карты разности σ-анизотропии Planck R2.01 и WMAP9 сильные гармоники отражают (L = 1,2,3,5,7,9) доминирующий сигнал (рис. 10), обусловленный, по-

[2]Коэффициенты разложения по мультиполям микроволновых карт WMAP и Planck доступны на сайте `http://cmb.sao.ru` [59].

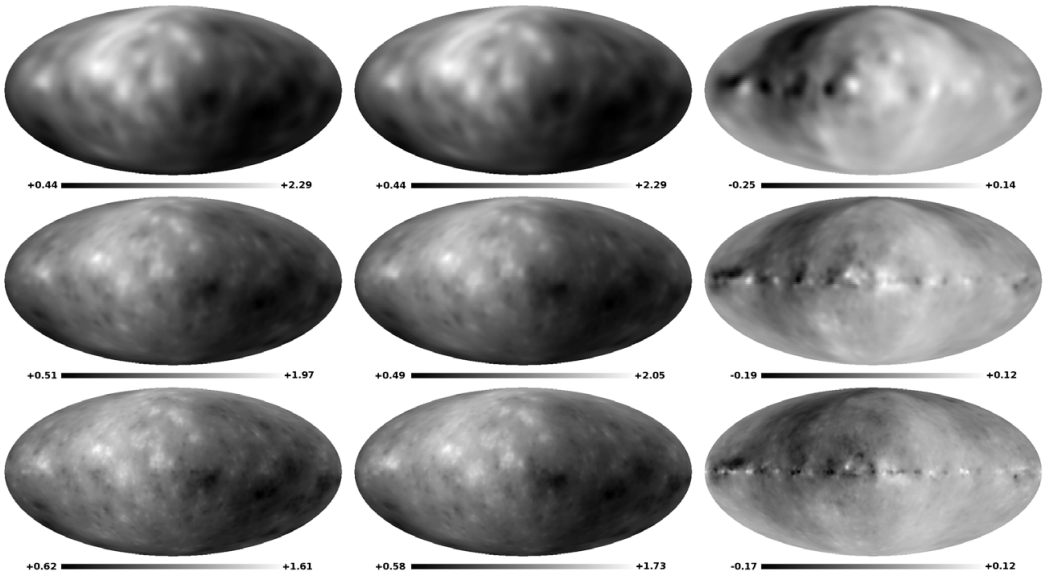


Рис. 9. Карты σ-анизотропии, построенные с помощью σ-эстиматора, для данных SMICA Planck 2.01 (слева) и WMAP9 (в центре), а также разность этих карт (справа). Верхний ряд: исходные карты CMB, содержащие только мультиполи $\ell \leq 20$. Средний ряд: исходные карты CMB с гармониками $\ell \leq 50$. Нижний ряд: $\ell \leq 100$.

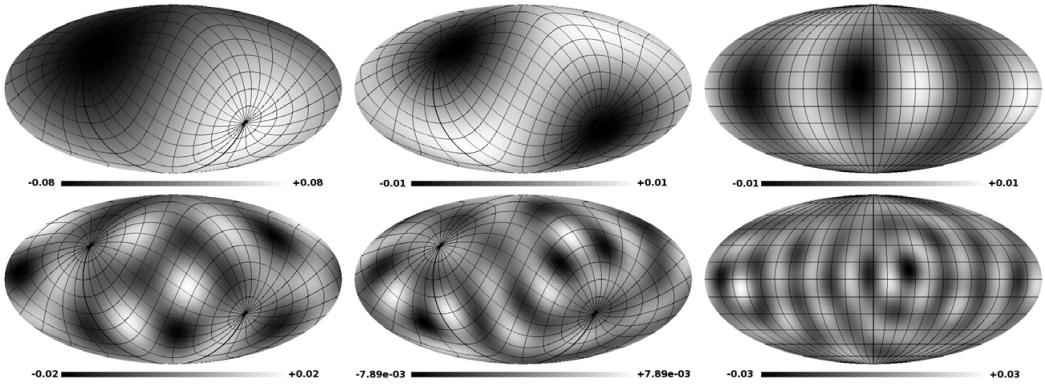


Рис. 10. Сильные гармоники карты разности σ-анизотропии, построенные по данным SMICA Planck R2.01 и WMAP9 для $\ell \leq 100$. Слева направо сверху вниз: гармоники $L = 1,2,3,5,7,9$. На карты мультиполей $L = 1,2,5,7$ наложена экваториальная сетка координат, на карты с $L = 3,9$ — галактическая.

видимому, систематическими эффектами, возникающими при наблюдениях и анализе данных. Отметим, что разность σ-карт Planck и WMAP содержит дипольную и квадрупольную гармоники с экстремумами, расположенными ближе к плоскости эклиптики или эклиптическим полюсам, чем сами данные Planck: например, у σ-карты, построенной по данным Planck, соответственно максимум и минимум диполя имеют эклиптические координаты:
$(\lambda,\beta)_{\rm max,L1} = (242.^\circ868,69.^\circ261)$
$(\lambda,\beta)_{\rm min,L1} = (62.^\circ868,-69.^\circ261)$.
У карты разности:
$(\lambda,\beta)^D_{\rm max,L1} = (45.^\circ391,-81.^\circ667)$
$(\lambda,\beta)^D_{\rm min,L1} = (225.^\circ392,81.^\circ667)$,
что на $12.^\circ3$ ближе к эклиптическим полюсам, чем карта Planck. Похожая ситуация для квадрупольных компонент: для σ-карты Planck имеем
$(\lambda,\beta)_{\rm max1,L2} = (68.^\circ894,-66.^\circ749)$,
$(\lambda,\beta)_{\rm max2,L2} = (248.^\circ894,66.^\circ749)$,
$(\lambda,\beta)_{\rm min1,L2} = (344.^\circ973,2.^\circ125)$ и
$(\lambda,\beta)_{\rm min2,L2} = (62.^\circ868,-2.^\circ125)$.
Для карт разности —
$(\lambda,\beta)^D_{\rm max1,L2} = (347.^\circ275,4.^\circ898)$,
$(\lambda,\beta)^D_{\rm max2,L2} = (167.^\circ275,-4.^\circ898)$,
$(\lambda,\beta)^D_{\rm min1,L2} = (56.^\circ864,-74.^\circ628)$ и
$(\lambda,\beta)^D_{\rm min2,L2} = (236.^\circ864,74.^\circ628)$.
Важно также отметить, что практически в плоскости эклиптики лежат и скопление в Деве (координаты приведены для M 87):
$(\lambda,\beta)_{\rm VirgoA} = (182.^\circ059,14.^\circ417)$,
и диполь CMB (координаты максимума):
$(\lambda,\beta)_{\rm max,L1CMB} = (136.^\circ591,-5.^\circ428)$.

Предварительное удаление аномальных низких гармоник ($\ell \le 20$) до применения σ-эстиматора позволяет избежать влияние сигнала, связанного с эклиптической плоскостью. На рис. 11 показаны карты, построенные с помощью σ-эстиматора (выражение (1)) по данным Planck R2.01 и WMAP9 из диапазонов мультиполей $21 \le \ell \le 50$, $21 \le \ell \le 100$ и $51 \le \ell \le 100$, а также разности карт этих экспериментов. Как видно из рисунков, сигнал с максимальной амплитудой и на σ-картах обоих экспериментов, и на соответствующих картах разности сконцентрирован в плоскости Млечного Пути с выделенным центром Галактики.

2.2. Сравнение данных с помощью T-эстиматора

T-эстиматор (выражение (2)) выделяет области неба с пиковыми значениями температуры, при этом уровни вычисляемого T-сигнала между зонами меняются скачкообразно в отличие от результатов применения описанного выше σ-эстиматора. Для T-карт отношение разброса на северной и южной полусферах ниже, чем у σ-карт: по данным с $\ell \le 20$ — $r = 1.44$, для карты с $\ell \le 100$ эта величина равна $r = 1.19$, а для карт с $\ell \in [21;100]$ — $r = 1.27$.

Отметим, что T-карты, построенные по данным с гармониками $\ell \le 50$, имеют четкую разделительную границу на уровне значения 1, когда максимальные разбросы в южной и северной полусферах равны. Эта граница, с одной стороны, очень близка к плоскости эклиптики (см. рис. 12), хотя и отличается от нее, а с другой стороны, ее отличие таково, что центр местного скопления галактик в Деве, куда движется наша система, лежит в этой плоскости. Можно отметить, что разделение неба на полусферы в подходе с вычислением отношений максимального разброса, вероятно, включает особенности и эклиптической системы координат, и движения нашей системы.

Удаление низких гармоник сохраняет T-анизотропию, связанную с излучением Галактики (см. рис. 13), как это происходило и для σ-карт (рис. 11). На картах с гармониками $\ell > 20$ граница анизотропии проходит в плоскости Галактики. На картах с гармониками $\ell > 50$ выделяется диполь, центрированный на центр Галактики. Эти факты говорят о том, что при удалении аномальных низких гармоник из исходных данных статистическая анизотропия все равно сохраняется, и она связана с распределением протяженного микроволнового сигнала в нашей Галактике, в то время как для низких гармоник ($\ell < 20$) природа статистически анизотропного сигнала другая.

На рис. 14 приведены сравнительный спектры мощности σ- и T-карт, представляющие собой отношений спектров мощности соответствующих карт, построенных по данным Planck R2.01 и WMAP9.

Для примера также приведем фазовые характеристики σ-карт, построенных по данным CMB с $\ell \le 50$. Фаза некоторой гармоники карты $Y_{\ell m}$ описывается параметром $\phi_{\ell m}$ в комплексном представлении коэффициентов разложения $a_{\ell m} = |A_{\ell m}| \exp(i\phi_{\ell m})$. На рис. 15 показано распределение величины синусов фаз гармоник σ-карт по данным Planck и WMAP, а также на модельных картах CMB в ΛCDM-космологии.

Как видно из рис. 15, в распределении синусов фаз имеется локальный максимум в области абсцисс около 0.43 на уровне 3σ. Гармоники, соответствующие этому пику, показаны на рис. 16 и отражают осесимметричный и центрально-симметричный сигнал, содержащийся в σ-карте в силу ее построения.

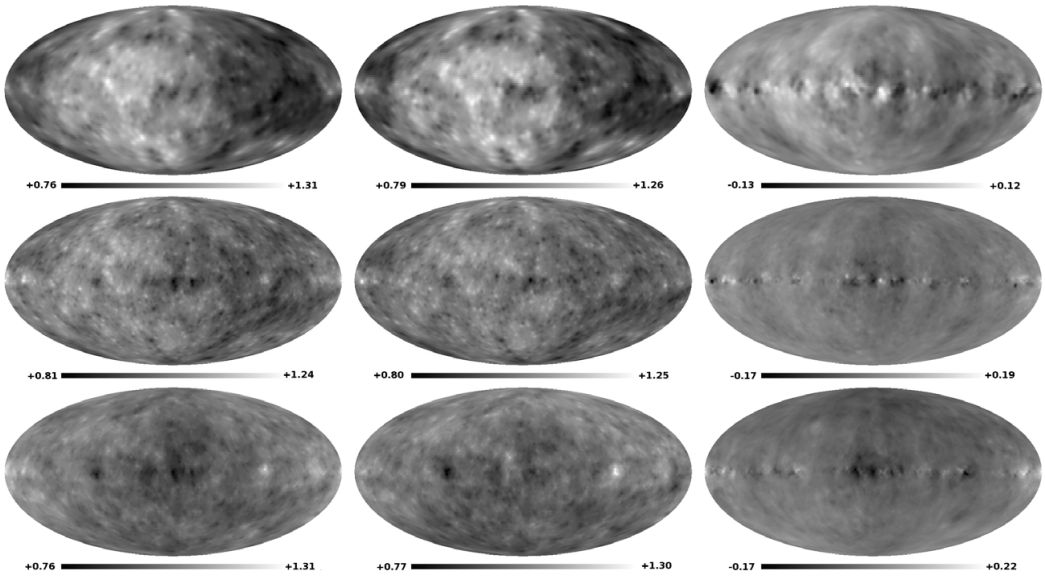


Рис. 11. Карты σ-анизотропии, построенные с помощью σ-эстиматора, для данных SMICA Planck 2.01 (слева) и WMAP9 (в центре), а также разность этих карт (справа). Верхний ряд: исходные карты CMB, содержащие только мультиполи $21 \leq \ell \leq 50$. Средний ряд: исходные карты CMB с гармониками $21 \leq \ell \leq 100$. Нижний ряд: $51 \leq \ell \leq 100$.

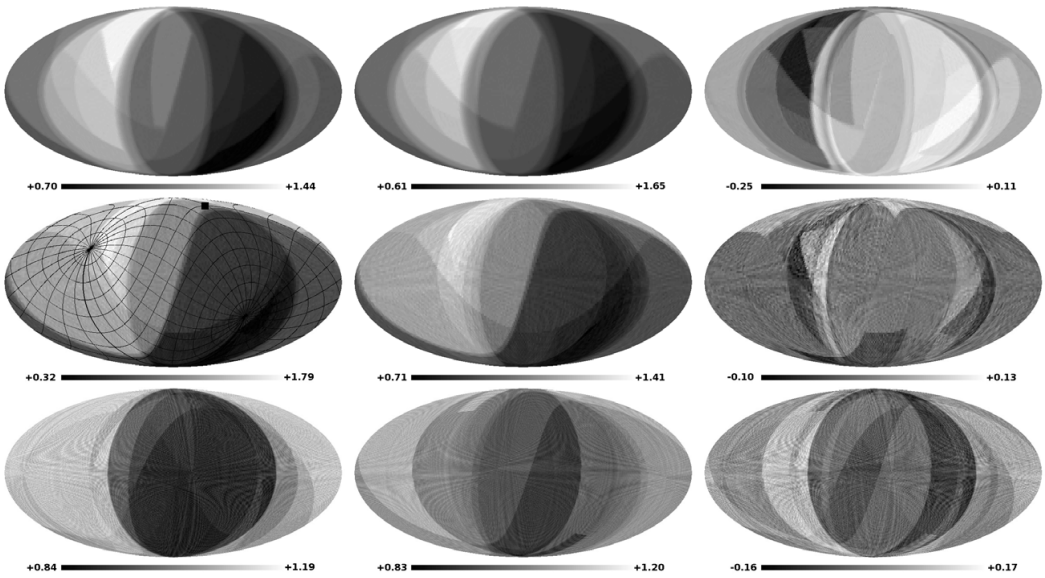


Рис. 12. Карты T-анизотропии, построенные с помощью T-эстиматора, для данных SMICA Planck R2.01 (слева) и WMAP9 (в центре), а также разность этих карт (справа). Верхний ряд: исходные карты CMB, содержащий только мультиполи $\ell \leq 20$. Средний ряд: исходные карты CMB с гармониками $\ell \leq 50$. Нижний ряд: $\ell \leq 100$. На карту Planck с мультиполями $\ell \leq 50$ наложена координатная сетка эклиптической системы (средний ряд, левый рисунок), и черным квадратом отмечено положение центра скопления Дева.

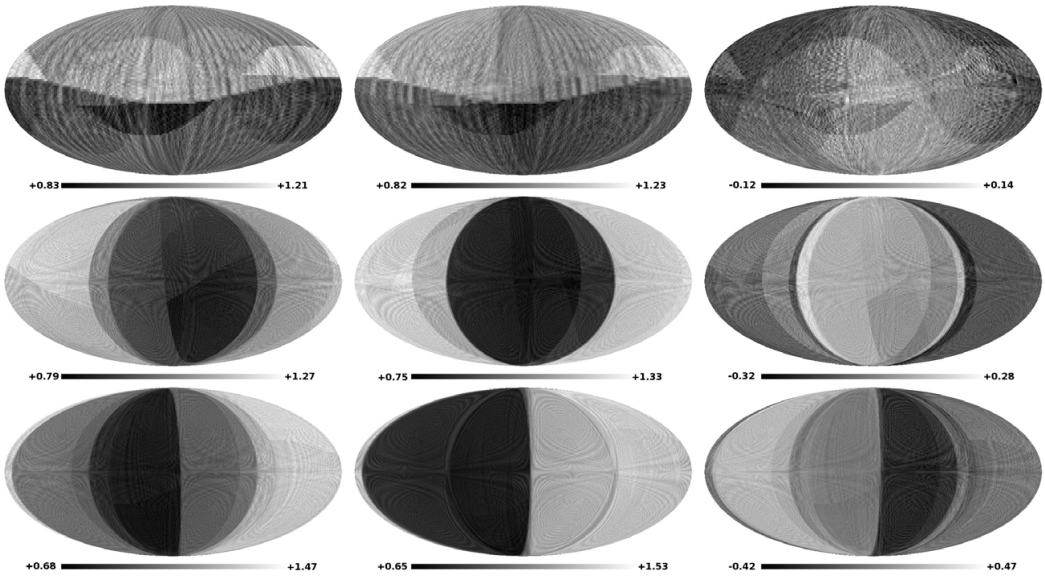


Рис. 13. Карты T-анизотропии, построенные с помощью T-эстиматора, для данных SMICA Planck R2.01 (слева) и WMAP9 (в центре), а также разность этих карт (справа). Верхний ряд: исходные карты CMB, содержащие только мультиполи $21 \leq \ell \leq 50$. Средний ряд: исходные карты CMB с гармониками $21 \leq \ell \leq 100$. Нижний ряд: $51 \leq \ell \leq 100$.

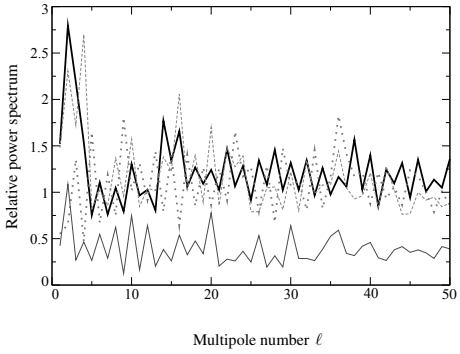


Рис. 14. Угловые спектры мощности карт, построенных после действия σ- и T-эстиматоров над картами SMICA Planck R2.01, содержащих гармоники $20 < \ell \leq 50$ и $20 < \ell \leq 100$, отнесенные к аналогичным спектрам, построенным по данным WMAP9. Толстой черной сплошной линией показано отношение спектров мощности C_L σ-карт Planck и WMAP, построенным по данным CMB из диапазона мультиполей $\ell \in [21–50]$. Толстая пунктирная линия демонстрирует отношение C_L T-карт Planck и WMAP с $\ell \in [21–50]$. Тонкая штриховая соответствует отношению спектров C_L σ-карт Planck и WMAP с $\ell \in [21–100]$, а тонкая сплошная — отношению спектров C_L T-карт Planck и WMAP с $\ell \in [21–100]$.

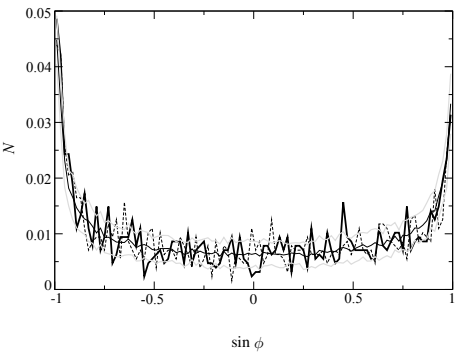


Рис. 15. Распределение величины синусов фаз гармоник σ-карт, построенных по данным CMB с $\ell \leq 50$. Толстой сплошной линией показаны величины для σ-карты Planck, штриховой линией — WMAP, тонкой сплошной линией — средняя оценка величины по 50 моделям гауссова сигнала CMB в ΛCDM-космологии, серыми линиями — 1σ разброс величины по результатам моделирования. В области величины синуса фаз, равного примерно 0.43, имеется локальный максимум для данных Planck на уровне порядка 3σ от ожидаемого среднего значения.

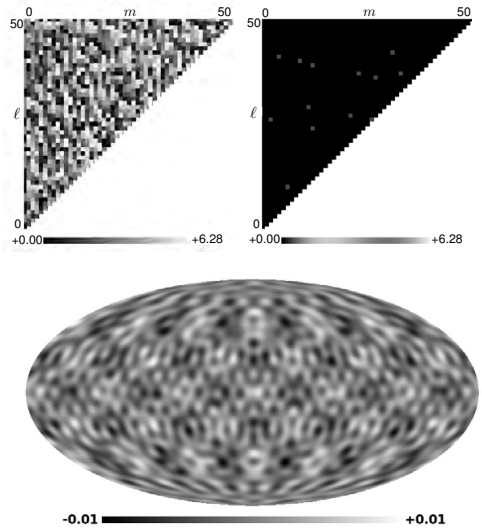


Рис. 16. Картографирование выделенных гармоник. Слева: набор фаз гармоник σ-карты, построенной по данным Planck. В центре — выделенные из фазовой диаграммы фазы гармоник, соответствующих локальному максимуму в распределении на рис. 15 в области около 0.43. Справа: карта выделенных гармоник на сфере.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы предложили два новых двумерных эстиматора разброса для анализа карт CMB. Предложенные эстиматоры представляют собой алгоритм картографирования отношения величин разброса измеренного сигнала CMB на северной и южной полусферах в зависимости от способа разбиения (а именно, поворота и разрезания) неба на полусферы. Разброс в одном случае оценивается как стандартное отклонение σ, в другом случае — как разность максимального и минимального значений на выбранной полусфере. Применение обоих эстиматоров для данных анизотропии CMB, измеренной в двух экспериментах Planck и WMAP, позволяет сравнивать вариации фона на различных угловых масштабах. Было показано, что

- уровень анизотропии микроволнового фона на северной и южной полусферах различен;
- на картах с разрешением $\ell \leq 100$ разделение на области с разным уровнем анизотропии проходит близко к эклиптической плоскости;
- предварительное удаление гармоник $\ell \leq 20$ из данных CMB и дальнейшее применение эстиматоров приводит к выделению анизотропного сигнала, связанного с Галактикой;
- в данных обеих космических обсерваторий присутствует как эклиптический, так и галактический статистически анизотропный сигнал;
- карты разности также содержат оба типа анизотропии.

Обнаруженная ранее статистическая анизотропия, связанная с эклиптической системой координат [35–38, 41, 45, 47, 61, 62], подтверждается в данной работе. Однако, как здесь обсуждалось, наряду с эклиптическим анизотропным сигналом присутствует и более слабый сигнал, имеющий, скорее всего, галактическое происхождение. Пересечение этих полусфер выделяет южный правый квадрант, отмеченный в работе [5]. В этом квадранте находятся Холодное Пятно [10] и пятна квадруполя и октуполя CMB, формирующие Ось Зла.

Если происхождение галактического анизотропного сигнала можно теоретически связать с систематическими эффектами разделения компонент (например, присутствия аномального микроволнового излучения, или неполным учетом сигнала, проникающего через дальние лепестки диаграммы направленности антенны телескопа), то анизотропный сигнал, связанный с эклиптикой, может включать дополнительно и диполь, обусловленный движением нашей Галактики [63]. Отметим также, что сохраняется небольшая вероятность того, что обнаруженная статистическая анизотропия, признаком которой является Ось Зла, чувствительная к эклиптической системе координат, может иметь космологическое происхождение, определяемое, например, топологией [64, 65].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В. Н. Черненкову за ценные замечания и рекомендации, позволившие улучшить текст и представление результатов в данной работе. Авторы также выражают свою благодарность за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных NASA обсерватории WMAP и ESA обсерватории Planck в Planck Legacy Archive. Для анализа протяженного излучения на сфере в работе использован пакет GLESP [54, 66, 67].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. and Astrophys. **571**, A1 (2014).
2. R. Adam et al. (Planck Collab.), arXiv:1502.01582.

3. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. and Astrophys. **571**, A23 (2014).
4. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, Mon. Not. R. Astron. Soc. **449**, 3458 (2015).
5. L. Santos, P. Cabella, T. Villela, et al., Astron. and Astrophys. **569**, A75 (2014).
6. H. K. Eriksen, F. K. Hansen, A. J. Banday, et al., Astrophys. J. **605**, 14 (2004).
7. A. Mariano and L. Perivolaropoulos, Phys. Rev. D **87**, 043511 (2013).
8. M. Tegmark, A. de Oliveira-Costa, and A. Hamilton, Phys. Rev. D **68**, 123523 (2003).
9. K. Land and J. Magueijo, Phys. Rev. Lett. **95**, 071301 (2005).
10. M. Cruz, E. Martínez-González, P. Vielva, and L. Cayón, Mon. Not. R. Astron. Soc. **356**, 29 (2005).
11. M. Cruz, N. Turok, P. Vielva, et al., Science **318**, 1612 (2007).
12. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., Astrophysical Bulletin **65**, 101 (2010).
13. J. Kim and P. Naselsky, Astrophys. J. Lett. **714**, L265 (2010).
14. M. Hansen, A. M. Frejsel, J. Kim, et al., Phys. Rev. D **83**, 103508 (2011).
15. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **192**, 17 (2011).
16. A. Gruppuso and C. Burigana, J. Cosmol. Astropart. Phys. **8**, 004 (2009).
17. O. V. Verkhodanov, Phys.-Usp. **55**, 1098 (2012).
18. D. S. Gorbunov and V. A. Rubakov, *Introduction to the theory of the early universe* (Moscow, Krasand, 2010; Singapore, World Scientific, 2011).
19. M. Libanov, S. Ramazanov, and V. Rubakov, J. Cosmol. Astropart. Phys. **6**, 010 (2011).
20. S. Ramazanov and G. Rubtsov, Phys. Rev. D **89**, 043517 (2014).
21. T. Jaffe, A. J. Banday, H. K. Eriksen, et al., Astrophys. J. Lett. **629**, L1 (2005).
22. M. Demiański and A. G. Doroshkevich, Phys. Rev. D **75**, 123517 (2007).
23. A. Mack, T. Kahniashvili, and A. Kosowsky, Phys. Rev. D **65**, 123004 (2002).
24. P. D. Naselsky, L.-Y. Chiang, P. Olesen, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. **615**, 45 (2004).
25. T. Kahniashvili and B. Ratra, Phys. Rev. D **71**, 103006 (2005).
26. M. Libanov, S. Mironov, and V. Rubakov, Phys. Rev. D **84**, 083502 (2011).
27. S. R. Ramazanov and G. I. Rubtsov, J. Cosmol. Astropart. Phys. **5**, 033 (2012).
28. H. Liu, A. M. Frejsel, and P. Naselsky, J. Cosmol. Astropart. Phys. **7**, 032 (2013).
29. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Astrophys. J. Lett. **599**, L53 (2003).
30. P. D. Naselsky, A. G. Doroshkevich, and O. V. Verkhodanov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **349**, 695 (2004).
31. L. La Porta, C. Burigana, W. Reich, and P. Reich, Astron. and Astrophys. **479**, 641 (2008).
32. O. V. Verkhodanov and Ya. V. Naiden, Astrophysical Bulletin **67**, 1 (2012).
33. O. V. Verkhodanov, T. V. Keshelava, and Ya. V. Naiden, Astrophysical Bulletin **67**, 245 (2012).
34. M. Hansen, W. Zhao, A. M. Frejsel, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **426**, 57 (2012).
35. J. M. Diego, M. Cruz, J. González-Nuevo, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **402**, 1213 (2010).
36. V. Dikarev, O. Preuß, S. Solanki, et al., Astrophys. J. **705**, 670 (2009).
37. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, Astrophysical Bulletin **64**, 263 (2009).
38. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **65**, 390 (2010).
39. V. S. Berkutov, Ya. V. Naiden, and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **65**, 87 (2010).
40. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **66**, 345 (2011).
41. M. Hansen, J. Kim, A. M. Frejsel, et al., J. Cosmol. Astropart. Phys. **10**, 059 (2012).
42. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov and M. T. B. Nielsen, Astrophysical Bulletin **63**, 216 (2008).
43. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Int. J. Mod. Phys. D **17**, 179 (2008).
44. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **62**, 203 (2007).
45. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, Mon. Not. R. Astron. Soc. **418**, 505 (2011).
46. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, Phys. Rev. D **83**, 043002 (2011).
47. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **69**, 408 (2014).
48. A. Kashlinsky, F. Atrio-Barandela, H. Ebeling, et al., Astrophys. J. Lett. **712**, L81 (2010).
49. F. Atrio-Barandela, A. Kashlinsky, H. Ebeling, et al., Astrophys. J. **719**, 77 (2010).
50. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **66**, 183 (2011).
51. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. and Astrophys. **561**, A97 (2014).
52. O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **69**, 350 (2014).

53. R. Adam et al. (Planck Collab.), arXiv:1502.05956 (2015).
54. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
55. O. V. Verkhodanov and V. L. Gorokhov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **39**, 155 (1995).
56. O. V. Verkhodanov and D. A. Pavlov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **49**, 45 (2000).
57. V. S. Shergin, O. V. Verkhodanov, V. N. Chernenkov, et al., ASP Conf. Ser., **125**, 182 (1997).
58. C L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **208**, 20 (2013).
59. O. V. Verkhodanov, Ya. V. Naiden, V. N. Chernenkov, and N. V. Verkhodanova, Astrophysical Bulletin **69**, 113 (2014).
60. T. Risbo, J. Geodesy **70**, 383 (1996).
61. D. J. Schwarz, C. J. Copi, D. Huterer, and G. D. Starkman, arXiv:1510.07929 (2015).
62. O. V. Verkhodanov, Phys.-Usp. **59**, 3 (2016).
63. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), arXiv:1506.07135 (2015).
64. R. Aurich, H. S. Janzer, S. Lustig, and F. Steiner, Classical Quantum Gravity **25**, 125006 (2008).
65. P. Bielewicz and A. Riazuelo, Mon. Not. R. Astron. Soc. **396**, 609 (2009).
66. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2005).
67. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Int. J. Mod. Phys. D **20**, 1053 (2011).

ПОИСК КАНДИДАТОВ В ОБЪЕКТЫ С ЭФФЕКТОМ СЮНЯЕВА–ЗЕЛЬДОВИЧА В ОКРЕСТНОСТИ РАДИОИСТОЧНИКОВ*

О. В. Верходанов[1], Н. В. Верходанова[1], О. С. Улахович[2], Д. И. Соловьев[3], М. Л. Хабибуллина[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Приволжский (Казанский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия
[3]Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

По данным Вестерборкского обзора неба, проведенного на частоте 325 МГц в диапазоне прямых восхождений $0^{\rm h} \leq \alpha < 2^{\rm h}$ и склонений $29^\circ < \delta < 78^\circ$, и с применением многочастотных карт миссии Planck отобраны кандидаты в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича. Список наиболее вероятных кандидатов содержит 381 источник. Показано, что поиск объектов такого типа может быть ускорен при использовании априорной информации об отрицательном уровне флуктуаций на карте CMB с удаленными низкими мультиполями в направлении на радиоисточники.

Ключевые слова: радиоконтинуум: галактики – реликтовое излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

Гигантский объем наблюдательной информации, поступающей с наземных и орбитальных телескопов, позволяет в рамках потоковой обработки данных с применением корреляционного анализа значительно увеличить количество членов малочисленных популяций астрофизических объектов. Одним из космических экспериментов, анализ данных которого продолжается, является миссия Planck Европейского космического агентства (ESA). Общий объем информации, доступной для научного анализа, составляет несколько терабайт и требует наличия автоматизации обработки, поиска и отождествления объектов с заданными характеристиками. При этом часть наблюдаемых на картах неба объектов оказывается пропущенной в публикуемых каталогах. Проблема неполноты каталогов может быть решена при помощи новых алгоритмов и программ, чувствительных к топологическим, статистическим и спектральных характеристикам многочастотных карт космических миссий. Таким образом удастся увеличить число отождествленных объектов в текущих каталогах и проводить космологические исследования, используя всю полноту доступной информации.

В последнее десятилетие в наблюдательной астрофизике были проведены несколько обзоров, которые позволили значительно улучшить точность (лучше 1%) измерения космологических параметров. Среди этих обзоров выделяются эксперименты на космических обсерваториях NASA WMAP [1] и ESA Planck [2] по измерению неоднородностей карты реликтового излучения, а также спектроскопический обзор галактик BOSS (Barion Oscillation Spectroscopic Survey) [3], проводимый в рамках исследования барионных акустических осцилляций как часть Слоановского цифрового обзора неба III (Sloan Digital Sky Survey III) [4]. Анализ данных этих обзоров привел к определению космологических параметров с выдающимся уровнем точности и построению современной эволюционной модели Вселенной от первых долей секунды ее существования до наших дней.

Среди лидирующих направлений в космологических исследованиях остается изучение скоплений галактик в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, наблюдаемых благодаря эффекту Сюняева–Зельдовича [5], а также в рентгеновском диапазоне, в котором наблюдается излучение горячего газа, и просто в видимом свете. Эти исследования позволяют проследить эволюцию масс скоп-

*Астрофизический бюллетень. 2018. 73(1). С. 1

лений и особенности формирования крупномасштабной структуры Вселенной в различные космологические эпохи.

Существенное расширение списка скоплений галактик в миллиметровом диапазоне связано с появлением многочастотных измерений микроволнового излучения, таких как эксперименты Planck [6], SPT [7] и ACT [8]. Первые данные обсерватории Planck показали, что зарегистрированное число скоплений галактик (около 1.6 тыс.), наблюдаемых с помощью СЗ-эффекта, значительно (на 2 порядка) меньше, чем ожидается по данным оптических обзоров и по моделированию. Некоторые селекционные эффекты могут влиять на результаты обнаружения скоплений галактик с СЗ-механизмом. Это и трудноудаляемое фоновое излучение нашей Галактики, и точечные источники излучения, вклад которых в микроволновый фон перекрывает глубину СЗ-эффекта, и зависимость амплитуды излучения, определяемой этим эффектом, от массы скоплений, которая может иметь сравнительно большой разброс.

Также важно отметить, что для исследования далекой Вселенной используются и радиоисточники [9–11]. Благодаря набору их физических свойств, радиоисточники являются мощным средством для тестирования космологических эпох. С ними связаны и поиск самых далеких активных ядер галактик [12, 13], и поиск протоскоплений [14], и оценки скучивания фоновых объектов на разных красных смещениях [14, 15], и исследования гравитационного линзирования. С учетом возможностей миллиметровых и субмиллиметровых обзоров естественным образом возникает и задача поиска скоплений галактик, в которых находятся радиоисточники как на малых, так и на больших красных смещениях, с помощью эффекта Сюняева–Зельдовича. В данной работе мы проверяем возможность обнаружения СЗ-эффекта в окрестностях радиоисточников низкочастотного обзора WENSS [16] с применением многочастотных микроволновых карт космической миссии Planck.

2. ДАННЫЕ PLANCK

Данные Planck, благодаря лучшему, чем у WMAP, угловому разрешению (порядка 5 минут дуги) и чувствительности, позволили проводить исследования как точечных источников разных популяций, так и протяженных, размером от нескольких минут до десятков минут дуги, ассоциированных со скоплениями галактик. В этом плане при изучении скоплений галактик в микроволновом диапазоне космическая обсерватория Planck сыграла наиболее существенную роль, а построенные в результате ее работы карты полного неба на девяти частотах микроволнового диапазона: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 847 ГГц, являются основой для большого числа исследований, проводящихся в научных институтах разных стран. Карты спутника Planck[1] [17] Европейского космического агентства были открыты для научного сообщества в 2013 г. и сразу стали эффективным инструментом в решении многих задач галактической и внегалактической астрономии. Кроме того, были представлены каталоги обнаруженных источников миллиметрового и субмиллиметрового излучения, имеющих галактическое и внегалактическое происхождение. Измерения потоков излучения в миссии были проведены на высокочастотном комплексе (High Frequency Instrument — HFI) с полосами 100 ГГц и на более высоких частотах, а также на низкочастотном (Low Frequency Instrument — LFI) с полосами на частотах ниже 100 ГГц. Угловое разрешение карт на частоте 30 ГГц составило около $32'$, на частотах выше 145 ГГц — порядка $5'$. Точность определения координат источников на различных наблюдательных частотах варьируется от $50''$ до $40''$ [18]. Архив миссии Planck (Planck Legacy Archive — PLA[2]) содержит как карты компонент излучения, так и списки обнаруженных объектов, включая скопления галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича.

Напомним, что различают два вида СЗ-эффекта: тепловой (tSZ), когда фотоны рассеиваются при случайном движении тепловых электронов, и кинематический (kSZ), обусловленный общим объемным движением электронов [19, 20]. В первом случае рассеянные фотоны CMB имеют спектральную зависимость, во втором — при kSZ-эффекте — спектр остается планковским. При действии теплового эффекта Сюняева–Зельдовича на низких наблюдательных частотах Planck в направлении на скопление будет регистрироваться недостаток фотонов из-за увеличения их энергии. Это приведет к появлению в области скопления галактик «ямки» на карте в миллиметровом диапазоне. За счет увеличения числа фотонов с бóльшей энергией в субмиллиметровом диапазоне в направлении на скопление будет наблюдаться локальный пик излучения. Физически СЗ-эффект связан с обратным комптоновским взаимодействием фотонов CMB и свободными электронами горячего газа скоплений галактик. В результате рассеяния эффективный спектр отклоняется от чернотельного. Единственный свободный параметр — параметр комптонизации Y_{SZ}, который описывается просто амплитудой. Микроволновой спектр скопления га-

[1] http://www.rssd.esa.int/Planck/

[2] http://pla.esac.esa.int/

лактик, наблюдаемый в результате СЗ-эффекта, приводит к отрицательному сигналу на частотах 30–143 ГГц и положительному — на частотах свыше 217 ГГц. Эта особенность является уникальным наблюдательным проявлением, позволяющим выделять его среди других вариаций фона. Так как эффект слабый, его удается зарегистрировать только для наиболее ярких скоплений галактик. Для более слабых объектов карта $Y_{\rm SZ}$ становится чувствительной и к параметрам моделирования, и к систематическим ошибкам.

Задача обнаружения и исследования скоплений галактик по эффекту Сюняева–Зельдовича — одна из самых главных среди заявленных в миссии Планк, а также в других современных исследованиях СМВ с хорошим угловым разрешением [21–23]. СЗ-эффект дает ряд преимуществ при изучении скоплений галактик. Параметр комптонизации $Y_{\rm SZ}$, с помощью которого измеряют интегральное давление газа вдоль луча зрения и амплитуду СЗ-сигнала, не испытывает космологического ослабления по поверхностной яркости. Это делает СЗ-эффект мощным методом поиска скоплений галактик на больших красных смещениях. По полному СЗ-сигналу, интегрированному по угловому размеру, напрямую измеряют общую тепловую энергию газа и, следовательно, массу, с которой, как ожидается, коррелирует температура газа.

По результатам 29 месяцев наблюдений миссии Planck был подготовлен каталог, содержащий 1653 скопления галактик и кандидатов в скопления, в которых проявляется СЗ-эффект. Из них 1203 подтверждены оптическими наблюдениями. Представленный каталог охватывает область, занимающую 83.5% неба, и является крупнейшим и наиболее полным, включающим 1094 объекта с известными красными смещениями вплоть до $z \sim 1$. Массы скоплений распределены в довольно широком диапазоне $(0.1\text{–}1.6) \times 10^{15} M_{\odot}$.

3. ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА

3.1. Селекция объектов

В данной работе мы развиваем предложенный ранее [24] метод селекции кандидатов в скопления галактик с помощью каталогов радиоисточников и карт космического микроволнового фонового излучения. Суть метода заключается в использовании космологических свойств формирования мощных внегалактических радиоисточников. Такие объекты принадлежат популяции галактик самой высокой светимости, что позволяет изучать их на больших красных смещениях и тем самым использовать как зонды состояния Вселенной в другие космологические эпохи. Чрезвычайно важным моментом при исследовании этих источников может считаться тот факт, что их родительскими галактиками являются гигантские эллиптические галактики (gE), которые, в принципе, могут использоваться как стандартные линейки и часы [11, 25, 26]. Правда, следует отметить, что самыми мощными радиоисточниками являются галактики в период большого мержинга, в результате которого и формируются gE, а также то, что не все gE-галактики являются родительскими объектами для мощных радиоисточников. Еще один момент, связанный с гигантскими эллиптическими галактиками, состоит в том, что их изучение важно и при прослеживании эволюции звездных систем на больших красных смещениях и при поиске далеких групп галактик или протоскоплений галактик, в центре которых они находятся, и при исследовании процессов слияния и взаимодействия, на которые может указывать проявляющаяся активность их ядер. Эпоха, на время которой приходится пик слияний галактик, продолжается во Вселенной возрастом от 1.5 до 4 млрд лет, что соответствует красным смещениям от 5 до 1.2 в стандартной ΛCDM-космологической модели (модель с доминированием темной энергии и холодной темной материи). Так, в работе [14], посвященной исследованию окружения далеких радиогалактик по наблюдениям Ly-α, измерялось красное смещение, и с использованием данных о плотности объектов делался вывод об их принадлежности к протоскоплению. Было показано, что 75% радиогалактик с $z > 2$ ассоциируются с протоскоплениями. Отсюда авторы получили оценку, что приблизительно 3×10^{-8} формирующихся скоплений попадают в интервал $2 < z < 5.2$ на сопутствующий куб со стороной 1 Мпк с активным радиоисточником. Однако очень вероятно, что в заданном диапазоне красных смещений число протоскоплений галактики может быть больше, т.к. активный радиоисточник может просто не наблюдаться. Таким образом, основываясь лишь на данных радиообзоров: каталогах радиоисточников и картах микроволнового фона, можно отобрать объекты — кандидаты в скопления галактик.

Использование каталога обзора WENSS (The Westerbork Northern Sky Survey), проведенного на северном небе с помощью Вестерборкского радиотелескопа в Нидерландах, неслучайно. Обзор WENSS [16] был выполнен на частоте 325 МГц и характеризуется предельным уровнем плотности потока около 18 мЯн (что соответствует примерно 5σ). Угловое разрешение радиоинтерферометра — $54'' \times 54'' \operatorname{cosec} \delta$, где δ — склонение. Обзор покрывает северную часть неба выше 29° по склонению. Хорошая чувствительность на низкой частоте позволяет отождествлять радиоисточники с

данными обзоров, проведенных на более высоких частотах. Это в свою очередь дает возможность отбирать источники с крутыми радиоспектрами, которые ассоциируются с далекими радиогалактиками [14, 27, 28]. Таким образом, применение низкочастотного каталога радиоисточников при поиске объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича помогает выявить кандидаты в далекие скопления галактик. Первые поиски эффекта с помощью данных WENSS были проведены в работах [29, 30], и здесь мы развиваем предложенный подход. Площадь обзора WENSS составляет порядка 10 000 кв.градусов, а каталог содержит 211 234 радиоисточника. На рис. 1a черным цветом показано заполнение области обзора радиоисточниками при наложении на карту реликтового излучения. Каталог разбит на получасовые записи по прямому восхождению, и для начального анализа мы использовали данные первых двух часов. В исследуемом интервале оказались 16 384 объекта. Анализируемая площадь показана на рис. 1b.

3.2. Алгоритм селекции

Алгоритм отбора кандидатов включает несколько этапов:

- Вырезание зоны в окрестности радиоисточников низкочастотного каталога WENSS [16] со стороной $30'$ на частотных картах 100, 143, 217, 353, 545 ГГц и на карте реликтового излучения, превышающей размер диаграммы направленности на частоте 217 ГГц примерно в шесть раз (и в три раза поисковый размер, используемый при анализе данных в работах Planck [18]).
- Выделение потенциальных СЗ-источников с помощью стандартной программы поиска SExtractor [31] в радиусе 7 минут дуги от центра площадки (при ширине диаграммы направленности радиотелескопа порядка $5'$) на частотах 100 и 143 ГГц — с отрицательной амплитудой, а на 353 и 545 ГГц — с положительной.
- Сравнение амплитуды детектированного источника на частотах 100 и 143 ГГц, $|S_{100}| > |S_{143}|$, и проверка наличия источника с положительной амплитудой на частоте 217 ГГц.
- Контроль отобранных объектов визуальным методом.
- Дополнительный контроль — проверка наличия минимума на карте реликтового излучения с удаленными низкими ($\ell \leq 20$) мультиполями. Удаление низких мультиполей, содержащих статистически анизотропный сигнал [32], уменьшает искажения в площадках (рис. 2), что в свою очередь увеличивает контраст меньших неоднородностей. Минимум на карте CMB наблюдается в направлении скопления галактик с проявлением СЗ-эффекта. Он образуется в результате выполнения процедуры разделения компонент [33].

Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича показана на рис. 3.

Для прохождения этапов селекции были разработаны специализированные командные файлы на языке управления задания Shell в операционной среде ОС Linux Scientific 6.4. Базовые утилиты (команды) работы с изображениями (вырезание из исходных карт `mapcut` и подготовка графического анализа `f2fig`) вызывались из пакета GLESP [34, 35]. Для выделения источников использовалась программа SExtractor [31]. Промежуточные карты готовились и сохранялись в архиве в стандартном астрономическом формате описания изображений FITS [36]. Отформатированные карты всего неба в микроволновом диапазоне в стандарте GLESP, которые использовались для анализа изображений, доступны на сайте CMB[3] [37].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Популяция радиоисточников

Каталог радиоисточников, отобранных по предложенной методике, содержит 381 объект WENSS из диапазона прямых восхождений $0^{\rm h} \leq \alpha < 2^{\rm h}$, отобранный при дополнительном визуальном контроле.

На рис. 4 приведена статистика спектральных индексов на частотах 326 МГц, 1.4 и 4.85 ГГц для популяции отобранных радиоисточников. На рис. 5 показана диаграмма «спектральный индекс γ на частоте 1.4 ГГц — вариация температуры CMB». Распределение уровня флуктуаций на карте CMB SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$ в направлении на радиоисточники продемонстрировано на рис. 6. Штриховыми линиями показаны распределения $\pm1\sigma$- и $\pm3\sigma$-уровней флуктуаций в стандартной ΛCDM-космологической модели по данным 200 реализаций случайной гауссовой карты CMB. Данные нормированы к числу пикселов. Случайные гауссовы реализации неоднородностей CMB моделировались в рамках космологии ΛCDM с помощью специализированной программы `cl2map` пакета GLESP [34].

[3] `http://cmb.sao.ru`

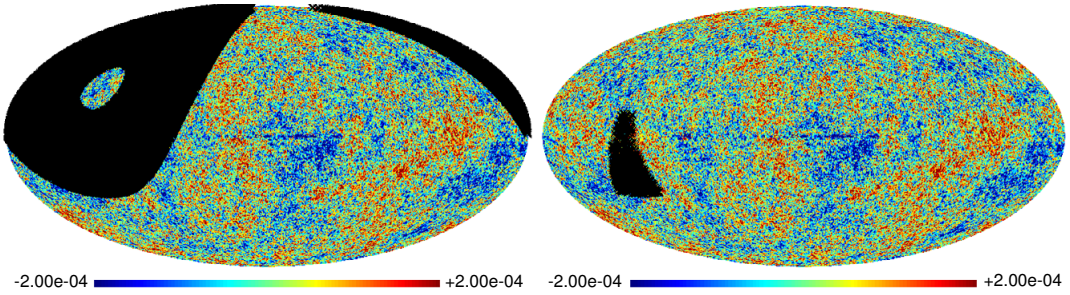


Рис. 1. Карта реликтового излучения SMICA Planck в галактических координатах. Черным цветом показано заполнение радиоисточниками (a) полного обзора WENSS (24 часа по прямому восхождению) радиоисточниками, (b) области обзора WENSS (границы области по прямому восхождению: $0^{\rm h} < \alpha < 2^{\rm h}$).

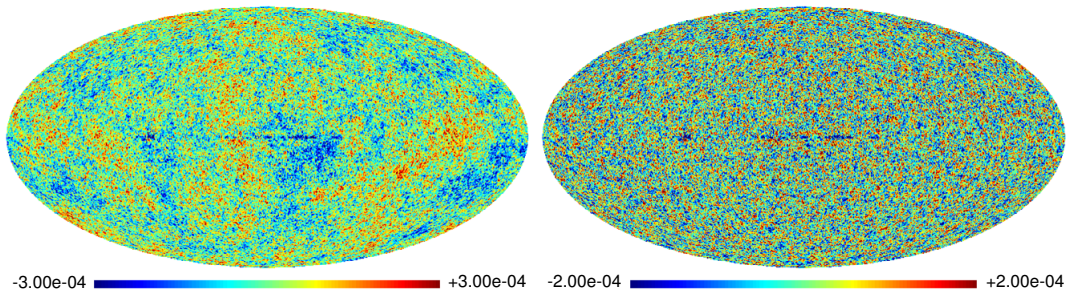


Рис. 2. Карта CMB SMICA Planck [17]: вверху: карта CMB с полным набором сферических гармоник ($2 \leq \ell \leq 2500$); внизу: карта CMB с $20 < \ell \leq 2500$.

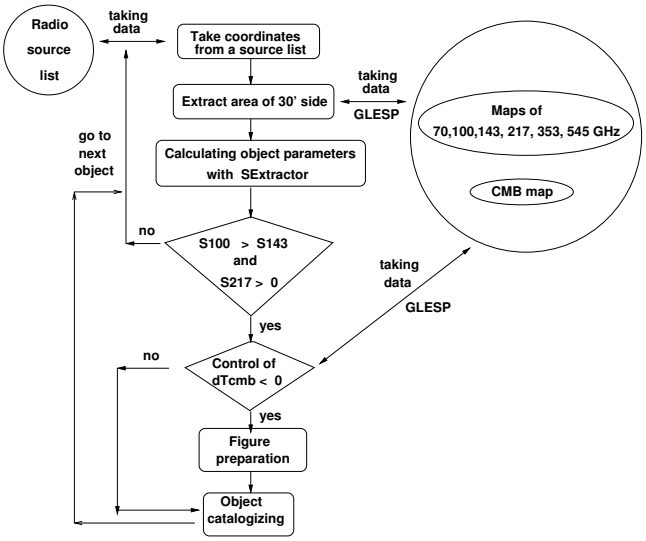


Рис. 3. Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича в окрестности радиоисточников.

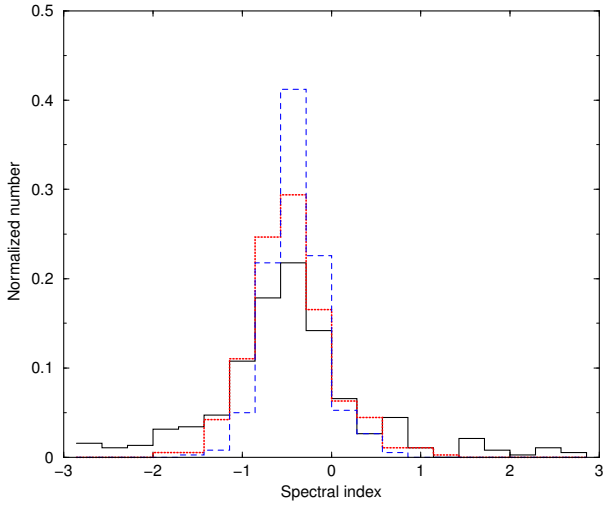


Рис. 4. Нормированное распределение спектральных индексов популяции радиоисточников WENSS с СЗ-эффектом из диапазона R.A. $0^{\rm h} \leq \alpha < 2^{\rm h}$ на частотах 325 МГц (сплошная линия), 1.4 (пунктирная линия) и 4.85 ГГц (штриховая линия).

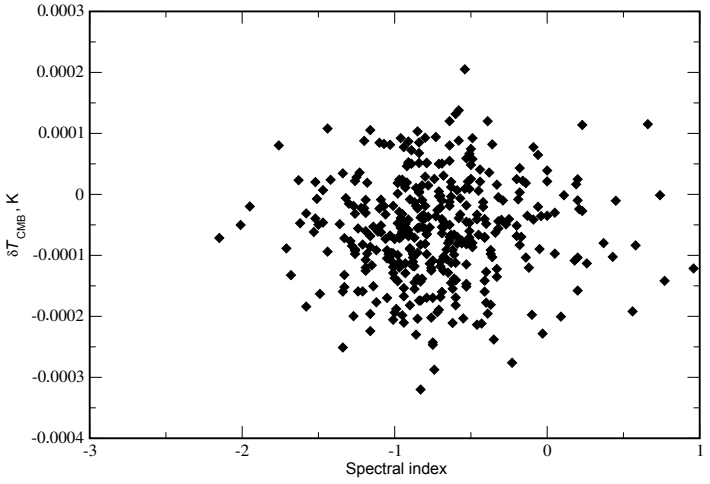


Рис. 5. Диаграмма «спектральный индекс $\gamma_{1.4\ \rm GHz}$ — вариация СМВ $\delta T_{\ell\in[21;2500]}$» для радиоисточников исследуемой подвыборки.

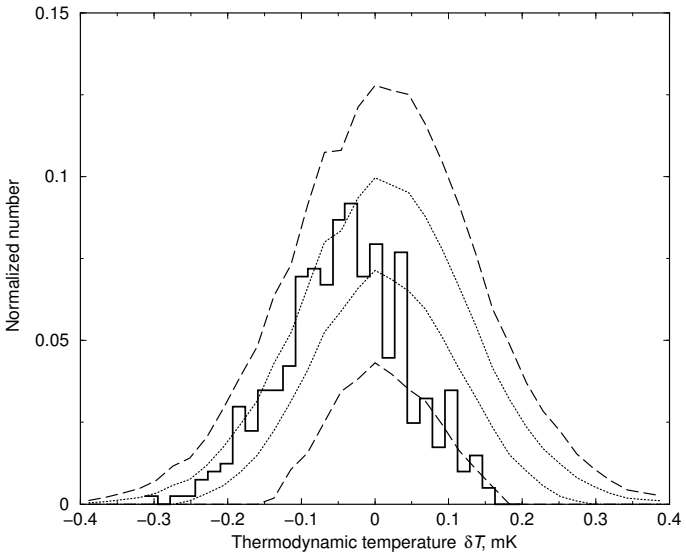


Рис. 6. Распределение уровня флуктуации CMB в направлении на радиоисточники исследуемой подвыборки. Использована карта CMB SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$. Штриховыми линиями показаны распределения $\pm 1\sigma$- и $\pm 3\sigma$-уровней флуктуаций в стандартной ΛCDM-космологической модели по данным 200 реализаций случайной гауссовой карты CMB.

Распределение по спектральным индексам (рис. 4) позволяет выделить популяцию источников с предпочтительным наклоном радиоспектра, который описывает радиоизлучение объекта в скоплении с наблюдаемым эффектом Сюняева–Зельдовича. Медианное значение спектрального индекса выборки на частоте 1.4 ГГц оказалось равным $\gamma_{\rm med} = -0.79$. Дополнительным свойством выборки, характеризующим популяцию, является отрицательное медианное значение сигнала на карте неоднородностей CMB SMICA, построенной в диапазоне мультиполей $\ell \in [21–2500]$, в направлении на радиоисточник (см. рис. 5). Мы сравнили распределение откликов на карте CMB SMICA в направлении на радиоисточники с ожидаемым в ΛCDM-космологической модели по данным 200 случайных гауссовых реализаций CMB (рис. 6). Кроме того, что положение максимума распределения отклика сигнала на карте SMICA смещено в отрицательном направлении за предел 1σ, оно имеет значительные искажения в области положительного сигнала, включая недостаток положительных откликов, превышающий уровень разброса 3σ.

4.2. Статистика отождествлений

Разработанный набор процедур на основе утилит пакета GLESP [35] был применен в процессе обработки карт неба в области исследуемой части обзора. Как уже говорилось ранее, для анализа мы использовали данные по радиоисточникам каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^{\rm h} < \alpha < 2^{\rm h}$ и склонений $20^\circ < \delta < 76^\circ$, содержащих астрометрическую (координаты) и астрофизическую (плотности потока) информацию на частоте 325 МГц, для 16 364 объектов. После автоматической процедуры селекции кандидатов были отобраны 1 778 объектов (10.9% от общего списка), из которых после визуальной инспекции был оставлен 381 источник (2.3% от общего списка) с наиболее типичными контрастными признаками наличия эффекта. Данные работы алгоритма и последующего визуального контроля сведены в таблицу 1.

Отметим, что визуальный контроль позволяет также отделить объекты с нетривиальными особенностями в области положительных пиков на низких частотах ($\nu < 217$ ГГц). Такие топологические эффекты возникают тогда, когда в области центра источника в радиусе размером 1.5 диаграммы направленности антенны радиотелескопа сигнал имеет сложную структуру. Например, имеются два положительных пика. Тогда возникает дополнительный локальный минимум, который алгоритм и детектирует. Так, кроме сигнала, топологически близкого к ожидаемому в случае присутствия эффекта Сюняева–Зельдовича, можно обнаружить по результатам работы алгоритма и ра-

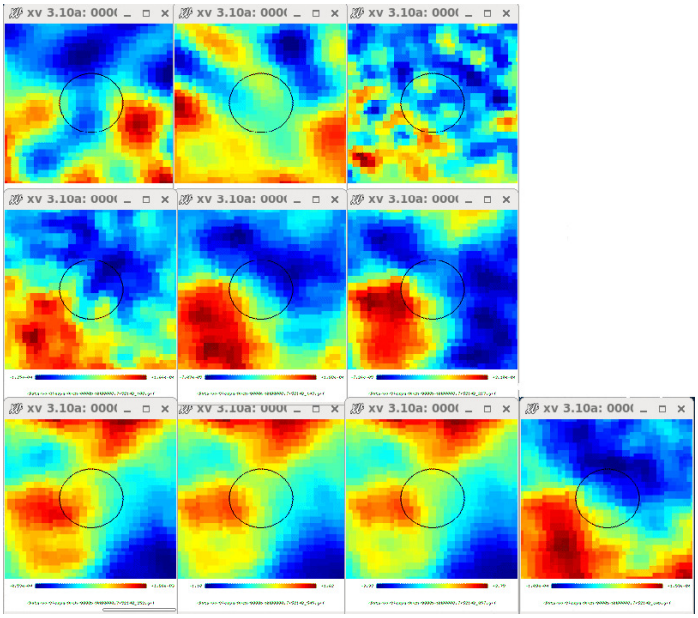


Рис. 7. Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0008.7+5121 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Объект отождествляется со списком скоплений галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича из соответствующего каталога миссии Planck.

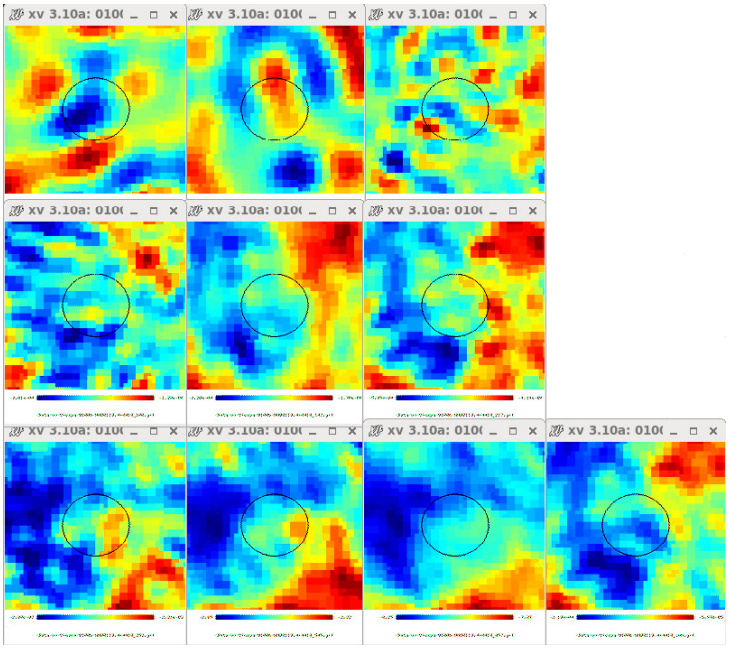


Рис. 8. То же, что на рис. 8, в окрестности радиоисточника WNB 0119.4+4418.

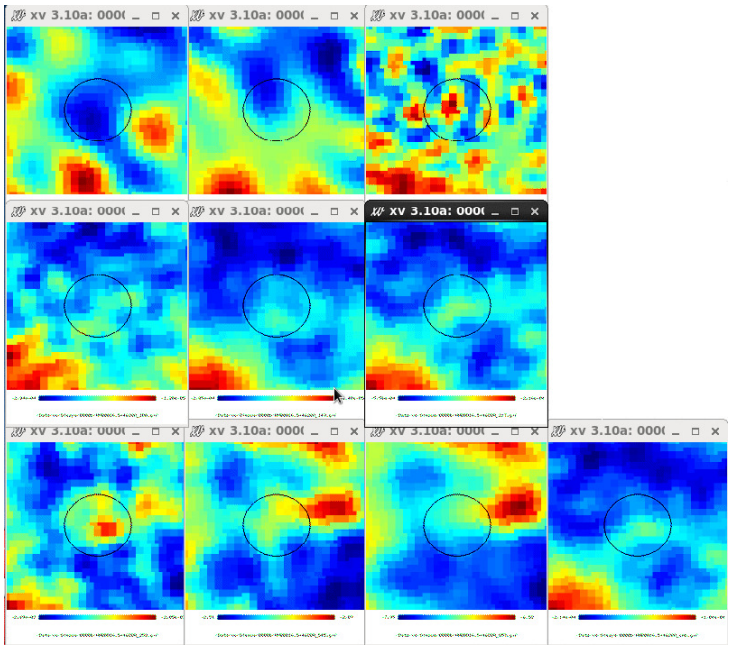


Рис. 9. Изображения области размером $30' \times 30'$ в окрестности радиоисточника WNB 0016.5+4628 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Новый объект — кандидат в скопление с эффектом Сюняева–Зельдовича.

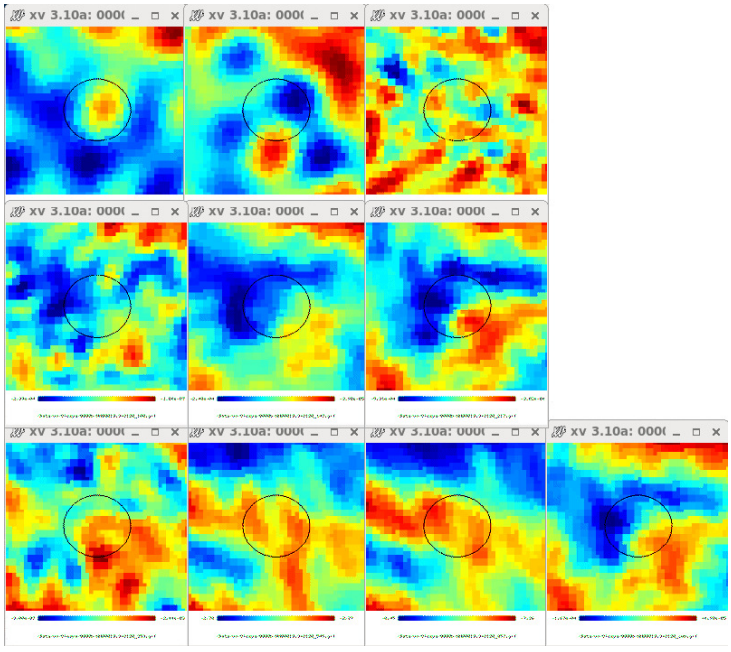


Рис. 10. То же, что на рис. 10, в окрестности радиоисточника WNB 0019.3+3120.

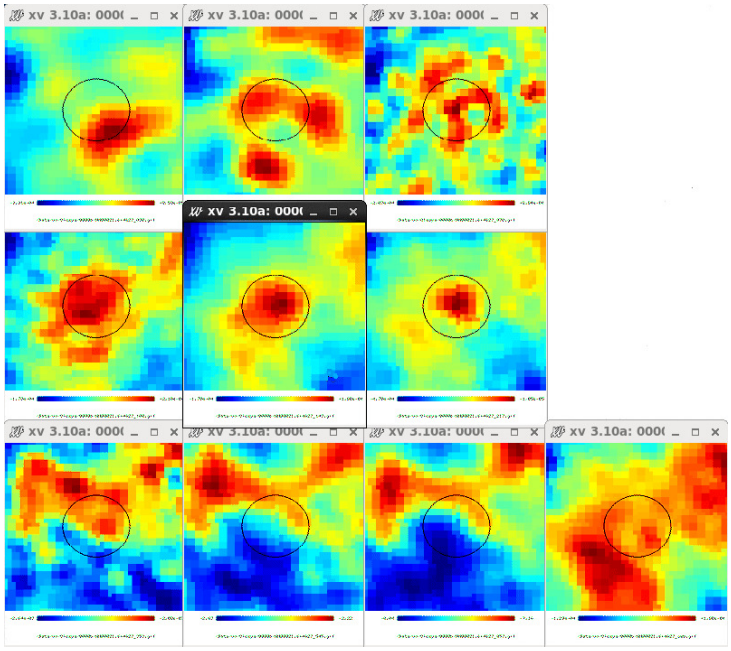


Рис. 11. Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0021.6+5627 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Радиоисточник наблюдается на всех картах.

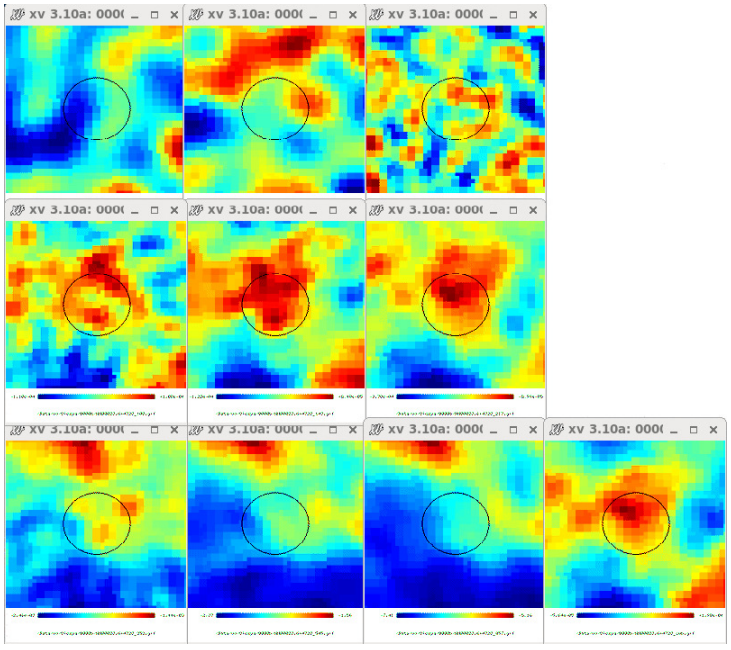


Рис. 12. То же, что на рис. 12, в окрестности радиоисточника WNB 0023.6+4723.

Таблица 1. Распределение объектов по интервалам прямого восхождения (первый столбец). Во втором столбце приведено количество радиоисточников в соответствующем интервале прямых восхождений каталога WENSS. В третьем — число объектов, отобранных по критерию наличия отрицательных пиков на частотах 100 и 143 ГГц и положительного пика на частоте 353 ГГц, в четвертом столбце приведены данные отбора наиболее ярких (контрастных) примеров объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича. В скобках указано процентное содержание от числа объектов в исходном каталоге.

RA, hh mm	$N_{\rm WENSS}$	$N_{100\&143}$	$N_{\rm visual}$
(1)	(2)	(3)	(4)
00 00 $\le \alpha \le$ 00 30	4170	421 (10.1%)	144 (3.4%)
00 30 $\le \alpha \le$ 01 00	4215	481 (11.4%)	104 (2.5%)
01 00 $\le \alpha \le$ 01 30	4021	428 (10.6%)	65 (1.6%)
01 30 $\le \alpha \le$ 02 00	3958	448 (11.3%)	68 (1.7%)

диоисточники, имеющие в исследуемой зоне максимум на низких или на всех частотах, и часто даже на опубликованной карте реликтового излучения. Кроме того, было проведено отождествление найденных объектов с каталогом СЗ-объектов миссии Planck [40] и каталога данных обзора SDSS [41], содержащего близкие скопления галактик с красными смещениями $z < 0.42$. Было обнаружено шесть совпадений с объектами каталога Planck, в котором насчитывается порядка 1.6 тыс. объектов, а также 19 совпадений с данными по скоплениям из обзора SDSS. Любопытным фактом является детектирование 72 радиоисточников не только на картах, построенных для многочастотных данных, но и на карте реликтового излучения. Примеры обнаружения объекта отождествления в результате работы алгоритма показаны на рис. 7–12. На рис. 7 и 8 приведены изображения области вокруг радиоисточников WENSS из нашего списка с искомым сигналом на разных частотах, для которых имеются отождествления с объектами из каталога скоплений Planck. На рис. 9 и 10 показаны многочастотные изображения новых объектов, имеющих топологию сигнала, ожидаемую при наличии СЗ-эффекта. На рис. 11 и 12 даны изображения радиоисточников на разночастотных картах Planck и на карте CMB.

Таким образом, по данным исследования можно сделать несколько важных выводов:

1) Кандидаты в объекты со слабо наблюдаемым эффектом Сюняева–Зельдовича на картах миссии Planck есть. На полном небе их, как минимум, в 10–30 раз больше, чем в опубликованных списках. Этот факт снимает противоречие между ожидаемым количеством скоплений галактик с СЗ-эффектом и их зарегистрированным числом.
2) Эффект “ямки” на карте CMB при отборе радиоисточников — кандидатов в СЗ-объекты имеет место. И это позволяет проводить независимое тестирование на существование скопления галактик в области расположения радиоисточника. Отметим, что такой отрицательный сигнал образуется как остаточный эффект после процедуры разделения компонент излучения без учета априорной информации о наличии массивного скопления галактик (с существующим СЗ-эффектом) в данном направлении на небе.
3) В полях радиоисточников часто наблюдается родительский объект, излучение от которого остается на карте CMB, полученной в результате разделения компонент протяженного фонового сигнала. Несмотря на множественные обнаружения подобных радиоисточников на карте CMB, они не дают существенного вклада в определение космологических параметров, так как привносят искажения лишь в высокочастотную часть углового спектра мощности. Эта область менее значима, чем низкочастотная, при определении космологии.
4) Радиоисточники в скоплениях галактик могут экранировать эффект Сюняева–Зельдовича в миллиметровом диапазоне длин волн. Это уменьшает возможность его обнаружения.

Список радиоисточников каталога WENSS — кандидатов, находящихся в скоплениях галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича, приведен в таблице 2. В колонках указаны имя объекта из каталога WENSS, его координаты, величина анизотропии температуры на карте CMB SMICA ($20 < \ell \le 2500$) и спектральный индекс γ ($S \sim \nu^{\gamma}$) на частоте 1.4 ГГц, рассчитанный как тангенс угла наклона касательной к непрерывному радиоспектру. Радиоспектры строились с использованием плотностей потоков источников, измеренных в разных обзорах, из базы данных CATS (`http://cats.sao.ru`) и процедуры анализа радиоспектров `spg` [38] системы обработки континуальных данных на РАТАН-600 [39].

Таблица 2. Список отобранных источников с наличием эффекта Сюняева–Зельдовича из каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^{\rm h} \le \alpha < 2^{\rm h}$ на эпоху каталога (1950.0). В столбцах таблицы приведены имя радиоисточника по каталогу (индекс s указывает на наличие отождествления в [41], индекс p — в [40]), экваториальные координаты на эпоху 2000.0, величина анизотропии температуры на карте CMB SMICA ($20 < \ell \le 2500$) и значение спектрального индекса на частоте 1.4 ГГц.

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT, 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0000.0 + 3207	00 02 36 + 32 24 29	−2467	−0.75
0000.1 + 4016	00 02 44 + 40 32 53	867	−0.91
0000.3 + 3537^s	00 02 53 + 35 54 10	−866	−0.49
0000.5 + 3038^s	00 03 04 + 30 54 57	−624	−0.95
0001.0 + 3849	00 03 37 + 39 06 22	−1742	−0.84
0001.1 + 3439	00 03 45 + 34 56 18	−98	0.20
0001.1 + 4651	00 03 42 + 47 08 34	213	−0.00
0001.2 + 3358	00 03 48 + 34 15 32	−611	−1.11
0001.2 + 3416C^s	00 03 53 + 34 34 44	−660	−0.90
0001.2 + 3755	00 03 51 + 38 12 04	92	−0.54
0001.2 + 3803B	00 03 52 + 38 20 53	−473	−1.62
0001.6 + 3455	00 04 14 + 35 12 40	−381	−0.83
0001.8 + 3002	00 04 25 + 30 18 52	194	−0.92
0001.8 + 4134	00 04 25 + 41 51 35	−565	−0.80
0001.8 + 5244	00 04 25 + 53 00 54	−1406	−0.60
0001.9 + 5247	00 04 32 + 53 04 27	−1468	−0.53
0002.0 + 2905	00 04 35 + 29 22 28	851	−0.84
0002.0 + 2943	00 04 35 + 30 00 30	928	−0.80
0002.2 + 3145	00 04 48 + 32 01 52	−705	−0.96
0002.2 + 3425	00 04 52 + 34 42 40	−359	−0.73
0002.3 + 3617	00 04 53 + 36 34 31	191	−1.18
0002.5 + 4804	00 05 08 + 48 21 39	253	−0.74
0002.7 + 3407	00 05 22 + 34 24 08	−488	−1.36
0002.8 + 4935	00 05 24 + 49 51 48	−1249	−0.76
0002.8 + 4958	00 05 27 + 50 15 16	−1289	−1.01
0002.9 + 2934	00 05 30 + 29 50 52	677	−0.84
0003.0 + 3447	00 05 37 + 35 04 37	253	−0.50
0003.0 + 4709	00 05 39 + 47 26 41	105	−0.86
0003.2 + 4243	00 05 52 + 43 00 13	−351	−0.13
0003.3 + 3322	00 05 57 + 33 39 16	518	−0.79
0003.4 + 4244	00 06 03 + 43 01 27	−351	0.00
0003.4 + 4614	00 06 02 + 46 31 36	69	−1.47
0003.5 + 3413	00 06 10 + 34 29 48	−502	−2.01
0003.6 + 3326	00 06 16 + 33 43 28	1054	−1.16
0003.7 + 5324	00 06 21 + 53 41 32	−1932	−0.72
0004.5 + 4416	00 07 10 + 44 33 16	147	−0.82
0004.8 + 3510	00 07 26 + 35 27 03	290	−0.80
0005.2 + 5955	00 07 50 + 60 12 26	−1879	−0.99
0005.4 + 4057	00 08 01 + 41 14 02	358	−1.23
0005.4 + 4608	00 08 05 + 46 24 54	502	−0.89
0005.8 + 3815	00 08 25 + 38 32 25	−911	−0.62
0005.9 + 4104	00 08 33 + 41 20 48	−47	−0.32
0006.4 + 2941	00 09 01 + 29 58 06	505	−0.69
0006.4 + 4754	00 09 00 + 48 11 18	−305	−1.19
0006.8 + 3729	00 09 25 + 37 45 55	−2109	−0.62
0006.8 + 4744	00 09 27 + 48 01 29	282	−1.25
0007.3 + 3015^s	00 09 53 + 30 32 03	−1271	−0.40
0007.5 + 3124^s	00 10 06 + 31 40 43	−926	−1.26

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT, 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0007.6 + 4629	00 10 15 + 46 46 21	2051	−0.54
0007.8 + 3126	00 10 25 + 31 42 55	−698	−0.41
0008.6 + 3159B	00 11 20 + 32 15 22	−638	−0.69
0009.0 + 3203$^{s,\,p}$	00 11 41 + 32 20 15	−756	−0.56
0009.0 + 3601	00 11 39 + 36 17 43	−417	−0.30
0009.1 + 3209	00 11 45 + 32 25 42	−469	−0.93
0010.2 + 4016	00 12 53 + 40 32 47	−1376	−0.85
0010.2 + 4347	00 12 55 + 44 04 06	−1321	−1.33
0010.2 + 4529	00 12 51 + 45 46 16	−715	−2.15
0010.2 + 4611	00 12 53 + 46 28 26	515	−0.84
0010.3 + 5237	00 12 59 + 52 54 27	−639	−0.94
0010.4 + 3013	00 13 03 + 30 30 21	−1769	−1.12
0010.6 + 4750	00 13 16 + 48 07 35	−1061	−0.66
0011.7 + 3055	00 14 22 + 31 11 42	−989	−0.61
0012.1 + 4809A	00 14 40 + 48 25 16	−981	−1.04
0012.1 + 4809B	00 14 47 + 48 26 18	−981	−1.02
0012.4 + 4531	00 15 04 + 45 48 04	−1200	−0.97
0012.6 + 2957	00 15 16 + 30 14 18	−536	−0.69
0012.7 + 4929	00 15 23 + 49 45 60	802	−0.64
0013.1 + 3225	00 15 43 + 32 42 14	591	−0.53
0013.2 + 3358	00 15 49 + 34 15 22	−329	−1.06
0013.2 + 5024	00 15 55 + 50 41 25	877	−1.20
0013.2 + 5424	00 15 55 + 54 41 27	−317	−1.26
0013.3 + 3348	00 15 60 + 34 05 21	−231	−0.85
0013.3 + 5021	00 15 58 + 50 38 29	922	−0.96
0013.4 + 3227	00 16 04 + 32 44 32	483	−0.50
0013.7 + 5140	00 16 24 + 51 57 31	775	−0.94
0013.9 + 3845	00 16 36 + 39 01 54	−409	−0.46
0014.0 + 3506	00 16 40 + 35 22 53	250	−0.20
0014.1 + 3920	00 16 49 + 39 37 20	−487	−0.93
0014.1 + 7449	00 16 57 + 75 05 41	1151	0.66
0014.2 + 3931	00 16 54 + 39 48 12	−468	−0.94
0014.2 + 5719	00 16 56 + 57 35 51	391	0.00
0014.9 + 4509	00 17 37 + 45 26 23	−980	−0.79
0014.9 + 7523	00 17 52 + 75 40 38	−217	−0.70
0015.6 + 3132^{s}	00 18 16 + 31 49 15	−1552	−0.87
0016.0 + 3023	00 18 40 + 30 40 25	−1452	−0.63
0016.2 + 3540	00 18 51 + 35 57 17	−1105	−0.88
0016.4 + 3830	00 19 04 + 38 46 55	−534	−0.82
0016.5 + 3256C	00 19 21 + 33 13 19	−14	0.11
0017.4 + 4313	00 20 07 + 43 30 09	−1372	−1.00
0017.8 + 3050	00 20 25 + 31 06 54	−2104	−0.94
0018.0 + 4521	00 20 41 + 45 37 44	−391	−0.58
0018.7 + 4251	00 21 26 + 43 07 45	−2022	−0.76
0018.7 + 4737	00 21 22 + 47 54 30	241	−0.95
0018.8 + 3425A	00 21 24 + 34 44 45	1200	−0.39
0018.8 + 3425^{s}	00 21 26 + 34 42 32	1033	−0.85
0018.8 + 3459B^{p}	00 21 28 + 35 17 19	−1697	−0.75
0019.1 + 4311	00 21 48 + 43 28 25	−1938	−1.00
0019.2 + 4358	00 21 52 + 44 15 27	−477	−0.95
0019.6 + 4739	00 22 21 + 47 56 17	241	−0.97
0020.0 + 4402A	00 22 32 + 44 18 17	−368	−0.78

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT, 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0020.1 + 3252	00 22 48 + 33 09 06	881	−0.58
0020.4 + 3649	00 23 07 + 37 05 53	−1207	−0.76
0020.9 + 3710	00 23 36 + 37 26 59	−1698	−1.05
0021.1 + 4915	00 23 51 + 49 31 47	48	−0.84
0021.4 + 4038	00 24 04 + 40 55 21	−662	−0.63
0021.5 + 3702^s	00 24 12 + 37 18 45	−2039	−0.85
0021.7 + 5815	00 24 29 + 58 32 11	120	−0.63
0022.0 + 3012	00 24 42 + 30 29 26	−2300	−0.86
0022.2 + 4102	00 24 55 + 41 19 05	−523	−0.68
0022.4 + 3124	00 25 03 + 31 41 26	−1022	−0.68
0022.4 + 4038	00 25 05 + 40 55 29	−662	−0.61
0022.6 + 3354	00 25 20 + 34 11 08	1378	−0.58
0023.3 + 4153	00 26 02 + 42 09 40	−462	−1.47
0024.0 + 4839	00 26 45 + 48 55 55	1317	−0.60
0024.1 + 3008	00 26 45 + 30 25 35	−2428	−0.75
0024.3 + 3407	00 26 60 + 34 24 33	667	−0.51
0024.5 + 4618	00 27 16 + 46 34 57	−99	−0.69
0024.6 + 4230A	00 27 16 + 42 45 15	−1215	0.96
0024.6 + 4230	00 27 18 + 42 46 59	−1591	−1.24
0024.6 + 4230B	00 27 19 + 42 47 49	−1591	−1.21
0024.9 + 3811	00 27 34 + 38 27 36	−712	−0.41
0025.0 + 3146	00 27 44 + 32 03 17	−1840	−1.58
0025.0 + 4205	00 27 44 + 42 21 44	−1095	−1.02
0025.8 + 3928	00 28 34 + 39 44 41	−994	−0.98
0025.8 + 3931	00 28 31 + 39 48 26	−1137	−0.77
0026.2 + 4616	00 28 59 + 46 33 08	−67	−0.57
0026.7 + 3016	00 29 25 + 30 33 28	−1692	−0.60
0026.9 + 4405	00 29 37 + 44 22 11	28	−0.84
0027.0 + 3932	00 29 44 + 39 48 40	941	−0.73
0027.1 + 7135	00 30 10 + 71 51 47	159	−0.33
0027.2 + 4143	00 29 55 + 42 00 25	−74	−1.51
0027.3 + 4659	00 30 06 + 47 15 43	−683	−0.20
0027.4 + 4624	00 30 12 + 46 40 36	−405	−0.41
0027.7 + 4035	00 30 25 + 40 52 33	185	−0.14
0027.9 + 4220	00 30 40 + 42 37 06	513	−0.79
0027.9 + 5847	00 30 43 + 59 04 20	−1284	−0.65
0028.0 + 3418A	00 30 40 + 34 36 01	208	−0.44
0028.0 + 3418	00 30 45 + 34 34 45	110	−0.93
0028.7 + 4923	00 31 27 + 49 40 23	−233	−1.10
0028.9 + 5337	00 31 43 + 53 54 01	−956	−0.85
0029.0 + 5332	00 31 52 + 53 49 07	−799	−0.65
0029.1 + 3744	00 31 50 + 38 01 03	431	−0.18
0029.6 + 4507	00 32 19 + 45 24 03	223	−0.16
0029.8 + 3605	00 32 33 + 36 22 12	−836	0.58
0030.3 + 3054	00 33 01 + 31 10 49	−684	−1.16
0030.5 + 3059	00 33 12 + 31 16 30	−799	0.37
0030.8 + 3721	00 33 30 + 37 37 40	−1180	−0.70
0030.8 + 3910	00 33 33 + 39 27 28	−939	−1.44
0030.9 + 4847	00 33 42 + 49 03 38	774	−0.09
0031.0 + 3049	00 33 44 + 31 05 46	−971	−1.18
0031.2 + 5254	00 34 01 + 53 11 18	−2138	−0.46
0031.3 + 3946	00 34 06 + 40 02 51	59	−0.45

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT, 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0031.6 + 4139	00 34 22 + 41 55 57	−611	−0.95
0031.7 + 4019	00 34 29 + 40 35 54	−555	−0.85
0031.9 + 3507A^s	00 34 36 + 35 23 53	−663	−0.45
0032.1 + 5116	00 34 53 + 51 33 22	−797	−0.49
0033.0 + 2933	00 35 40 + 29 49 45	−188	−1.01
0033.5 + 3029	00 36 10 + 30 45 33	−648	−0.79
0034.2 + 3530	00 36 56 + 35 46 37	202	−1.52
0034.2 + 4339	00 36 58 + 43 56 18	−603	−1.19
0034.3 + 3030	00 36 59 + 30 46 32	−916	−1.12
0034.5 + 3215A	00 37 09 + 32 30 41	−1292	−0.93
0034.5 + 3215	00 37 11 + 32 32 16	−1423	−0.98
0034.5 + 3418	00 37 16 + 34 34 52	1201	−0.64
0034.5 + 4400	00 37 16 + 44 17 26	−906	−0.66
0034.8 + 4526	00 37 33 + 45 43 08	−364	−0.81
0035.8 + 3012	00 38 30 + 30 28 58	−474	−0.98
0035.9 + 3701	00 38 38 + 37 18 05	−510	−1.09
0036.2 + 4138	00 38 57 + 41 54 40	−1512	−0.53
0036.2 + 4418	00 39 00 + 44 35 26	847	−1.10
0036.3 + 3221A	00 39 01 + 32 36 12	−862	−1.00
0036.3 + 3221B	00 39 09 + 32 39 42	−529	−1.14
0036.4 + 3636	00 39 06 + 36 52 54	−1223	−0.33
0036.7 + 3216	00 39 24 + 32 32 44	−730	−1.06
0036.7 + 4320	00 39 29 + 43 36 51	−698	−0.64
0036.9 + 4138	00 39 40 + 41 55 07	−406	−0.81
0037.5 + 4640	00 40 18 + 46 57 15	−685	−0.91
0037.7 + 3539	00 40 28 + 35 56 11	505	−0.91
0037.7 + 3805	00 40 26 + 38 21 32	−94	−0.82
0037.9 + 4157	00 40 44 + 42 13 31	−658	−0.79
0038.2 + 3310	00 40 56 + 33 26 32	−32	−0.71
0038.6 + 3802	00 41 19 + 38 19 03	−128	−0.87
0039.3 + 3642A^s	00 41 55 + 36 58 57	−1132	0.26
0039.3 + 3642^s	00 42 02 + 36 59 25	−1132	−0.93
0039.5 + 3218	00 42 16 + 32 34 47	−1035	−0.14
0039.6 + 3110	00 42 22 + 31 26 44	345	−1.34
0039.7 + 4814	00 42 31 + 48 31 15	−340	−0.81
0040.0 + 5720	00 42 53 + 57 36 38	−825	−0.83
0040.4 + 3315	00 43 08 + 33 31 57	−1179	−0.87
0040.7 + 3806	00 43 31 + 38 22 40	−105	0.45
0040.9 + 3452	00 43 39 + 35 09 13	−207	−0.42
0041.2 + 3346	00 43 59 + 34 03 03	−961	−1.02
0041.9 + 4732	00 44 47 + 47 48 31	−1123	−0.60
0042.1 + 3436	00 44 52 + 34 52 58	−23	−0.70
0042.1 + 4732	00 44 58 + 47 48 42	−1123	−0.63
0042.6 + 4653	00 45 28 + 47 09 25	−181	−0.53
0042.9 + 4657	00 45 42 + 47 14 12	205	−0.63
0042.9 + 5111	00 45 49 + 51 28 21	−387	−0.80
0043.3 + 4444	00 46 06 + 45 01 13	−2875	−0.74
0043.6 + 3104	00 46 20 + 31 21 16	−405	−0.25
0043.8 + 3453	00 46 31 + 35 10 06	−272	0.23
0044.0 + 4902	00 46 53 + 49 19 06	−2242	−1.16
0044.1 + 3811^s	00 46 53 + 38 27 31	−1695	−0.79
0044.4 + 3901	00 47 12 + 39 18 18	−447	−0.68

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT, 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0044.4 + 4908	00 47 17 + 49 25 11	−2380	−0.35
0044.6 + 7431	00 48 03 + 74 47 41	−860	−1.16
0044.7 + 3358	00 47 30 + 34 14 32	−1324	−1.68
0044.7 + 3858	00 47 30 + 39 15 13	−629	−0.34
0044.9 + 3011	00 47 37 + 30 28 00	90	−0.51
0045.2 + 5258	00 48 06 + 53 14 43	550	−0.64
0045.4 + 3356	00 48 08 + 34 13 07	−1203	−0.59
0045.5 + 3247	00 48 16 + 33 04 03	68	−0.12
0045.6 + 7437	00 49 04 + 74 54 03	−717	−0.97
0045.8 + 3958^s	00 48 36 + 40 14 25	−602	−0.51
0046.7 + 3532	00 49 30 + 35 49 09	−810	−0.59
0047.0 + 4038	00 49 48 + 40 54 22	307	−0.68
0047.2 + 3222	00 49 57 + 32 38 50	−301	0.05
0047.2 + 3445	00 49 59 + 35 01 59	−976	−0.37
0047.8 + 3314	00 50 35 + 33 30 20	−517	−0.67
0047.9 + 3756	00 50 45 + 38 13 13	−1177	−0.88
0048.0 + 5802	00 50 59 + 58 19 07	−153	−1.30
0049.0 + 3253	00 51 49 + 33 09 51	−36	−0.63
0049.0 + 3630	00 51 45 + 36 47 13	−696	−0.59
0049.4 + 4217	00 52 16 + 42 33 26	813	−1.03
0049.5 + 3836A	00 52 12 + 38 51 54	−1085	0.18
0049.5 + 3836B	00 52 19 + 38 53 07	−1093	−0.75
0049.7 + 4801	00 52 35 + 48 17 38	−2034	−0.55
0049.8 + 5355	00 52 42 + 54 11 57	−204	−0.06
0050.3 + 4731	00 53 09 + 47 48 00	−1037	0.20
0050.6 + 2921	00 53 24 + 29 37 35	−846	−1.28
0050.9 + 4039	00 53 42 + 40 55 29	−1148	−0.53
0053.6 + 3544	00 56 26 + 36 00 20	−1253	−1.19
0054.6 + 5034	00 57 31 + 50 50 19	358	−0.38
0056.3 + 4705	00 59 13 + 47 21 41	−2511	−1.34
0056.4 + 3748	00 59 13 + 38 04 29	−356	−0.04
0056.4 + 3804	00 59 16 + 38 20 13	−13	0.74
0057.4 + 7437	01 01 01 + 74 53 14	−1104	−0.70
0057.5 + 3459	01 00 20 + 35 15 21	−886	−1.71
0057.6 + 5257	01 00 36 + 53 13 60	−1418	0.77
0057.7 + 4835	01 00 40 + 48 51 37	−2005	0.09
0057.9 + 7440	01 01 34 + 74 57 03	−1382	−0.61
0058.5 + 4439	01 01 24 + 44 55 19	−1253	−0.68
0058.7 + 3846	01 01 33 + 39 02 23	32	−0.18
0059.1 + 3129B	01 01 55 + 31 46 05	−1158	−0.98
0059.1 + 5601	01 02 09 + 56 17 59	−3200	−0.83
0059.7 + 3459	01 02 33 + 35 15 26	−83	−0.90
0059.8 + 4624	01 02 42 + 46 40 10	−440	−0.32
0059.8 + 7518	01 03 34 + 75 34 53	−916	−1.05
0100.1 + 4557	01 02 59 + 46 13 21	−189	−1.27
0100.2 + 5416	01 03 16 + 54 32 54	−1810	−0.37
0100.3 + 3739	01 03 11 + 37 55 42	−1578	0.20
0101.0 + 3310	01 03 50 + 33 27 01	−617	−1.53
0101.2 + 3130	01 03 60 + 31 46 34	−1073	−1.19
0102.0 + 4638	01 04 55 + 46 54 25	−241	0.21
0102.9 + 3113	01 05 43 + 31 30 02	−542	−0.77
0103.0 + 3107	01 05 51 + 31 23 55	−1050	−1.05

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT, 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0103.9 + 3628	01 06 43 + 36 44 11	723	−0.89
0104.1 + 4511	01 07 04 + 45 27 13	820	−0.36
0104.5 + 4900	01 07 27 + 49 16 17	−1029	−0.36
0104.6 + 3331	01 07 25 + 33 47 02	−405	−0.69
0105.7 + 3049	01 08 31 + 31 05 52	−767	−1.29
0105.8 + 4203	01 08 40 + 42 19 45	−1547	−0.62
0105.8 + 4500	01 08 45 + 45 16 23	1079	−1.44
0105.9 + 5019	01 08 52 + 50 35 31	−1200	−1.19
$0107.3 + 4141^{p}$	01 10 12 + 41 57 54	−900	−0.90
0108.6 + 4741	01 11 34 + 47 57 18	−498	−1.50
0108.8 + 3251	01 11 40 + 33 07 10	526	−0.91
0109.1 + 2934	01 11 52 + 29 50 44	−1956	−0.39
0109.4 + 3907	01 12 16 + 39 23 18	−812	−0.80
0109.5 + 4948	01 12 30 + 50 03 55	−1537	−0.94
0110.0 + 4626	01 13 00 + 46 42 18	−1163	−1.15
0110.4 + 4403	01 13 19 + 44 19 03	161	−0.94
0110.4 + 5055	01 13 26 + 51 11 30	827	−1.07
0112.2 + 6057	01 15 26 + 61 13 15	−500	−0.64
0113.5 + 3050	01 16 19 + 31 06 33	−1036	−0.88
0115.1 + 3936	01 18 01 + 39 52 02	−662	−0.96
0115.5 + 2953	01 18 17 + 30 08 53	−227	−1.20
0115.6 + 4904	01 18 40 + 49 19 52	−558	−0.32
0115.8 + 4415	01 18 46 + 44 30 60	−323	−0.95
0116.3 + 5015	01 19 20 + 50 31 04	−332	−0.46
0116.7 + 4008	01 19 37 + 40 24 00	−484	−0.40
0117.1 + 3332	01 19 56 + 33 48 09	−388	−0.96
0117.2 + 4848	01 20 13 + 49 03 56	−1595	−0.41
$0117.2 + 5216^{p}$	01 20 21 + 52 32 15	−587	−0.91
0117.6 + 3753	01 20 28 + 38 09 30	13	−0.98
0117.6 + 4841	01 20 41 + 48 57 35	−1742	−0.83
0117.9 + 3919	01 20 47 + 39 35 33	−413	−0.91
0118.4 + 5629	01 21 36 + 56 44 44	−259	−0.72
0118.5 + 4803A	01 21 28 + 48 18 45	−1445	−0.87
0118.5 + 4803B	01 21 34 + 48 18 53	−900	−1.26
0118.6 + 4503	01 21 36 + 45 19 08	−1520	−1.33
0119.0 + 4508	01 22 01 + 45 23 51	−2283	−0.03
0120.4 + 3046	01 23 12 + 31 02 19	647	−0.06
0120.5 + 4335	01 23 30 + 43 51 30	−1684	−0.70
0120.9 + 3738	01 23 49 + 37 53 60	−1352	−0.33
0121.1 + 3626	01 23 59 + 36 41 53	−1975	−0.10
0121.1 + 3713	01 24 01 + 37 28 57	239	−1.42
$0122.3 + 3256^{s}$	01 25 11 + 33 11 57	−1776	−0.40
0122.3 + 3655	01 25 12 + 37 11 04	−414	−0.09
$0122.5 + 3955^{p}$	01 25 25 + 40 11 28	1138	0.23
0123.0 + 4240	01 26 01 + 42 56 22	463	−0.92
0123.2 + 5028	01 26 21 + 50 43 40	165	0.19
$0124.0 + 3232^{s}$	01 26 51 + 32 48 06	−1430	−0.83
0124.7 + 7158	01 28 37 + 72 14 27	−823	−1.21
0125.7 + 3109	01 28 37 + 31 24 49	−491	−0.27
0126.0 + 2902	01 28 50 + 29 17 59	−1983	−0.95
$0126.2 + 3542^{p}$	01 29 08 + 35 58 06	−1893	−0.71
0127.1 + 3616	01 30 01 + 36 31 36	248	0.20

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT, 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0127.1 + 4117	01 30 05 + 41 32 35	−1506	−1.14
0127.9 + 4047	01 30 54 + 41 03 23	−817	−0.53
0128.4 + 4321	01 31 24 + 43 37 07	−87	−1.09
0129.0 + 4804^s	01 32 07 + 48 20 14	−2118	−0.43
0129.1 + 4330	01 32 06 + 43 45 35	−913	−0.37
0130.2 + 3404	01 33 09 + 34 20 08	−883	−0.90
0131.2 + 7049	01 35 04 + 71 04 56	−353	−0.82
0132.0 + 4036	01 34 60 + 40 52 05	499	−0.71
0132.5 + 4058	01 35 32 + 41 14 15	−466	−0.51
0132.6 + 2948^s	01 35 30 + 30 03 55	−897	−0.05
0133.5 + 4137	01 36 33 + 41 52 39	−802	−0.56
0134.0 + 2959	01 36 54 + 30 14 32	−991	−1.03
0134.8 + 3729	01 37 47 + 37 44 23	−1919	0.56
0135.0 + 4413	01 38 02 + 44 28 56	−967	−1.01
0135.4 + 4403	01 38 27 + 44 18 39	232	−1.63
0136.9 + 3343^s	01 39 49 + 33 58 39	−1594	−1.34
0137.3 + 5149	01 40 28 + 52 04 44	−90	−1.19
0137.7 + 3534	01 40 40 + 35 49 39	−1961	−1.16
0137.7 + 7353	01 41 60 + 74 08 47	−2762	−0.23
0139.3 + 4144	01 42 22 + 41 59 14	−697	−0.17
0139.6 + 4236	01 42 38 + 42 51 42	−61	−1.32
0139.9 + 4421	01 42 56 + 44 36 58	−312	−1.58
0140.2 + 5158	01 43 25 + 52 13 16	−559	−1.24
0140.3 + 4144	01 43 17 + 41 59 27	186	−0.98
0141.6 + 3235	01 44 32 + 32 50 57	−675	−1.03
0143.1 + 3644	01 46 06 + 36 59 13	−1818	−0.90
0143.1 + 4926	01 46 19 + 49 41 53	−550	−0.96
0143.3 + 3219	01 46 12 + 32 34 50	−1416	−0.41
0143.3 + 4551	01 46 27 + 46 06 19	−1407	−0.60
0143.4 + 4846	01 46 36 + 49 01 52	−1632	−1.49
0143.5 + 4154	01 46 34 + 42 09 16	745	−0.50
0143.9 + 3641	01 46 56 + 36 56 46	−1818	−0.60
0143.9 + 4555	01 47 02 + 46 09 58	−1599	−0.69
0143.9 + 5506	01 47 15 + 55 21 27	−980	−0.88
0144.0 + 3646	01 47 01 + 37 01 36	−2056	−1.01
0144.1 + 5503	01 47 28 + 55 18 48	−972	0.05
0144.8 + 7026	01 48 51 + 70 41 16	−198	−1.95
0145.2 + 5001	01 48 23 + 50 16 26	−711	−0.87
0145.9 + 4006	01 48 58 + 40 21 35	−1025	0.43
0146.3 + 3248A	01 49 13 + 33 05 34	219	−1.26
0146.3 + 3248B	01 49 16 + 33 02 51	49	−0.71
0150.2 + 3104	01 53 07 + 31 18 48	−756	−0.64
0150.4 + 2920	01 53 20 + 29 35 43	579	−0.49
0150.4 + 3124	01 53 22 + 31 39 25	−1384	−0.82
0150.9 + 4148	01 53 60 + 42 03 07	−545	−0.84
0151.4 + 4857	01 54 39 + 49 11 55	−1997	−1.27
0152.1 + 4938	01 55 18 + 49 53 05	922	−0.49
0152.3 + 4707	01 55 29 + 47 22 04	−1190	−1.01
0152.3 + 6508	01 56 07 + 65 22 60	−1671	−0.94
0153.0 + 3224	01 55 55 + 32 39 16	−82	−0.19
0153.5 + 3100	01 56 24 + 31 14 52	−223	−1.22
0153.8 + 3212	01 56 44 + 32 27 30	−450	−0.53

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT, 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0154.4 + 4210	01 57 32 + 42 24 49	−188	−0.64
0155.3 + 4342	01 58 26 + 43 57 28	147	−0.78
0156.1 + 3103	01 59 01 + 31 18 11	−127	−0.42
0157.0 + 3537	02 00 02 + 35 52 28	407	−0.44
0157.1 + 5225	02 00 24 + 52 40 21	−330	−0.57
0157.1 + 5338	02 00 29 + 53 52 55	803	−1.76
0157.3 + 5227	02 00 40 + 52 42 13	−396	−1.52
0158.0 + 3131	02 00 56 + 31 46 15	−622	−1.09
0158.1 + 3513	02 01 09 + 35 28 15	−287	−0.97
0158.2 + 3138	02 01 07 + 31 52 49	−831	−0.18
0158.4 + 3715	02 01 28 + 37 30 01	−190	−0.86
0158.6 + 3137	02 01 36 + 31 51 32	−709	−0.51
0158.6 + 3510	02 01 36 + 35 24 46	−190	−0.80
0159.0 + 4311	02 02 11 + 43 25 33	−123	−0.64
0159.1 + 3822	02 02 10 + 38 36 60	−718	−1.33
0159.7 + 2915	02 02 37 + 29 30 02	−977	−1.26
0159.7 + 3833A	02 02 45 + 38 47 14	−190	−1.07
0159.7 + 3833B	02 02 47 + 38 50 07	−100	−0.29
0159.7 + 4113	02 02 47 + 41 27 52	−1119	−0.97
0159.8 + 3741	02 02 53 + 37 56 19	−514	−0.20
0159.9 + 3838	02 02 56 + 38 52 38	210	−0.52

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно отметить, что проблема неполноты каталогов решается при помощи новых алгоритмов и программ, чувствительных к топологическим, статистическим и спектральным характеристикам многочастотных карт космических миссий.

В данной работе для поиска новых СЗ-объектов мы применили естественный подход, основанный на соотношении сигналов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, но в направлении на радиоисточники, которые могут являться признаками существования скоплений галактик. Для анализа мы использовали данные по радиоисточникам каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^{\rm h} \le \alpha < 2^{\rm h}$ и склонений $28^\circ < \delta < 76^\circ$ на эпоху каталога, содержащего астрометрическую (координаты) и астрофизическую (плотности потока на частоте 325 МГц) информацию, для 16 364 объектов.

После автоматической процедуры селекции потенциальных кандидатов были отобраны 1778 объектов (9.9% от общего списка), из которых с помощью визуальной инспекции был выделен 381 источник (2.1% от общего списка) с наиболее типичными признаками наличия эффекта. Любопытно отметить, что метод позволил обнаружить 21 из 28 источников Planck, которые вошли в соответствующий каталог миссии, а визуальный контроль, основанный на оценке контраста эффекта, оставил шесть из них. Отметим, что список объектов, не представленных в данной работе из-за "защумленности" карты флуктуациями CMB, содержится в дополнительном каталоге у авторов статьи. Предварительные оценки показывают, что количество объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича при тщательном анализе карт микроволнового фона может возрасти до десятков тысяч, что в несколько раз превышает число объектов, полученное по отождествлениям с обзорами SDSS и WISE [42]. Важно отметить, что предложенный метод поиска скоплений галактик с СЗ-эффектом по радиоисточникам также сделает возможным поиск похожих объектов с большими красными смещениями ($z > 1$), которые не видны в [42] в силу селекционных эффектов.

Отобранные источники в дальнейшим могут быть использованы для оптического исследования окружения, оценок массы и других космологических свойств для проверок следствий стандартной космологической модели. Кроме того, новые списки протяженных радиоисточников в микроволновом диапазоне дают новую информацию для учета

при моделировании распределения протяженных радиоисточников на полной сфере [43]. Исследования окружения радиоисточников каталога WENSS других диапазонов прямых восхождений, а также других радиоастрономических обзоров, продолжаются.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту за полезные замечания, которые привели к коррекции текста и улучшению его понимания. Также авторы признательны ESA за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. При построении непрерывных радиоспектров применялась база данных радиоастрономических каталогов CATS [44, 45]. В работе использованы система обработки радиоастрономических данных FADPS [39, 46] и пакет GLESP [34,35,47] для анализа протяженного излучения на сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **208**, 20 (2013).
2. R. Adam et al. (Planck Collab.), Astron. Astrophys. **594**, A1 (2016).
3. C. P. Ahn et al. (SDSS-III Collab.), Astrophys. J., Suppl. Ser. **203**, 21 (2012).
4. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., Astrophys. J., Suppl. Ser. **182**, 543 (2009).
5. Y. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, Astrophys. Space Sci. **4**, 301 (1969).
6. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), Astron. Astrophys. **594**, A24 (2016).
7. K. Vanderlinde, T. M. Crawford, T. de Haan, et al., Astrophys. J. **722**, 1180 (2010).
8. M. Hasselfield, M. Hilton, T. A. Marriage, et al., J. Cosmol. Astropart. Phys. **7**, 008 (2013).
9. G. Blumenthal and G. Miley, Astron. Astrophys. **80**, 13 (1979).
10. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 123 (2009).
11. O. V. Verkhodanov and Y. N. Parijskij, *Radio Galaxies and Cosmology* (Fizmatlit, Moscow, 2009) [in Russian].
12. Y. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).
13. C. De Breuck, W. van Breugel, H. J. A. Röttgering, and G. Miley, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **143**, 303 (2000).
14. B. P. Venemans, H. J. A. Röttgering, G. K. Miley, et al., Astron. Astrophys. **461**, 823 (2007).
15. T. V. Keshelava and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **70**, 257 (2015).
16. R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **124**, 259 (1997).
17. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys. **571**, A1 (2014).
18. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys. **594**, A26 (2016).
19. R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich, Comments Astrophysics Space Physics **4**, 173 (1972).
20. R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich, Mon. Not. R. Astron. Soc. **190**, 413 (1980).
21. K. K. Schaffer, T. M. Crawford, K. A. Aird, et al., Astrophys. J. **743**, 90 (2011).
22. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys. **571**, A21 (2014).
23. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys. **571**, A20 (2014).
24. O. V. Verkhodanov, E. K. Maiorova, O. P. Zhelenkova, et al., Astron. Rep. **60**, 630 (2016).
25. L. I. Gurvits, K. I. Kellermann, and S. Frey, Astron. Astrophys. **342**, 378 (1999).
26. O. V. Verkhodanov, Y. N. Parijskij, and A. A. Starobinsky, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 5 (2005).
27. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Y. N. Parijiskiji, et al., Astron. Lett. **32**, 433 (2006).
28. Y. N. Parijskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **439**, 2314 (2014).
29. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **71**, 139 (2016).
30. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, et al., Astron. Rep. **61**, 297 (2017).
31. E. Bertin and S. Arnouts, Astron. Astrophys., Suppl. Ser. **117**, 393 (1996).
32. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., Astrophysical Bulletin **65**, 101 (2010).
33. R. Adam et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys. **594**, A10 (2016).
34. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., Int. J. Mod. Phys. D **14**, 275 (2005).
35. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).
36. R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen, et al., Astron. Astrophys. **376**, 359 (2001).

37. O. V. Verkhodanov, Y. V. Naiden, V N. Chernenkov, and N. V. Verkhodanova, Astrophysical Bulletin **69**, 113 (2014).
38. O. V. Verkhodanov, in *Proc. 27th Radio Astronomical Conf. on Problems of Modern Radio Astronomy* (Inst. Appl. Astronomy RAS, St.-Petersburg, 1997), Vol. 1, p. 322 [in Russian].
39. O. V. Verkhodanov, ASP Conf. Ser. **125**, 46 (1997).
40. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys. **594**, A27 (2016).
41. Z. L. Wen, J. L. Han, and F. S. Liu, Astrophys. J., Suppl. Ser. **199**, 34 (2012).
42. R. A. Burenin, Astron. Lett. **43**, 507 (2017).
43. D. I. Solovyov and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **72**, 217 (2017).
44. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005).
45. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Data Sci. J. **8**, 34 (2009).
46. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
47. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Int. J. Mod. Phys. D **20**, 1053 (2011).

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СРЕДНИХ НЕПРЕРЫВНЫХ СПЕКТРОВ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЯХ $Z > 2$*

О. В. Верходанов[1], Д. Д. Козлова[2], Ю. В. Сотникова[1]

[1]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия
[2]Университет Гронингена, Гронинген, 9700 АВ Нидерланды

Предложен новый метод исследования популяции далеких радиоисточников. Он основан на построении среднего континуального радиоспектра для объектов из заданных диапазонов красных смещений. В данной работе размер интервала красных смещений dz выбран равным 0.1. Данные по средними спектрам теоретически могут позволить исследовать распределение крупномасштабной структуры и особенности ее формирования. В практическом плане средний спектр на разных z позволяет моделировать распределение радиоисточников, требующееся в различных вычислительных задачах. Изменение формы спектра на разных z позволяет говорить о космологической эволюции популяций радиоисточников.

Ключевые слова: радиоконтинуум: общее

1. ВВЕДЕНИЕ

Объяснение современной астрофизической картины мира требует воспроизводства ее особенностей при моделировании разнообразных явлений: от возникновения первичных неоднородностей и формирования крупномасштабной структуры до особенностей эволюции галактик и планетных систем. Одним из таких этапов эволюции является период активности радиоисточников. Активность радиоисточника вообще представляет собой результат взаимодействия сверхмассивной черной дыры и аккрецирующего на нее газа, то есть процесса, проходящего, как правило, в скоплениях галактик и отражающего общую эволюцию материи нашей Вселенной. Массовое «зажигание» радиоисточников приходится на период активных слияний (мерджинга) галактик, которые обеспечивают и приток газа в галактики, и сравнительно быстрый рост центральных сверхмассивных черных дыр в активных галактиках. Эпоха мерджинга галактик фактически начинается в конце эпохи реионизации [1,2] и практически заканчивается в настоящее время, когда центральные галактики скоплений почти полностью «выедают» вещество из своего окружения. Количество радиоисточников в разные эпохи таким образом отражает физические процессы, происходящие при формировании скоплений галактик, а средний радиоспектр радиоисточников в различные периоды позволяет грубо оценивать среднюю энергетику этих событий.

Наблюдения радиоисточников на больших красных смещениях, кроме физики активных ядер, позволяют исследовать также окружение галактик и свойства той части Вселенной, через которую проходит к нам излучение радиоисточников. Например, одна из возможностей восстановления распределения материи в крупномасштабной структуре — изучение абсорбционных линий Hα в спектрах далеких квазаров [3,4]. Кроме того, радиоспектры наиболее далеких радиоисточников могут иметь отклонения от стандартного вида в распределении энергии синхронного излучения, которые вызваны излучением и поглощением в облаках нейтрального водорода в линии 21 см. Этот эффект напоминает вклад излучения первых звезд в распределение фонового излучения в линии 21 см [5,6], отнесенной в декаметровую и метровую области за счет больших красных смещений. Детали среднего спектра популяции радиоисточников из одного диапазона красных смещений могут характеризовать и количество радиогромких активных ядер галактик в определенный период времени, и связанный с ним темп слияний галактик, и особенности крупномасштабной структуры, через которую проходит радиоизлучение. В последнем случае для усиления ожидаемых эффектов требуются множественные осреднения континуальных спектров далеких радиоисточников в широком диапазоне радиочастот,

*Астрофизический бюллетень. 2018. 73(4). С. 418

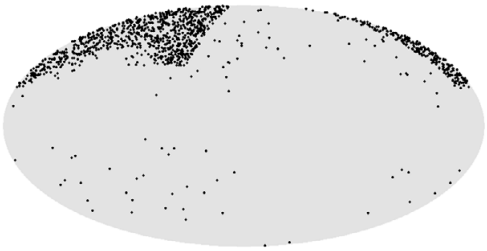


Рис. 1. Распределение анализируемых источников на сфере в галактической системе координат.

как было сделано при поиске первых звезд [5].

Другой важный момент изучения и применения среднего спектра в анализе данных радиообзоров неба связан с совершенствованием процедуры моделирования распределения и учета радиоизлучения от внегалактических источников. Классическое моделирование распределения радиоисточников предполагает использование диаграммы $\log N$–$\log S$ на различных частотах, распределений спектральных индексов и угловых размеров объектов [7–9]. Кроме того, при учете красных смещений используется функция радиосветимости. Учет поведения распределения энергии в спектре радиоисточников становится особенно важен при моделировании процедуры разделения компонент для карт поляризации, где пиксельная чувствительность на масштабах больше $5'$ существенно зависит от сигнала синхротронного излучения нашей Галактики [10] и внегалактических радиоисточников.

Отметим, что осреднение спектров источников уже применялось ранее в работах [11–13] и было связано с использованием процедуры стэкинга (stacking) для различных популяций радиогалактик (в том числе и в разных диапазонах красных смещений) для многочастотных микроволновых данных миссии Planck с последующим построением радиоспектра. Однако осреднение в указанном примере проводилось для конкретных частот, но не для всего континуального спектра. Кроме того, если быть исторически корректным, то процедура осреднения спектров в различных диапазонах красных смещений применялась ранее как неявно скрытая в алгоритме построения диаграммы "спектральный индекс–красное смещение", характеризующей излучение релятивистских электронов в ядрах галактик на больших z и применяемой для селекции далеких радиогалактик [14–19].

2. МЕТОД СРЕДНЕГО СПЕКТРА

Гистограммы распределения по спектральному индексу, плотности потока и красному смещению для объектов анализируемой выборки показаны соответственно на рис. 2, 3 и 4.

Метод включает отбор объектов с помощью баз данных NED[1] и CATS[2] [20, 21], аппроксимацию радиоспектров в случае наличия многочастотных радиоданных и осреднение континуальных спектров в заданных интервалах красных смещений. Для расчета континуальных спектров использовались результаты кросс-идентификации в базе данных CATS с окном отождествления $100'' \times 100''$. Удаление случайных радиообъектов поля в заданном боксе проводилось по методике анализа данных, подобной описанной в работах [22, 23]. Суть метода состоит в применении совместного анализа данных в координатном и спектральном пространствах для выделения вероятных отождествлений конкретных радиоисточников на различных радиочастотах. Для этих целей используется программа `spg` [24] системы обработки континуальных данных на РАТАН-600. При представлении спектров $S(\nu)$ для дальнейшего вычисления аппроксимационных функций применяется параметризация $S(\nu)$ в формуле $\log S(\nu) = A + Bx + Cf(x)$, где S — плотность потока в Ян, x — логарифм частоты ν в МГц и $f(x)$ — одна из следующих функций $\exp(-x)$, $\exp(x)$ или x^2. Этот набор функций далее будем называть стандартными аппроксимационными кривыми (или функциями).

Средние спектры имеют топологию (положение локальных максимумов и минимумов), отличную от стандартных кривых, которая, в принципе, может характеризовать как особенности распределения энергии в радиоспектре в популяции радиоисточников в заданную космологическую эпоху, так и особенности распространения излучения сквозь космическую паутину.

2.1. Выборка объектов

Построение выборки объектов включало два основных этапа: селекцию объектов — радиоисточников на больших красных смещениях с $z > 2$ — в базе данных NED, в том числе и с фотометрическими оценками z, а также кросс-идентификацию полученного списка с радиоастрономическими каталогами базы данных CATS в окне $100'' \times 100''$. Исходная выборка в NED готовилась в площадке неба с ограничениями по прямому восхождению $7^{\rm h} < \alpha < 17^{\rm h}$ и по склонению $\delta > 29^\circ$ для пе-

[1] `http://ned.ipac.caltech.edu`
[2] `http://cats.sao.ru`

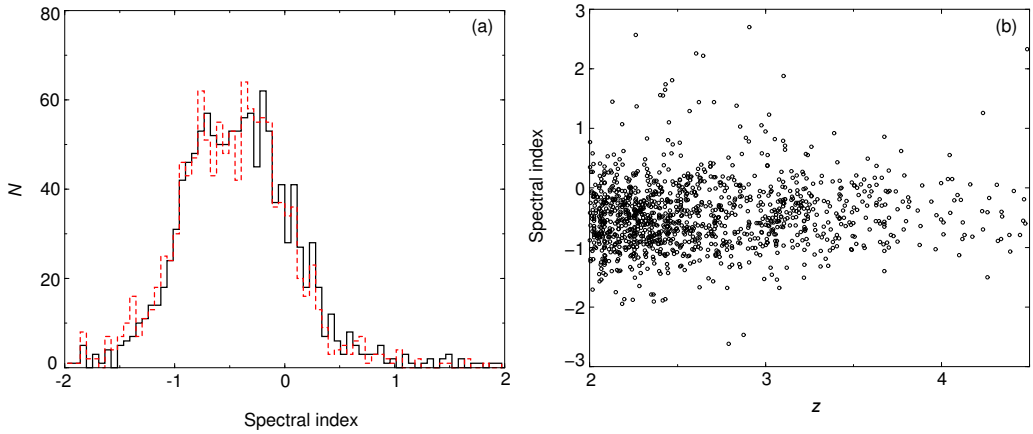


Рис. 2. (a) Гистограмма распределения по спектральному индексу анализируемых источников на частотах 1400 МГц (сплошная линия) и 4850 МГц (штриховая линия); (b) диаграмма “красное смещение z–спектральный индекс на частоте 1400 МГц” для общей выборки радиоисточников.

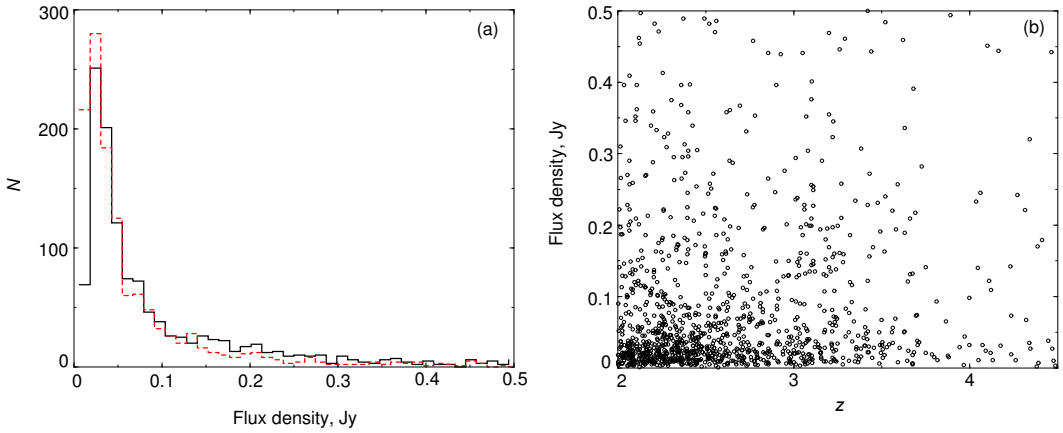


Рис. 3. (a) Гистограмма распределения по плотности потока анализируемых источников на частотах 1400 МГц (сплошная линия) и 4850 МГц (штриховая линия); (b) диаграмма “красное смещение z–плотность потока на частоте 1400 МГц” для общей выборки радиоисточников.

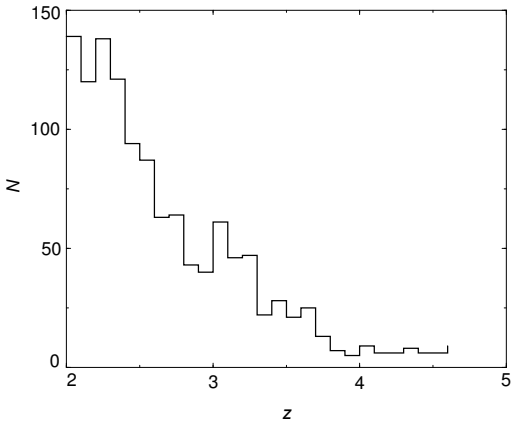


Рис. 4. Гистограмма распределения по красному смещению анализируемых источников.

ресечения с обзором FIRST [25] в радиодиапазоне и SDSS [26] в оптическом диапазоне и содержала 2002 объекта. При дальнейшем анализе рассматривались те радиоисточники, у которых в CATS имеются измерения плотности потока на двух и более частотах. В итоге в выборке осталось 1153 источника[3].

На рис. 1 приведено распределение положения анализируемых источников на сфере.

Наша выборка была расширена за счет дополнительного списка объектов с $z \geq 3$ — квазаров, наблюдаемых на радиотелескопе РАТАН-600. Эта подвыборка имеет 18 пересечений с выборкой радиоисточников из баз данных NED и CATS, описанных выше. Она включает 106 квазаров с известными фотометрическими красными смещениями $z \geq 3$ и с плотностями потоков $S_{1.4\ \mathrm{GHz}} \geq 100$ мЯн. Около 40% квазаров выборки являются блазарами [27] — квазарами, релятивистская струя (джет) которых ориентирована близко к лучу зрения наблюдателя (до 20°). Распределения параметров объектов подвыборки радиоисточников РАТАН-600 показаны на рис. 1–4.

Наблюдения на радиотелескопе проводились в 2017 г. с использованием двух радиометрических комплексов диапазона 1-21.7 и 4.8-21.7 ГГц.

Обработка наблюдательного материала производилась с использованием штатной автоматизированной системы потоковой обработки данных радиометров континуума вторичных зеркал 1 и 2 [28], базируемой на модулях пакета FADPS [29, 30]. По результатам наблюдений готовится отдельная работа для публикации в “Астрофизическом бюллетене” в 2019 г. с описанием методики наблюдений и полученного каталога.

[3]Список объектов доступен по адресу `http://sed.sao.ru/~vo/pub_tab/tab_aver_src_list.html`

2.2. Процедура осреднения

Список радиоисточников был разбит на подвыборки, сформированные по принципу принадлежности объектов к группам с красными смещениями из интервалов $[z_i + dz]$, где i — номер интервала и $dz = 0.1$. В рамках каждого интервала красных смещений мы проводили осреднения аппроксимационных спектров, представленных в виде набора из 300 равноотстоящих точек в логарифмической шкале в диапазоне частот от 300 до 30 000 МГц. Бин $dz = 0.1$ выбран, исходя из следующих рассуждений. При меньшем бине на красных смещениях $z > 3.5$ резко падает число объектов, что делает неэффективной процедуру построения средних спектров в таких интервалах. Для большего бина сказывается физический временной интервал. Так, если “грубая” оценка среднего сопутствующего размера минимальной ячейки однородности составляет около 60–90 млн св. лет, то временной шаг в ΛCDM-космологической модели для $dz = 0.2$ между $z = 2$ и $z = 2.2$ составит примерно 300 млн лет, что значительно больше ячейки однородности.

Осреднение континуальных радиоспектров проводилось двумя методами: 1) в плоскости плотности потоков и 2) в плоскости логарифма плотности потока. В первом случае строилась зависимость

$$S(\nu_j) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} f_k(\nu_j)/f_k(1400)\,, \qquad (1)$$

где ν_j — набор частот в аппроксимационном массиве данных для k-го источника, $f_k(\nu_j)$ — значение плотности потока, рассчитанной для аппроксимационной кривой k-го источника на частоте ν_j, N — количество радиоисточников, у которых есть аппроксимационный спектр, в заданном интервале красных смещений $[z_i + dz]$. Перед процедурой осреднения все спектры приводились к одной величине на частоте 1400 МГц домножением на соответствующий коэффициент в пространстве плотности потока. Во втором случае применялось осреднение по формуле

$$\log S(\nu_j) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \log f_k(\nu_j). \qquad (2)$$

Обозначения те же, что и в Формуле (1). Процедура осреднения радиоспектров выполнялась с помощью утилиты `spcalc` системы обработки данных FADPS[4][30] на РАТАН-600.

[4]`http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html`

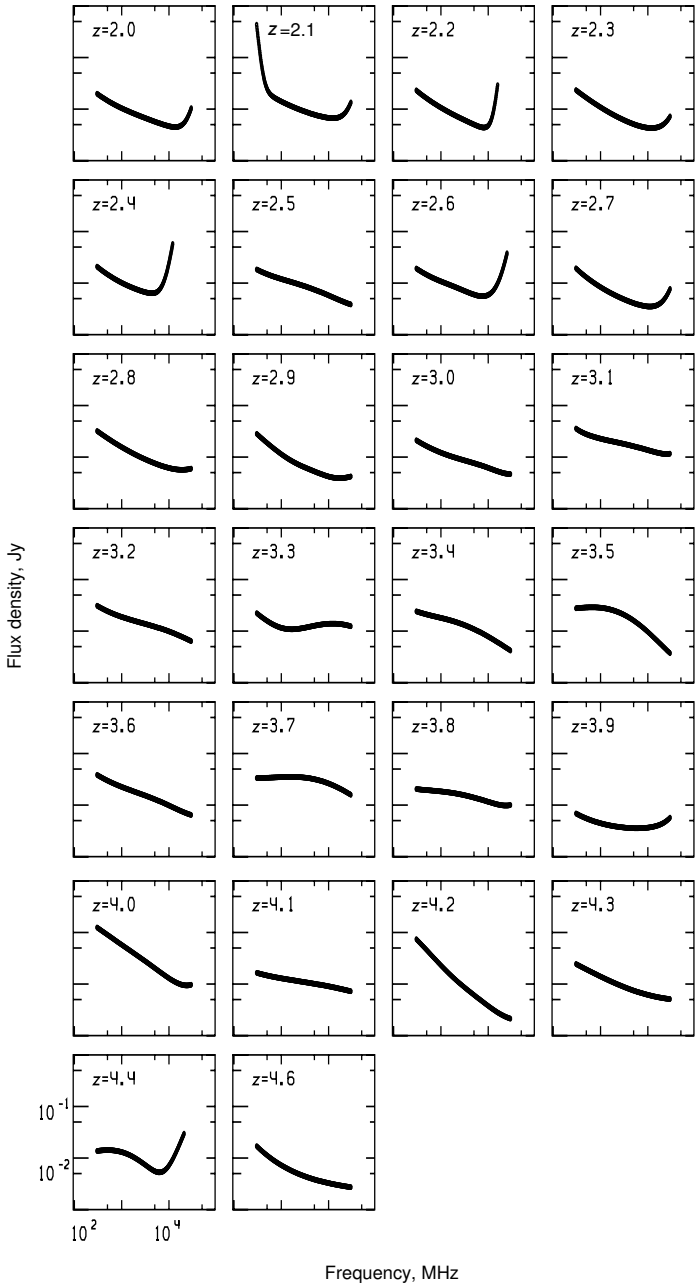


Рис. 5. Средние континуальные спектры радиоисточников в разных диапазонах красных смещений, построенные по методу 1 (Формула (1)).

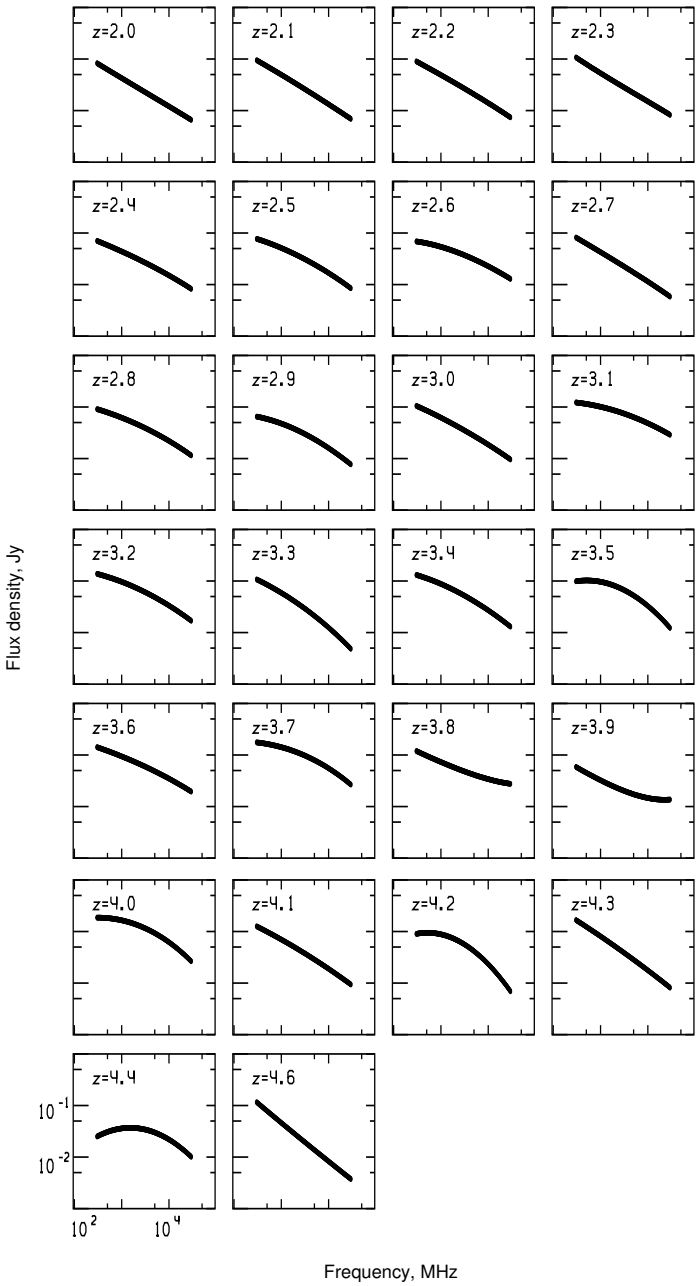


Рис. 6. Средние континуальные спектры радиоисточников в разных диапазонах красных смещений, построенные по методу 2 (Формула (2)).

Далее будем обозначать спектр, полученный по Формуле (1), как $S^{\mathrm{fd}}(\nu)$, а по Формуле (2) — как $S^{\mathrm{lfd}}(\nu)$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Средние континуальные $S^{\mathrm{fd}}(\nu)$- и $S^{\mathrm{lfd}}(\nu)$-спектры[5] радиоисточников в разных диапазонах красных смещений показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Разнообразие форм спектров $S^{\mathrm{fd}}(\nu)$ на разных z отражает чувствительность метода осреднения к топологическим особенностям спектра в отличие от метода вычисления $S^{\mathrm{lfd}}(\nu)$, где среднее по логарифмам оказывается сглаженным и в общем случае соответствует спектру с медленно увеличивающейся крутизной при росте красного смещения.

Как видно на рис. 5 и 6, при улучшении чувствительности кривой, описывающей поведение спектра в пространстве плотностей потоков, такое осреднение в дальнейшем может быть использовано для поиска особенностей (локальных максимумов и минимумов) в радиоспектрах в различные космологические эпохи. Здесь важно отметить, что число обзоров неба на радиочастотах выше 5 ГГц незначительно, и либо их чувствительность не очень высока для анализа спектров, либо они не покрывают исследуемые области. Тогда в рассматриваемом интервале спектра данные неполны и вклад в спектр определенного типа объектов, а именно блазаров, возрастает. В этом случае для учета неполноты спектра требуется введение весовой функции.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен, реализован и протестирован метод осреднения континуальных спектров радиоисточников, представленных в виде набора аналитических аппроксимационных кривых, в различных диапазонах красных смещений. Как предполагается, подобные средние спектры могут дать дополнительную информацию о распределении вещества в крупномасштабной структуре, связанную с излучением линии нейтрального водорода 21 см, отнесенной на различные z. В качестве плюса применяемого подхода можно отметить ожидаемое устойчивое формирование топологических искажений радиоспектра излучением или поглощением линий водорода, которые накладываются на спектр на разных смещениях и дают, как ожидается, вклад в распределение энергии в спектре любого, в том числе и переменного, радиоисточника. Это позволяет использовать в осреднении все типы объектов на больших красных смещениях, имеющих континуальное радиоизлучение. Минусом метода является существенная неполнота используемых данных как по числу самих объектов (неполное и неглубокое покрытие неба радиоисточниками с измеренными z), так и по заполнению распределения энергии измерениями на различных радиочастотах.

Общие выводы таковы:

- качество существующих данных не очень высокое, но все же позволяет строить средние спектры по данным для десятков и сотен радиоисточников;
- радиоспектры следует представлять более сложными функциями, чем стандартный набор, связанный с физическими механизмами излучения и морфологией радиоисточника; в этом смысле (то есть без подгонки физической аналитической модели континуального радиоспектра) спектр, который поможет выделить множественные топологические особенности, нужно описывать кривыми как минимум 3-го или 4-го порядка;
- для ряда диапазонов из области $z < 3$ наблюдаются искажения в среднем спектре в высокочастотной (близкой к миллиметровому диапазону) части, что может говорить о росте вклада излучения ядра (и/или пылевой компоненты излучения) в эпоху наиболее активного мерджинга;
- даже по имеющимся данным можно сделать вывод, что есть очевидная эволюция среднего спектра, отраженная в виде зависимости от красного смещения z (а также их размера θ и радиоспектрального индекса α), которая может быть связана с числом слияний в различные космологические эпохи, “зажиганием” радиоисточников и их собственной эволюции.

На следующем этапе применения метода мы планируем расширить выборку объектов, включить данные дополнительных измерений на РАТАН-600, расширить возможности взвешивающих и аппроксимирующих функций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность рецензенту за полезные замечания, позволившие улучшить содержание предлагаемой статьи. Авторы благодарны А. Г. Дорошкевичу за предварительные обсуждения проблемы формирования крупномасштабной структуры. При исследо-

[5] Таблицы средних спектров доступны по адресу `http://sed.sao.ru/~vo/pub_tab/tab_aver_sp_z.html`

вании использовалась база данных внегалактических объектов NED (NASA/IPAC Extragalactic Database which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration). Авторы также применяли базу данных радиоастрономических каталогов CATS и систему обработки радиоастрономических данных FADPS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. M. Heckman, S. Borthakur, R. Overzier, et al., Astrophys. J. **730**, 5 (2011).
2. P. D. Meerburg, C. Dvorkin, and D. N. Spergel, Astrophys. J. **779**, 124 (2013).
3. A. G. Doroshkevich, J. P. Mucket, and V. Miller, Mon. Not. R. Astron. Soc. **246**, 200 (1990).
4. M. Demiański, A. G. Doroshkevich, and V. I. Turchaninov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **371**, 915 (2006).
5. J. D. Bowman, A. E. E. Rogers, R. A. Monsalve, et al., Nature **555**, 67 (2018).
6. R. Barkana, Nature **555**, 71 (2018).
7. J. J. Condon, Astrophys. J. **284**, 44 (1984).
8. C. A. Jackson and J. V. Wall, Mon. Not. R. Astron. Soc. **304**, 160 (1999).
9. D. I. Solovyov and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **72**, 217 (2017).
10. M. Remazeilles, A. J. Banday, C. Baccigalupi, et al., J. Cosmology Astroparticle Physics **4**, 023 (2018).
11. O. V. Verkhodanov, E. K. Maiorova, O. P. Zhelenkova, et al., Astronomy Reports **60**, 630 (2016).
12. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, and M. L. Khabibullina, Astrophysical Bulletin **71**, 139 (2016).
13. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, et al., Astronomy Reports **61**, 297 (2017).
14. G. R. Whitfield, Mon. Not. R. Astron. Soc. **117**, 680 (1957).
15. R. D. Dagkesamanskii, Nature **226**, 432 (1970).
16. G. Blumenthal and G. Miley, Astron. and Astrophys. **80**, 13 (1979).
17. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Y. N. Parijskij, et al., Astronomy Letters **32**, 433 (2006).
18. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, Astrophysical Bulletin **64**, 123 (2009).
19. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, Astronomy Letters **36**, 7 (2010).
20. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005).
21. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Data Sci. J. **8**, 34 (2009).
22. O. V. Verkhodanov, H. Andernach, and N. V. Verkhodanova, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **49**, 53 (2000).
23. O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, and H. Andernach, Astrophysical Bulletin **64**, 72 (2009).
24. O. V. Verkhodanov, in *Proc. 27th Radio Astron. Conf. on Problems of Modern Radio Astronomy, St.-Petersburg, 1997* (Inst. Appl. Astronomy RAS, St.-Petersburg, 1997), Vol. 1, p. 322 [in Russian].
25. R. H. Becker, R. L. White, and D. J. Helfand, Astrophys. J. **450**, 559 (1995).
26. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., Astrophys. J. Suppl. **182**, 543 (2009).
27. E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., Astron. and Astrophys. **495**, 691 (2009).
28. R. Y. Udovitskiy, Y. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, et al., Astrophysical Bulletin **71**, 496 (2016).
29. O. V. Verkhodanov, ASP Conf. Ser. **125**, 46 (1997).
30. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).

ВОСПОМИНАНИЯ

Коллектив САО РАН
"Троицкий вариант. Наука", 2020, №301, с. 12

Памяти Олега Васильевича Верходанова (17.03.1965–05.04.2020)

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук с прискорбием сообщает: 5 апреля 2020 года скоропостижно на 56-м году жизни от сердечного приступа оборвалась жизнь известного радиоастронома, докт. физ.-мат. наук Олега Васильевича Верходанова.

Олег Верходанов работал в обсерватории более 30 лет и занимал активную жизненную позицию. Это был блестящий ученый и популяризатор науки — систематически читал лекции студентам и школьникам, организовывал школы и конференции, успешно готовил аспирантов и выводил их в самостоятельную научную жизнь. Олег был одним из основных организаторов астрофизических школ на базе САО РАН и в 2016–2019 годах — астрофизической школы «Траектория».

За время работы в обсерватории им было опубликовано более 200 научных работ по актуальным направлениям наблюдательной радиоастрономии и космологии. Автор и научный редактор нескольких книг, научных и научно-популярных статей в области исследования радиогалактик, реликтового излучения и радиоастрономии. В последние годы Олег Верходанов проводил более 50 публичных лекций и выступлений по актуальным темам современной астрономии ежегодно.

Его вклад в радиоастрономические исследования неоценим. Наблюдатель, теоретик, математик, программист и педагог. Им было создано несколько уникальных программных пакетов для работы с радиоастрономическими данными, которые эффективно используются астрономами-наблюдателями и теоретиками. При его непосредственном участии создана и развивается система поддержки астрофизических каталогов CATS, которая активно используется мировым научным астрономическим сообществом.

Олег Васильевич в 2008–2009 годах стал лауреатом программы «Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук РАН» Фонда поддержки отечественной науки, в 2010–2012 годах — лауреатом Фонда Дмитрия Зимина «Династия» по программе поддержки молодых физиков — докторов наук. В 2016 году Олег Васильевич стал победителем конкурса «Лучшие обзоры УФН 2016» с обзором «Космологические результаты космической миссии "Планк". Сравнение с данными экспериментов WMAP и BICEP2».

Его уход — большая потеря для родных и близких, друзей и коллег, учеников и слушателей. Однажды Олег сказал: «Все люди в детстве смотрят на звездное небо и восхищаются, но не все остаются. Я остался. . . » И это действительно так — он остался, и останется светлая память о нем в наших сердцах навсегда.

"Земля и Вселенная", 2020, №3.
© Издательство «Наука» 2020

Олег Васильевич Верходанов (17.03.1965 – 05.04.2020)

5 апреля 2020 г. из жизни ушел ведущий научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории РАН, автор нашего журнала Олег Верходанов.

О.В. Верходанов родился в Великом Новгороде, учился и закончил Ленинградский государственный университет в 1987 г., и во время учебы проявил себя не только как замечательный сту- дент и исследователь: в те годы он неизменно принимал участие в организации и проведении Праздника Весеннего равноденствия — посвящении первокурсников ЛГУ в астрономы.

После окончания ЛГУ и до последних своих дней Олег работал в Специальной астрофизической обсерватории РАН. Его профессиональные качества, способность и готовность разобраться в любой проблеме и неподражаемая манера общения заслуженно снискали ему славу замечательного коллеги и интересного собеседника далеко за пределами обсерватории, да и России. Он сделал очень многое для того, чтобы данные, получаемые на ведущих телескопах страны, стали доступны международной астрономической общественности.

Олег неизменно пользовался уважением и любо-

вью студентов, а его лекции вызывали глубочайший инте- рес. О.В. Верходанов был признанным популяризатором науки. Его статьи, в частности, неизменно публиковались в научно-популярном журнале “Земля и Вселенная” – две, как получилось, последние были опубликованы в №№1 и 2, 2020 г. Популярные лекции, размещенные в сети Интернет, пользуются большим вниманием аудитории.

Олег подкупал собеседника умением легко и не без шутки объяснить любую запутанную проблему – касалось ли дело космологии в частности или астрономии вообще.

Он ушел от нас в самом расцвете своей человеческой и научной жизни. Теперь, к сожалению, многие его работы так никогда и не будут завершены. Нам будет очень его не хватать.

Коллектив Фонда некоммерческих инициатива “Траектория” и ученики Астрофизической школы “Траектория” им. О.В. Верходанова

Воспоминания об Олеге Верходанове

Олег Верходанов был не только прекрасным ученым, но и блестящим популяризатором. Его имя известно далеко за пределами академического сообщества. Он мог собирать целые залы слушателей своих научпоп лекций, а количество просмотров различных видеозаписей его выступлений переваливает за десятки тысяч. Нам кажется, что Олег Васильевич видел своей личной миссией не только через науку, но и через просвещение (как взрослых, так и детей) повышать качество жизни в стране, тем самым, влиять на ее будущее.

С 2016 года он стал соорганизатором, научным руководителем и идеологом Астрофизической школы “Траектория” (АФШ) – трехлетнего образовательного проекта для школьников, призванного помочь старшеклассникам поддерживать и развивать интерес к научной деятельности и расширять их знания в области астрономии и астрофизики. Можно сказать, что Олег Васильевич стал для Фонда “Траектория” не только научным руководителем, соорганизатором и лектором, но и большим другом. Он с энтузиазмом воспринял запуск проекта Астрофизической школы и сразу же предложил в качестве места проведения школы САО РАН. Его энергия и вовлеченность, готовность делиться со школьниками своими знаниями подкупали. Он умел доносить сложные вещи, с одной стороны ярко, с другой стороны, простым и понятным языком.

Астрофизическая школа имела своей задачей не только профориентацию и формирование новых кадров для отечественной науки, но и создание сообщества по интересам, где все участники были равны. Были придуманы новые “правила игры”: открытость, возможность прямого диалога и взаимодействия вне учебных занятий, обоюдное уважение. Олегу Васильевичу было важно наблюдать динамику развития детей, смотреть, как те знания, которые педагоги вкладывают в них, “пропадают не зря”. Делясь своими впечатлениями о школе, он говорил, что студенты, развиваясь и меняясь, в том числе поднимают и уровень преподавателей - “ведь мы тоже у них учимся”.

Действительно, все заложенное было не зря. Ниже хотим привести воспоминания бывших “астрошкольников”:

Выпускник первого набора, тьютор АФШ, студент ГАИШ МГУ, Артем Запорожец:

“Мы познакомились с Олегом Васильевичем на его лекциях на Астрофизической школе, которая проходила в САО РАН в 2016 году. Через несколько лет он стал моим научным руководителем и для меня это стало первым настоящим опытом проведения исследований, изучения каталогов и анализа данных в них. Мы написали научную работу по поиску радиогалактик и достаточно много работали вместе очно и удалённо. Смотря с высоты поздних курсов университета, я могу сказать, что это был лучший опыт, который у меня мог бы быть – Олег Васильевич рассказывал и показывал на своём примере, как нужно заниматься исследованиями и обработкой данных, показывал приёмы и помогал с вопросами. Мне кажется, что это дало мне огромный толчок вперёд для дальнейших занятий наукой и в целом для последующего обучения в университете.”

Выпускница первого набора АФШ, выпускница РТУ МИРЭА, Александра Ороновская:

“Есть такие люди, которые вдохновляют своим внутренним миром и помогают мечтам исполняться даже тогда, когда кажется, что это невозможно. Олег Верходанов был таким человеком. Могу смело сказать, что знакомство с Олегом Васильевичем было одним из самых значимых событий в моей жизни. До первого совместного проекта мне было жутко страшно от того, что я не понимала, чем хочу заниматься в будущем и что мне действительно интересно. Олег Васильевич вдохновил меня. Именно во время научной работы с ним, я поняла, куда хочу расти дальше. Я до сих пор с улыбкой вспоминаю его лекции в САО, захватывающую экскурсию на РАТАН, работу в его кабинете с чудесным зелёным аквариумом у окошка и неформальные беседы о реликтовом излучении и

фракталах. Я искренне благодарна ему за веру в меня и в каждый проект, что мы делали вместе, за его чуткость и внимательность к каждой идее, за открытость и понимание."

С 2020 года Астрофизическая школа носит имя Олега Васильевича Верходанова. Он был одной из "несущих стен" АФШ. Его уход – огромная потеря не только для проекта в целом, но и для всех его участников. И речь идет не о научной составляющей, но и о том человеческом тепле и участии, о его самозабвенной увлеченности и любви общему делу. Для каждого у него была припасена персональная "фишка": кодовая фраза, фирменное приветствие, состоящее из замысловатого рукопожатия или нескольких танцевальных па, воспоминание...

АФШ - это очень большая, но не единственная область нашего взаимодействия. Олег Васильевич регулярно принимал участие и в других мероприятиях фонда: был научным редактором нескольких книг, работал с учителями, отвечал на вопросы зрителей нашего youtube-канала. Его научно-популярные лекции, которые наш фонд устраивал в разных городах, всегда имели ошеломительный успех. После лекций люди всегда окружали Олега и засыпали вопросами. Иногда даже приходилось его спасать и уводить из толпы вопрошающих.

Говоря об Олеге, как о друге и человеке, нельзя обойти стороной его способность внимательно слушать и растворяться в собеседнике. Он готов был спорить, рассуждать, устраивать дебаты, но всегда это было по-доброму, аргументированно и с бесконечным уважением к собеседнику. К нему можно было обратиться с любым, даже самым глупым вопросом. На любую просьбу он старался ответить, помочь, и часто обсуждение задачи превращалось в брейн-шторм с шутками и чаем. Казалось, что он знает что-то, до чего нам, смертным, еще далеко. С большой теплотой мы вспоминаем посиделки у него на кухне. Это всегда было весело, интеллектуально и трогательно.

Штерн Борис Евгеньевич
Д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИЯИ РАН,
главный редактор газеты
"Троицкий вариант – наука"

Я познакомился с Олегом в 2006 году на защите докторской в ФИАНе. У меня была защита, у Олега – предзащита, причем вторичная – его отрезали в родном институте (САО), он подал заявление в совет ФИАН, где все прошло на ура. Его докторская была связана с обработкой данных микроволновой обсерватории WMAP – самых "горячих" космологических данных того времени. Я уже не помню, почему ее не приняли в САО, но мне это показалось весьма странным.

С тех пор мы виделись не часто, но совершенно явно ощущали себя друзьями. Я приезжал в САО лишь раз – в 2009 году. Олег водил меня по местным тропам, пригласил домой, где мы хорошо посидели. Потом он регулярно приезжал к нам на Оку под Пущино. Обычно это было весной, когда в Пущино проходила весенняя конференция по астрофизике.

Олег останавливался у нас. Мы обязательно парились в бане и прыгали в ледяную воду уличного бассейна, который в ту пору только что оттаивал. Он обычно привозил сушеные грибы, которые собирал в горах и местное спиртное – в этом отношении Олег был патриотом.

Встречаясь живьем, мы не могли наговориться – и про науку, и про жизнь, со всеми ее перипетиями – мы были единомышленниками, понимающими друг друга с полуслова, и это отлично поддерживало, даже когда находились далеко друг от друга.

Наши научные интересы различались, хотя и были не столь далеки: Олег занимался космологией, я – астрофизикой высоких энергий. Зато наши усилия в области просветительской деятельности совпадали и по направлению, и по стилю. Я, будучи главредом "Троицкого варианта", регулярно обращался к Олегу за комментариями по поводу постоянно всплывающих в прессе опровержений современной космологии. Олег отвечал немедленно, ясно и с юмором. Иногда комментарии выливались в целые статьи. За его авторством, например, статья "О темной энергии замолвите слово" – по поводу недобросовестных попыток пересмотреть устоявшиеся представления о динамике Вселенной, или о так называемом "Хаббловском трении" – о противоречии между измерениями постоянной Хаббла по реликтовому излучению и по сверхновым. Если речь шла о прояснении каких-либо противоречий или сенсационных заявлений по части космологии, я без колебаний обращался именно к Олегу, поскольку он сам очень много занимался обработкой космологических данных, прекрасно знал всю кухню и видел все белые нитки в претензиях на громкие результаты.

Года полтора назад мы обсуждали с Валерием Рубаковым некую статью, претендующую на сенсацию, что-то по поводу очередного "закрытия" темной энергии. И посетовали, что лучше всех это прокомментировал бы Олег, да уже не спросишь... А теперь и у Рубакова уже ничего не спросишь...

Олега нет, но остались статьи, книги, видеоза-

писи лекций, причем в живом виде – их смотрят и комментируют. Я в восторге от его популярных лекций по космологии, особенно, последних. В них все – и ясность, и глубина, и харизма. Космология вообще говоря, сложная для восприятия – но Олег заражал всех: число просмотров одной из его последних лекций перевалило за миллион и продолжает расти.

Дорошкевич Андрей Георгиевич
Д.ф.-м.н, АКЦ ФИАН

Олег Верходанов занимался наблюдательной космологией, специальностью в России достаточно редкой, которая предполагает наблюдения очень далеких и слабых объектов. Он неожиданно появился в нашей группе в Копенгагене в начале века и как то сразу включился в наши работы по анализу наблюдений флуктуаций температуры и поляризации реликтового излучения. Большой опыт работы с различными наблюдениями помог ему быстро разобраться в наших задачах и помочь в создании кода GLESP (Gauss – Legandre Sky Pixelisation) (2005), используемого и сейчас при анализе больших массивов наблюдательных данных.

Позже, уже в России, наша совместная работа с наблюдениями поляризации флуктуаций реликтового излучения продолжалась и привела к созданию более сложного кода GLESP–pol (2011). Третьей нашей совместной работой была статья, в которой было подробно изучены наблюдения WMAP флуктуаций реликтового излучения. К этому времени накопилось пять вопросов к результатам WMAP, и среди них "ось дьявола" – корреляция квадрупольной и октупольной компонент спектра флуктуаций, и сильное различие – в три раза – наблюдаемой амплитуды квадруполя и ее теоретического ожидания. Авторы объясняли эти эффекты случайной флуктуацией, но мы показали, что авторская интерпретация не однозначна и зависит от метода обработки результатов. Меняя методы обработки, мы сильно меняли результаты. Эти выводы относятся к обработке всех подобных наблюдений в больших масштабах.

Олег много времени уделял работе со школьниками, с фондами "Династия" и "Траектория", постоянно читал популярные лекции, проводил летние школы и др. Он был исключительно популярным и постоянно занятым человеком, И, тем не менее, он всегда с энтузиазмом принимал участие в наших совместных исследованиях. Как раз сейчас я собирался привлечь его к моим новым работам с каталогами галактик и скоплений галактик, но, к сожалению, не успел ... Совместная работа с Олегом оставила самые хорошие воспоминания. Он был толковым ученым, хорошим соавтором, активным популяризатором, и просто хорошим человеком...

Мамий Дауд Казбекович
К.ф.-м.н., ректор ФГБОУ ВО "Адыгейский государственный университет"

5 апреля 2020 г. ушел из жизни известный российский астрофизик Олег Васильевич Верходанов. Олег был моим другом.

Мы познакомились в январе 2014 г. на конференции Фонда "Династия". Знакомство было мимолетным, но меня удивило и порадовало, что в 220 км от Майкопа в Карачаево-Черкессии, в Специальной астрофизической обсерватории РАН работает человек, популяризирующий астрофизику. В июне 2014 г. я пригласил Олега на международный проект для школьников "Наука будущего", который мы проводили в ВДЦ "Орленок". С этого началось наше знакомство, которое переросло в настоящую дружбу. Обычно в зрелом возрасте такое бывает редко. Мы были ровесниками.

Олег учился на мат-мехе СПбГУ, я на мех-мате МГУ. Росли, взрослели и формировались примерно в одних условиях в эпоху 80-х. Оба увлеченно занимались настольным теннисом. Я вернулся по окончании учебы в Адыгею, он переехал в Карачаево-Черкессию. Сходный взгляд на многие вещи, сходные этические ценности. Возникла, как сейчас принято говорить, "химия".

Помню свое впечатление от первой его лекции об эволюции Вселенной. Она меня совершенно потрясла. Ученый с горящими глазами, действующий астрофизик рассказывал об исследованиях Вселенной так, что захватывало дух. Далеко не все слушателям было понятно, но это было неважно, так как в процессе лекции возникало ощущение пульса современной науки, вызывавшее настоящий интерес к астрофизике. И именно по этой причине вокруг него всегда собиралась молодежь: школьники, студенты, аспиранты. Помню в 2016 г. в Образовательном центре "Сириус" во время математической смены мы придумали новый формат: чаепитие с ученым. И вечером ребята, предложившие наиболее интересные вопросы по астрономии, получили возможность пообщаться с Олегом Васильевичем за чашкой чая. Возник вопрос о "кротовых норах". Пытаясь проиллюстрировать свое объяснение, Олег взял зефир, выгрыз его часть и начал объяснять дальше, используя подручную модель. Когда наступило время отбоя и ребят попросили пойти в комнаты, группка во главе с Олегом

Васильевичем вышла в коридор и снова остановилась, поглощенная обсуждением. Когда через 15 минут к ним подошел дежурный воспитатель, чтобы все же отправить детей спать, то и он растворился в той беседе, которую вели увлеченно ребята и Олег. Такое случалось часто. Все эти годы Олег Верходанов активно поддерживал проекты, которые мы организовывали или в проведении которых принимали участие: летняя математическая школа в Адыгее, астрономический фестиваль в Адыгее, математические смены в ВДЦ "Орленок", ноябрьская математическая программа в ОЦ "Сириус", научные конференции в Адыгейском госуниверситете. Олег активно содействовал развитию сотрудничества между САО РАН и АГУ. У нас были большие планы...

Ярким проектом стала Астрофизическая школа Фонда "Траектория" – уникальный проект, который был запущен в 2016 году. Я, как член Совета Фонда и руководитель математической программы АФШ, Олег, как один из руководителей программы АФШ, очень тесно сотрудничали все эти годы. Весенние и летние школы в различных обсерваториях в России и за рубежом: САО, Коуровская обсерватория УрФУ, обсерватория в Пущино, обсерватория в Турку сделали Астрофизическую школу уникальной. Первый ее выпуск – 28 ребят – поступили в ведущие вузы, но главное, было отрадно наблюдать и осознавать насколько они изменились за три года от общения с такими людьми как Олег.

11-12 июля в Адыгее проходит пятый астрономический фестиваль.

Рустам Давудович Дагкесаманский
Д.ф.-м.н., Пущинская Радиоастрономическая Обсерватория АКЦ ФИАН

Большой ученый, бескорыстный и надежный друг и товарищ

Не могу припомнить, когда и при каких обстоятельствах мне довелось встретиться с Олегом в первый раз. С большой вероятностью это случилось уже вскоре после того, как он по окончании и мне родного математико-механического факультета Ленинградского университета начал работать в Специальной астрофизической обсерватории под руководством Юрия Николаевича Парийского. Возможно, что наше первое знакомство произошло в 1991 году на 23-й радиоастрономической конференции в Ашхабаде, а быть может даже на год-два раньше на одной из ежегодных конференций по внегалактической астрономии в г. Пущино Московской области. В 1990-е годы Олег становится постоянным и одним из самых активных участников этих Пущинских конференций, а также Всероссийских радиоастрономических конференций. Судя по тематике научных сообщений, в которых он был автором или одним из соавторов, его интересовали статистические исследования характеристик внегалактических радиоисточников, проблемы их каталогизации и взаимного отождествления объектов различных каталогов. После защиты в 1993 году кандидатской диссертации, резко возрастает его публикационная активность и число сообщений на конференциях, в которых он выступает в качестве автора или одного из ведущих соавторов. Так, в списке докладов и сообщений, представленных на XXVI Всероссийской радиоастрономической конференции в 1995 году, его фамилия встречается в авторском списке 11 раз, а на следующей XXVII такой же конференции в 1997 году – 14 раз! Быстро растет и его публикационная активность. В своих статьях, как и в докладах на конференциях, Олег Васильевич представляет результаты многочисленных обзоров, выполнявшихся в те годы на радиотелескопе РАТАН-600.

Уже в 1990-е годы Олег Васильевич становится хорошо известным специалистом в области внегалактической астрономии и практически постоянным участником упомянутых выше Пущинских конференций. Именно благодаря этим ежегодным конференциям у нас с Олегом установились довольно тесные контакты, которые со временем переросли в дружбу. В 1998 году на очередную такую конференцию Олег приехал не только со своей женой и коллегой Натальей, работающей в том же радиоастрономическом секторе САО РАН, но и с их шестилетней дочерью. Этот визит семьи Верходановых в Пущино мне был очень приятен и хорошо запомнился. Дело в том, что с Натальей я познакомился даже раньше, чем Олег. Будучи студенткой Казанского университета, она проходила свою преддипломную практику в нашей Пущинской радиоастрономической обсерватории, и я был руководителем этой ее практики, а затем и дипломной работы. Позднее, приезжая в Нижний Архыз для участия в заседаниях Комиссии по тематике больших телескопов, членом которой я состоял в течение какого-то времени, я не раз с большим удовольствием проводил вечера в этой дружной компании.

С 2002 по 2004 г. Олег Васильевич работает приглашенным профессором в Центре Теоретической Астрофизики (ЦТА), расположенном в Копенгагене (Дания). Здесь его привлекли к анализу данных, полученных с космического аппарата WMAP. Работая совместно с отечественными теоретиками А.Г. Дорошкевичем, И.Д. Новиковым и другими, Олег активно содействовал разработке корректной пикселизации данных WMAP, что позволило

устранить существенные систематические ошибки, которые заметно искажали пространственное распределение реликтового фона. Это был большой успех отечественных астрофизиков.

В феврале 2004 г. я получил письмо от диссертационного совета САО РАН с приглашением выступить в качестве оппонента на защите Олегом диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Поскольку я был неплохо знаком с большей частью работ Олега Васильевича, я согласился, и внимательно просмотрев очень большую по объему, и притом неплохо написанную диссертацию, подготовил свой положительный отзыв на работу в целом.

Когда я приехал в Нижний Архыз, меня встретил очень взволнованный Олег. Оказалось, что коллеги из различных подразделений обсерватории предупреждают его о том, что небольшая группа во главе с одним из ведущих сотрудников обходит подразделения обсерватории и активно призывает к голосованию против присуждения Олегу ученой степени доктора физико-математических наук. Олег сказал мне, что поделился этой информацией с Юрием Николаевичем Парийским, которого считал своим учителем, и который, можно сказать, был постоянным членом этого Диссертационного совета. Юрий Николаевич сказал, что и до него доходит такая информация, но это его не пугает, так как он уверен в положительном результате тайного голосования по диссертации, которую высоко оценивают все оппоненты. А то, что сама защита будет выглядеть боевой – это очень хорошо.

И вот началось это нетривиальное заседание Диссертационного совета. Секретарь Совета сообщил, что в Совет поступили все необходимые документы, зачитал некоторые из них и предоставил слово соискателю. Олег, несмотря на волнение, неплохо изложил основное содержание диссертации и представил основные результаты работы, после чего ответил на несколько заданных ему вопросов. Затем были заслушаны сугубо положительные отзывы трех оппонентов и столь же положительный отзыв ведущей организации, а также ответное выступление Олега, в котором он поблагодарил оппонентов за их работу и согласился с большинством высказанных в их отзывах небольших замечаний. Наконец, секретарь Совета перечислил около десяти положительных отзывов на автореферат диссертации, поступившие в адрес Диссовета. После этого была объявлена общая дискуссия. Первым взял слово Ю.Н. Парийский. В своем выступлении он особо остановился на некоторых, на его взгляд наиболее значительных результатах работы Олега, отметил высокую публикационную активность соискателя и широкую известность его работ в стране и за рубежом. Подводя итог своей относительно короткой речи, он, как положено, сказал, что совершенно уверен в том, что соискатель вполне заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук. Казалось, что заседание приближается к завершению и уже ничто не может изменить в целом положительного настроя присутствующих. Однако, именно в этот момент инициативу захватила та самая группа, что так тщательно готовилась к этому заседанию совета. Один за другим вставали сотрудники обсерватории и, высказывая в большинстве случаев незначительные замечания, заканчивали свои очень краткие выступления заявлением, что не считают диссертацию удовлетворяющей необходимым требованиям. Среди выступающих в дискуссии были и некоторые ведущие научные сотрудники, возможно даже члены Диссертационного совета. Они тоже были весьма кратки, но при том чуть более аргументировано отмечали тот или иной с их точки зрения недостаток работы, и при этом, практически не затрудняя себя оценкой работы в целом, приходили к заключению, что диссертация не удовлетворяет должным требованиям.

Далее последовали выборы счетной комиссии, раздача бюллетеней для голосования, подсчет голосов и, наконец, объявление результатов голосования. Число голосов “ЗА” оказалось на один или два меньше необходимого для присуждения Олегу Верходанову ученой степени доктора физико-математических наук. И это несмотря на то, что все три официальных оппонента, утвержденных этим самым Диссертационным советом дали сугубо положительные отзывы на работу соискателя, и на то, что выбранная этим же советом ведущая организация признала, что соискатель заслуживает присуждения ему соответствующей ученой степени. Наконец, в деле соискателя, как всегда, присутствовало и сугубо положительное Заключение организации, где выполнялась диссертация, то есть Заключение Специальной астрофизической обсерватории, подписанное руководством обсерватории. В подготовке такого Заключения обычно принимает активное участие Ученый совет организации, а значит и те самые ведущие научные сотрудники Обсерватории, которые теперь не поддержали решение о присуждении Олегу Васильевичу ученой степени доктора физико-математических наук.

Мне трудно было представить, что творилось в этот момент в душе Олега, как он переживает такое решение Диссертационного совета. Конечно же, я проводил его домой, и мы посидели втроем с Наташей, переживая все случившееся. Просидев так с полчаса-час, мы с Олегом отправились успокаивать Юрия Николаевича Парийского. Юрий Николаевич был дома один и очень обра-

довался нашему приходу. Посидев некоторое время, перебирая в памяти все случившееся и пытаясь понять, как это могло произойти, мы решили определиться с тем, что делать дальше. Естественно стали рассматривать варианты, в какой другой диссертационный совет можно будет обратиться с просьбой, принять к рассмотрению работу Олега. Таких вариантов было несколько, и все они выглядели достаточно надежными.

Задумались мы и над тем, не стоит ли кому-то (быть может, кому-то из оппонентов) обратиться в Высшую Аттестационную Комиссию с просьбой при рассмотрении результатов злополучного заседания обратить внимание на то, что принятое решение Диссертационного совета противоречит мнениям всех оппонентов, ведущей организации и даже Заключению организации, где была выполнена работа. Но этот вариант был отклонен, поскольку он, во-первых, никак не мог отменить еще одно рассмотрение диссертации на другом диссертационном совете, а во-вторых, мог бы привести к роспуску Диссертационного совета САО РАН, а это очень осложнило бы процедуру рассмотрения диссертаций всех других молодых сотрудников САО РАН. Поэтому было решено набраться терпения и через год представить слегка измененную и дополненную новыми результатами работу к защите на другом диссертационном совете.

С трудом представляю, как складывались в дальнейшем отношения Олега с постановщиками и исполнителями ролей очень жестокого спектакля, к каковым я отношу заседание Диссертационного совета САО РАН, на котором рассматривалась его диссертация. Но в ходе моих редких визитов в САО РАН в последующие годы я отмечал, как мне казалось, очень теплое и внимательное отношение к Олегу большинства сотрудников обсерватории. Да и поведение самого Олега было, как мне казалось, максимально корректным. И вообще, о случившемся если и упоминалось в разговорах, то крайне редко, и никогда не доходило до серьезных обсуждений, тем более – осуждений кого-либо конкретно. Олег по-прежнему был активен, как в научной, так и в общественной жизни Обсерватории, являясь, в частности, одним из главных организаторов астрономических школ для старшеклассников, проходивших на базе САО РАН.

Спустя полтора года, после описанного выше заседания Диссертационного совета САО РАН, а именно 17 октября 2005 года Олег Васильевич блестяще защитил на Диссертационном совете АКЦ ФИАН практически ту же работу, слегка дополненную небольшим числом новых результатов, полученных за последние месяцы. На этой защите были уже другие три оппонента, другая ведущая организация и голосование на сей раз, насколько помню, было практически единогласным “ЗА” (возможно, один из членов Диссовета воздержался). Последовавшие за этой успешной защитой годы были для Олега Васильевича очень плодотворными. Исследования, в которых он принимал самое активное участие, включали отождествления декаметровых радиоисточников с объектами базы данных CATS (совместно с Сергеем Трушкиным, Хайнсом Андернахом и Натальей Верходановой), исследование структуры и физических параметров самых далеких радиогалактик, совершенствование процедуры пикселизации данных о реликтовом фоне миссии Planck и разработка космологических моделей, удовлетворяющих этим данным. Все эти исследования сопровождались многочисленными выступлениями на конференциях и публикациями статей в отечественных и зарубежных научных журналах. Здесь уместно упомянуть и прекрасную монографию “Радиогалактики и космология” (авторы О.В. Верходанов и Ю.Н. Парийский), опубликованную в 2009 году. Тем более, всех потрясло совершенно неожиданное известие о скоропостижной кончине Олега Васильевича в возрасте 55 лет, последовавшей в апреле 2020 года. Нет сомнения в том, что не только Специальная астрофизическая обсерватория РАН, но и все астрономическое сообщество понесло при этом тяжелую утрату – ушел из жизни наш выдающийся коллега, находящийся в самом расцвете творческих сил, совершенно бескорыстно отдававшийся служению науке и воспитанию молодых кадров. Нет никаких сомнений и в том, что научные труды Олега Васильевича еще долгие годы будут востребованы специалистами. Память об этом большом ученом и замечательном человеке навсегда останется в сердцах всех, кто его знал.

Бисноватый-Коган Геннадий Семенович
Профессор, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, член Ученого совета ИКИ РАН и Ученого совета Учебно-научного института гравитации и космологии.

Памяти Олега Верходанова

Олег Верходанов скончался скоропостижно от сердечного приступа 5 апреля 2020 года, в своей квартире в обсерватории САО на Кавказе, через 2,5 недели после своего 55-летия. Он был одним из наиболее талантливых и эрудированных ученых-радиоастрономов и космологов своего поколения. Кроме того, он был замечательным популяризатором науки, астрономии и космологии среди школьников, принимал активное участие как в чтении лекций, так и в организации Астрофизиче-

ских школ. Он казался веселым жизнерадостным человеком, был остроумным и благожелательным собеседником, готовым помочь коллеге в работе и ответить, по возможности, на все его вопросы. Я познакомился с Олегом в 2004 году в Копенгагене, где провел около двух месяцев по приглашению директора ТАС (Teoretical Astrophysical Center) И.Д. Новикова. Олег провел в ТАСе гораздо больше времени, работая над компьютерной программой по обработке данных наблюдений реликтового излучения, полученных на американском спутнике WMAP. Для написания столь сложной программы, связанной с обработкой огромных массивов данных, требовалось, наряду с фундаментальными знаниями в области радиоастрономии, умение обращаться с большими массивами данных (BIG DATA) на компьютере, знать операционную систему UNIX (LINUX), на основе которой создавались такие программы. Олег в совершенстве владел всеми тонкостями этой операционной системы, а также математическими методами, связанными с исследованием BIG DATA.

Мы подружились с Олегом сразу после моего приезда, несмотря на разницу в возрасте, мое теплое отношение к нему сохранялось до его безвременной кончины. Я работал в соседней с Олегом комнате и по нескольку раз в день обращался к нему относительно тонкостей использования системы UNIX, неизменно получая от него простое и понятное объяснение. Уверен, что без его помощи моя научная работа в Копенгагене было бы гораздо менее успешной. Мой день рождения в декабре 2004 года мы встретили вдвоем с Олегом в небольшом кафе где-то в центре города. До сих пор этот вечер вспоминается как один из самых памятных вечеров в моей жизни. Олег рассказывал о своей семье, и с особенной любовью говорил о своей дочке Василисе.

В те непростые годы поездки за рубеж очень помогали в материально, особенно, если экономить на еде. В этом отношении Олег был настоящим экстремистом. Он всегда отказывался идти обедать в соседнее кафе, и неизменно варил себе дешевые пакетики с лапшой, привезенные из дома. Он отмахивался, кода многие, включая меня, говорили ему о том, что очень неполезно ежедневно поглощать пищу такого рода. Видимо, желание сделать подарок жене и дочке было в нем много сильнее желания правильно питаться. Не могу исключить того, что, наряду с другими жизненными потрясениями, этот год "пакетиков с лапшой" внес свой вклад в его столь преждевременный уход из жизни.

Наша следующая встреча состоялась в обсерватории САО, где Олег постоянно работал, а я приехал для выступления на семинаре обсерватории по приглашению ее директора Ю.Ю. Балеги. За несколько дней пребывания в САО я побывал в гостях у Олега и познакомился с его дружной семьей. Мы вместе ходили по живописным окрестностям поселка Буково, где проживали астрономы обсерватории.

Как раз к этому времени Олег подготовил докторскую диссертацию, и делал доклад, кажется, на заседании ученого совета обсерватории, который должен был дать рекомендацию к его защите. Я представлял себе сложность и ценность для науки результатов, полученных Олегом, и был неприятно удивлен агрессивными нападками некоторых членов совета на его выступление, которые критиковали недочеты, на мой взгляд, не влияющие на очевидную важность и новизну представленных результатов. Через некоторое время после возвращения домой я узнал, что Олегу так и не дали защитить диссертацию в САО. Работы Олега высоко ценились среди радиоастрономов в Москве и Питере, поэтому справедливость вскоре восторжествовала, и он успешно защитил докторскую диссертацию на престижном ученом совете ФИАН.

Санников Степан Сергеевич
Руководитель Школы ЦПМ в Хамовниках (г. Москва), руководитель проектов по разработке естественно-научных курсов (ГАОУ ДПО ЦПМ (г. Москва))

Привет, девчонки! (с)

Олега Верходанова, к своему огромному сожалению, я знал по времени немного. Мы познакомились с ним во время организации первой Астрофизической школы фонда "Траектория" летом 2016 г. Собственно, тогда же я впервые приехал в САО. Уникальное место, уникальные люди.

Среди встречающих был Олег – панама на голове, майка из серии "Я люблю науку", шорты, сандалии и, естественно, прикольные носки. Простой в общении, обаятельный, с прекрасным чувством юмора, Олег произвёл на меня огромное впечатление. При всей своей простоте и весёлости Олег был большим интеллектуалом и глубоким философом. Его обширные академические знания, а главное, понимание и умение объяснить доступным языком сложные вещи всегда вызывали у меня восторг. Да не только у меня, у всех, кому довелось быть на его лекциях или встречах. Как человека, занимающегося образованием и работающего в школе, меня сразу посетила мысль о том, чтобы пригласить Олега с лекциями к школьникам. Олег с радостью соглашался на все приглашения. Было видно, когда он общался с ребятами, сколько задора у него самого в глазах, как он много и ярко мог рас-

сказать, как разгорался интерес у детей, его слушающих, и как он сам увлекался этим действом. Он стал большим другом нескольких московских школ после таких вот встреч. Невозможно переоценить своевременность и уникальность живого общения с человеком, занимающемся наукой для детей. Важно, что они слышат всё "из первых уст", что это не "сухая" лекция с изложением фактов, а именно разговор, диалог, возможность задать любой вопрос. Олег справлялся с этой задачей фантастически. Да, он мог что-то не договорить, слишком упростить, где-то схитрить, но не обмануть! Он мог на пальцах, без формул рассказать и показать, как проста и грандиозна Вселенная, в которой мы живём. А если и были на презентациях формулы, иногда даже сложные формулы для школьников, то он обыгрывал их так легко и элегантно, что становилось всё более-менее понятно. Олег излагал с юмором, с большим уважением к слушателям и к самой науке.

В 2019 году мы с командой единомышленников в московском Центре педагогического мастерства взялись за создание большого курса по астрономии с видео, с текстами, заданиями, методичками. Всё, как положено. Взялись за разработку программы, призвали на помощь экспертов. Конечно же, обратились в САО. Отозвались на нашу просьбу несколько коллег, среди которых был и Олег. Без его участия вряд ли мы могли бы целостно собрать блок, посвящённый эволюции Вселенной. Вариант программы с его правками до сих пор хранится у меня, напоминая мне о том, как надо было всё переделать. Олег согласился не только стать экспертом программы курса, но и снялся в нескольких видеороликах рубрики "Вопрос эксперту". Рассказывал он про РАТАН-600 и, конечно же, про своё любимое реликтовое излучение. Снимали прямо у РАТАНа в августе, было очень жарко, но Олег выдержал и Солнце, и светоотражатель, и камеру и, как всегда, был незабываем в своём рассказе. Именно это видео про реликтовое излучение мы опубликовали первым среди всех материалов нашего курса, спустя несколько дней после ухода Олега. И это было правильно.

Многие, наверное, могут подумать, что люди науки ничем кроме науки не занимаются. Но это не так. Как правило, всё совсем наоборот. Если человек талантлив, то он талантлив во всём, ну или во многом. Кто-то рисует, кто-то сочиняет хокку, а кто-то, как Олег, разводит рыб. Это ещё один эпизод, который меня восхищал – многие разводят рыб, но у Олега была прямо целая философия взаимоотношения с ними. Его друзья и коллеги помнят и про его "грибную" страсть. Он знал сезоны и места, отдельные грибницы и, конечно же, вел ежегодный учёт их собранного количества. Грибник-то – учёный. А потом пакетики с перемолотыми высушенными белыми грибами от Олега разъезжались по разным уголкам мира. Прибывали они вместе с Олегом и ко мне в Москву, когда он останавливался у нас дома. К грибам в придачу привозилось своё вишнёвое варенье и "Прасковейский коньяк". Олег, я и моя супруга садились на кухне и начинались долгие разговоры про жизнь, политику, науку, образование, искусство. С ним можно было говорить про всё, причём очень доверительно, по-доброму. Таких вечеров случилось немного, этим они и ценны. Мы их часто с супругой вспоминаем. Их нам очень не хватает.

Если при входе в помещение вне зависимости от присутствующих там, Олег всех приветствовал фразой "Привет, девчонки!", то на прощание у него, наверное, для каждого было что-то своё. Для нас с супругой это было – "Вы – хорошие". Олег, мы – хорошие до сих пор!

Ковалев Юрий Юрьевич
астрофизик, член корр. РАН
"Троицкий вариант. Наука", 2020, №301, с. 12

Познакомился я с Олегом году в 1984-м. Он стоял у подоконника гостиницы РАТАНа и спорил с моим папой о том, какой язык программирования лучше, С или Fortran. Жуткий трудоголик, качество работы которого полноценно осознаешь спустя годы. Его давние программы, помогающие с наблюдениями на РАТАНе, до сих пор успешно работают у меня на компьютере.

Без рожденной Олегом с коллегами базы данных CATS просто не могу представить наших исследований активных галактик в последние лет двадцать. У многих стоит на полке книга Олега, написанная в соавторстве с Ю.Н. Парийским "Радиогалактики и космология". Пытливый ум позволял ему получать большое удовольствие от копания в данных WMAP, а нам – от его рассказов о негаусовости карт реликта. И всем известен его талант – говорить простыми словами об очень сложном, восхищаясь красотой науки.

У меня в офисе глядят на Москву из окна два странных и сильных растения – мои самые любимые. Оба выросли из небольших кусочков, бережно переданных Олегом. А совсем недавно мы вместе с ним глядели на уже выросших участников первой школы по астрофизике фонда "Траектория". Такие же сильные, крепко стоящие на ногах благодаря его энергии и любви.

И сейчас продолжение его жизни в школах "Траектории" становится особенно значимым и радостным. Олег нес свет, оптимизм и силу. Олег – один

из тех редких людей, рядом с которыми хотелось улыбаться. Без причины. Просто так.

Темирова Аделина Всеволодовна
К.ф.-м.н., САО РАН

Вспоминая Олега

Я познакомилась с Олегом, когда он в начале 1987 г. пришел в отдел радиоастрономии в Пулково на преддипломную практику, заканчивая математико-механический факультет Ленинградского государственного университета. Его руководителем стала Наталья Сергеевна Соболева, блестящий методист, занимающаяся исследованием радиогалактик на БПР (Большой Пулковский радиотелескоп) и на радиотелескопе РАТАН-600. Первое впечатление, которое Олег производил: любознательный, восторженный, очень открытый юноша. Группа Н.С. Соболевой в это время занималась обработкой записей, полученных при глубоких обзорах избранных площадок неба с помощью радиотелескопа РАТАН-600. Ему предложили разработать программу сглаживания полученных сканов диаграммой направленности радиотелескопа, что он сумел быстро реализовать. В дальнейшем он стал основным разработчиком программного обеспечения для анализа наблюдательных данных радиотелескопа РАТАН-600. Руководителем отдела был член-корреспондент РАН Парийский Ю.Н., который активно проводил высокоточные наблюдения для решения проблем космологии и являлся инициатором создания программы "БОЛЬШОЕ ТРИО" (сопоставление данных, полученных радиотелескопами РАТАН-600 и VLA (НРАО, США), и оптическое отождествление источников с помощью 6-м телескопа БТА). Олег стал активным участником этой программы по исследованию и поиску далеких радиогалактик типа FRII с ультра крутыми спектрами и анализировал источники RC (RATAN Cold) каталога, полученного в рамках программы.

В феврале 1995 г. мы с Олегом по приглашению известного американского радиоастронома, профессора Бернарда Берка[1] прилетели в Бостон для работы на кафедре астрофизики Массачусетского Технологического института (MIT) для анализа радиоисточников RC каталога и сравнения их с данными, полученными на различных американских телескопах. Мы жили в доме Б. Берка в Лексингтоне, городе, положившем начало борьбы за независимость страны, в получасе езды на машине от Бостона. Это было время, когда русских специалистов в MIT было мало и поэтому к нам относились с повышенным интересом и очень доброжелательно, постоянно расспрашивали о наших впечатлениях об Америке.

Нас представили на ученом совете института, приглашали на семинары в Гарвардский университет. Мы также делали доклады на семинарах кафедры. В MIT нам были доступны богатая библиотека и данные наблюдений на зарубежных телескопах. В выходные дни Б. Берк возил нас по окрестностям Бостона, к океану (Salem, Newburyport, центр кораблестроения, "clipper ships"). В Бостоне мы посетили знаменитый музей изящных искусств, где в то время была открыта выставка импрессионистов, собранная со всей Америки. Это побудило нас купить прекрасные альбомы импрессионистов. Я вспоминаю, что Олег был очень доволен, представляя радость своей жены Наташи (он был прекрасным семьянином). В марте профессор Берк договорился с нашим партнером и соавтором по проекту "БОЛЬШОЕ ТРИО", ведущим сотрудником VLA подразделения НРАО – Миллером Госсом о посещении нами обсерватории и антенны VLA. Так мы прилетели в Альбукерк (штат Нью Мехико), откуда нас отвезли в Сокорро с посещением. радиоинтерферометра VLA (27x25м), расположенного в сухой пустынной местности в 80 км от Сокорро. Именно с его помощью были получены с высоким разрешением изображения избранных радиоисточников с крутыми спектрами RC каталога, представленных в книге О.В. Верходанова, Ю.Н.Парийского "Радиогалактики и Космология" (атлас радиогалактик, 2009). Это позволило начать спектроскопию объектов с помощью 6-м телескопа (БТА). Так, с участием Олега была обнаружена далекая радиогалактика RC J0311+0507, zsp=4.514.

В обсерватории мы жили в гостевом доме, оформленном в кантри стиле (эта территория когда-то принадлежала индейцам пуебло). Заметен был более низкий уровень жизни населения по сравнению с Восточным побережьем. Нас гостеприимно принимал Миллер Госс в своем доме, знакомил с членами его семьи. Вернувшись в Бостон, мы 19.03.1995 г. прилетели в Петербург. У меня, как и у Олега, остались самые теплые воспоминания о нашей командировке. Мы были бесконечно благодарны Б. Берку за столь радушный прием и оказанное нам внимание. В 2013 г. в Петербург, проездом в Москву на совещание по "RadioAstron", прилетел Б.Берк с женой. К сожалению, Олега в это время не было в городе, но мы вспоминали его с большой теплотой. Бернарда Берка не стало в 2018 г., Олега через 2 года, очень трудно с этим смириться. Поздравляя его с днем рождения, я написала ему, что у него очень усталый вид, надо больше отдыхать, но увы...

[1] https://rahist.nrao.edu/burke_bio-memoir.shtml

Хабибуллина Маргарита Леруновна
К.ф.-м.н., САО РАН

В жизни каждого из нас бывают моменты, которые меняют нашу жизнь и навсегда остаются в памяти. Одним таким моментом был летний день 2006 года.

В 256 комнату лабораторного корпуса РАТАН-600 вошел мужчина с искорками в глазах. “Здравствуйте, я Олег,” – представился он и сразу поймал мое внимание своим бесконечным энтузиазмом и способностью рассказывать о сложнейших вещах так, будто они были самой увлекательной историей.

Олег мог часами говорить о радиогалактиках, о расширении Вселенной и о смысле нашего существования в этом бескрайнем пространстве. Он шутил, задавал вопросы и его внимание к миру вокруг нас было очень заразительно! Я влюбилась в его страсть к науке и способность делиться ею с другими.

К своему сожалению, я узнала, что он не берет аспирантов. И вернулась в Казань, чтобы закончить диплом. Дни превратились в недели, недели в месяцы... И вот, однажды, просматривая темы диссертаций на следующий год на сайте САО, мой взгляд упал на имя Олега. Без момента колебаний я написала ему. И к моему удивлению и радости, он сразу согласился. Этот момент стал началом моего научного путешествия под его руководством.

Работа с Олегом была невероятно интересной, хотя порой и приходилось посидеть допоздна. Я помню мою первую неделю в качестве аспирантки, когда Олег предложил подготовить доклад на совершенно новую для меня тему к конференции, которая начиналась через неделю. Это был своего рода вызов. Я знала только то, что тема была связана с радиогалактиками, а что именно нужно сделать и получить, мне было совершенно не ясно. Но это и привлекало меня в науке – возможность разгадывать головоломки и узнавать новое. Приходилось консультироваться с Олегом, задавать ему множество вопросов и долго обсуждать получившиеся выводы. Он всегда был готов помочь и направить меня в нужную сторону. Это было невероятно насыщенное время, когда я сутками сидела в лаборатории и работала над докладом. Но мы справились, и доклад, а впоследствии и статья, были готовы.

Олег обладал удивительным даром – он мог делиться знаниями и страстью к науке с такой легкостью и вдохновением, что все вокруг не могли не заразиться его энтузиазмом. Он всегда шутил и умел видеть положительные стороны во всем, даже когда наши исследования не давали ожидаемых результатов. “Отрицательный результат – тоже результат,” – говорил он. Всегда чувствовалась его поддержка и внимание.

Мне повезло иметь возможность работать с таким человеком. Он внес огромный вклад в науку. Его яркий ум, доброта и юмор навсегда останутся в сердцах тех, кто его знал. Олег ушел? Нет. Он здесь.

Гуляя по Буково или РАТАНу, посмотрите внимательно вокруг, и вы обязательно его увидите.

Найден Ярослав Владимирович
К.ф.-м.н.

Олег Васильевич Верходанов, выдающийся ученый и удивительный человек, ушёл из жизни 5 апреля 2020 года, оставив нам не только внушительное наследие в области космологии, но и тонны воспоминаний, которые молодые умы продолжают хранить как ценное сокровище.

Я впервые встретился с Олегом Васильевичем на производственной практике в Специальной астрофизической обсерватории (САО) летом 2008 или 2009 года. Его бурное увлечение наукой, неисчерпаемый поток идей и бесподобная эрудиция сразу завладели моим вниманием. Такой интерес к любому объекту исследования, будь то мироздание или анизотропия реликтового излучения, стало катализатором для моего стремления учиться у него и работать с ним.

Работа с Олегом Васильевичем была похожа на поездку на поезде, следующем прямо к Луне и далее. Наши сессии анализа данных всегда были наполнены новыми идеями и привлекали данные из свежих научных работ со всего мира. Он написал сотни статей, каждая из которых является вкладом в основополагающие вопросы космологии, что безусловно подчеркивает его роль в этой науке.

Впечатления о Верходанове Олеге Васильевиче пронизаны не только замечательными научными встречами, но и особыми моментами, которые вырываются из контекста строгой научной работы. Довольно символично вспомнить нашу поездку в Черкесск, когда, казалось бы, ни к чему не привязанная беседа о зоологической классификации галактик развернулась прямо на улицах города. Это было знаковым, это был его стиль: в нас – в его учениках Верходанов поселял энтузиазм к науке, где бы ни проходила встреча. Он мгновенно смешивал идеи, открывая нам новые горизонты.

Но что действительно отличало Верходанова, это его умение делиться знаниями. Он имел способность объяснить сложнейшие факты простым

и понятным языком. Вспоминая его лекции для школьников, я удивляюсь, как он мог так умело и доступно представить концепции современной космологии даже для учащихся 6-7 класса.

Различные встречи Олега Васильевича часто украшали внезапные моменты юмора. В один из таких дней, когда мы пришли на обсуждение, он попросил налить воду в кружку вместо чая. На наш удивленный вопрос он ответил, что его кружка содержит радионуклеиды, которые впитывают прошлые заварки и превращают воду в чай. Мы даже не сразу поняли, что это была шутка, так убедительно и научно он это представил!

Особенно хотелось бы подчеркнуть, как много времени Олег Васильевич уделял молодежи. Его демократичность, открытость в общении и способность уважать любой уровень знаний делали встречи с ним необычайно ценными. Он не избегал вопросов, даже самых сложных, и всегда стремился находить индивидуальный подход к каждому.

Хотя я выбрал себе иной путь, все научные навыки, которые я усвоил от Верходанова, продолжают служить мне, я использую их в своей жизни. Мои воспоминания об Олеге Васильевиче остаются теплыми и живыми, вдохновляющими. Его жизнь для меня и многих других по-прежнему остается значимым примером на пути личного просветления и в научных исследованиях.

Бескин Григорий Меерович
д.ф.-м.н., САО РАН
К 50-летию О.В. Верходанова

...Ну, гора как гора,
Пусть зовут Яобань.
Все равно я не знаю,
Каков перевод.
А вот люди порой
Превосходят ее
И своей высотой,
И своей глубиной.
В символическом модусе,
Конечно же, не
В единицах длины,
Как покажется тем,
Кто к буквальности склонен
Во взглядах на мир...
Вот такой человек
Мне известен давно –
Тридцать лет пролетело,
Как встретил его...
Пятьдесят же всего с малым гаком (маком, таком?)
Годов во Вселенную нашу вонзает он взгляд.
Где-то там далеко, глаз впервые открыв,
Он уральские корни в себе сохранил,
В генотипе иль в соме они
От купцов и бандитов пошли –
Резкий смеш, ну, и хитрый топ-спин,
Нос прямой и, конечно же, лес,
Тех кудрявых волос, что похожи на рощи
В уральских горах –
Все оттуда, оттуда, от предков крутых...
Пятьдесят бурных лет
(с малым гаком, как я уж сказал,
и нельзя от поэта буквальности ждать,
он – поэт, не простой, как квадрат, астроном!),
Повторяю, полста бурных лет
Пронеслись, как фотон,
Что в дыру, как безумный, стремится упасть
И забыть все, что видел с рожденья в пути –
Как считает Хо-Кин –
Он для всех голоса, –
Палец в рот положить
Побоится ему
Даже самый последний кретин.
Пронесясь вместе с временем, он
(не Хо-Кин, а наш мудрый Вер-Хо)
Покорил сонмы гор символических, я
При женщинах вслух не скажу, из чего
Эти горы наука слепила для нас. Итак,
Как реликт, прилетел он сквозь годы сюда,
По дороге впитав весь его аромат,
И блестяще решив, не взирая на мат
Всех соперников грозных,
Первым кучу проблем,
Впрочем, как понималось всегда,
Бог опять приготовил их кучи нам всем...
Так лети и беги, и детей охмуряй,
Чтоб журавль к ним однажды домой прилетел,
Своим светом на лбу и лаптопом в руке
Все вокруг темноту разгоняй!

Ахметова Марина Камилевна
Преподаватель МАОУ СОШИ “СОлНЦе”,
поэтесса, художница, член Союза художников Татарстана

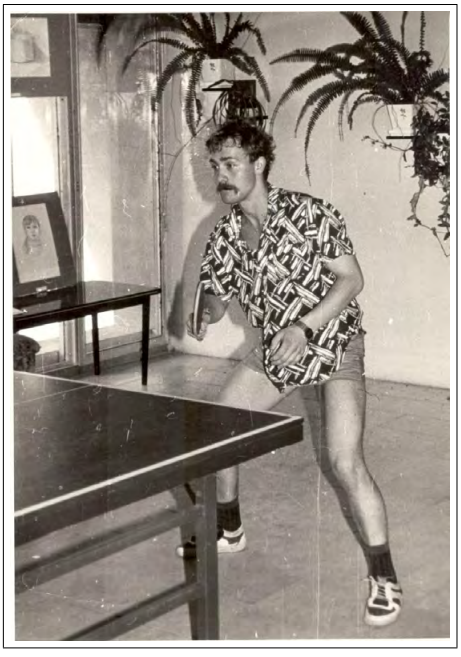
С верха данный Олег Верходанов
Верху отдан, очерчено О –
То ли форма сердечной раны,
То ли в звёздную даль окно.

Ветры космоса гонят парус
Челнока эволюций – держись!
Звездный свет стал теплей на градус.
Человечней ещё на жизнь.

ФОТОГРАФИИ

2018. Август. Астрофизическая школа в Турку.

1970. Великий Новгород. Дома. Кот Рыжик.



1988. РАТАН, обеденный перерыв. Партия в теннис.

2004. 12 июля. Юбилей РАТАНА. 30 лет.
Владимир Кононов.

2002. Копенгаген. Пешеходная зона.
Василиса Верходанова.

2002. Копенгаген. На прогулке.

2007. 10 февраля. День науки. А. Москвитин, Т. Бурякова.

2009. 22-25 апреля. Пущино. ПРАО АКЦ ФИАН. “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” XXV конференция. А. Дорошкевич, Н. Верходанова.

2014. 20 июня. Москва. ИЯИ РАН. Защита кандидатской диссертации.
Речь оппонента - Олега Верходанова. Сабир Рамазанов.

2011. Апрель. САО РАН. Банкет после защиты Риты Хабибуллиной. С. Павлюченко, В. Перекотиенко.

2015. Бразилия. Виктория. Естественно-Научная Школа. Oliver Fabio Piatella.

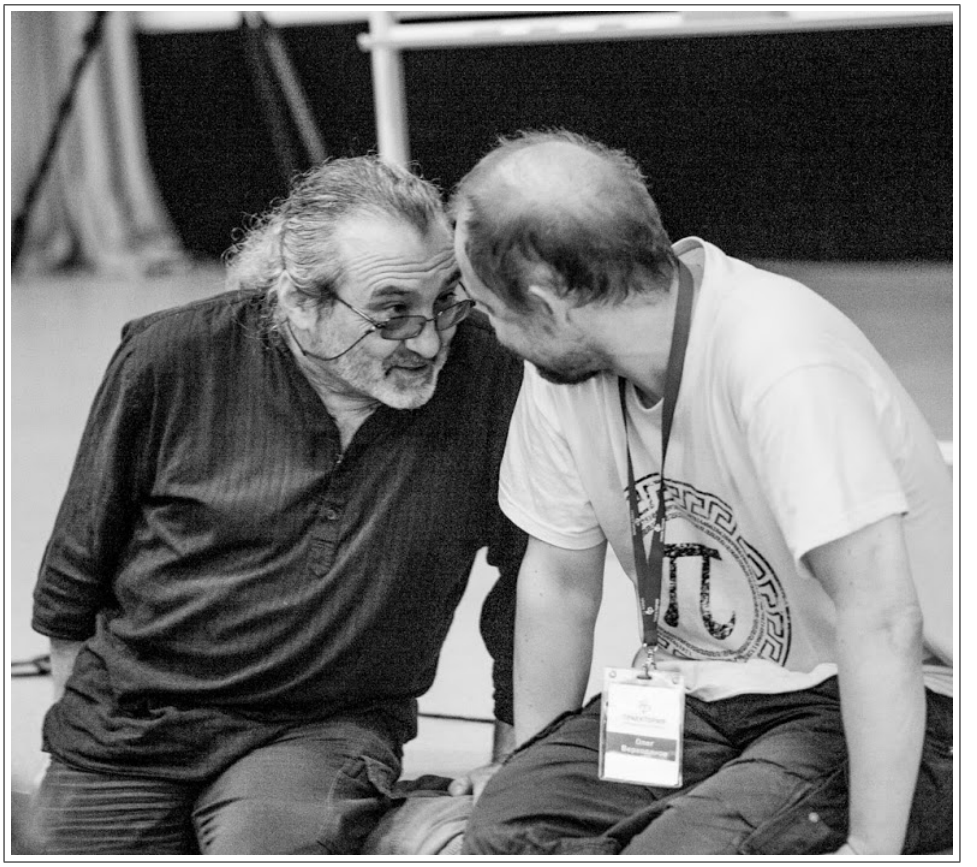
2012. Москва. Конференция, организованная фондом “Династия”.
“Молодые учёные России”. Лекция.

2016. Ноябрь. Дома. Запись поздравления к юбилею подруги. Григорий Бескин.

2016. Август. САО РАН. Астрофизическая школа 1.

2018. Июнь. САО РАН. У школы.

2016. Август. САО РАН. Астрофизическая школа 1.



2016. Август. САО РАН. Астрофизическая школа 1. Г. Бескин.

2016. Август. САО РАН. Астрофизическая школа 1. Экскурсия.

2016. Август. САО РАН. Астрофизическая школа 1.
Д. Макаров, С. Кайсин, Г. Бескин.

2016. Август. САО РАН. Астрофизическая школа 1.

2017. Август. САО РАН. Астрофизическая школа. Л. Пустильник.

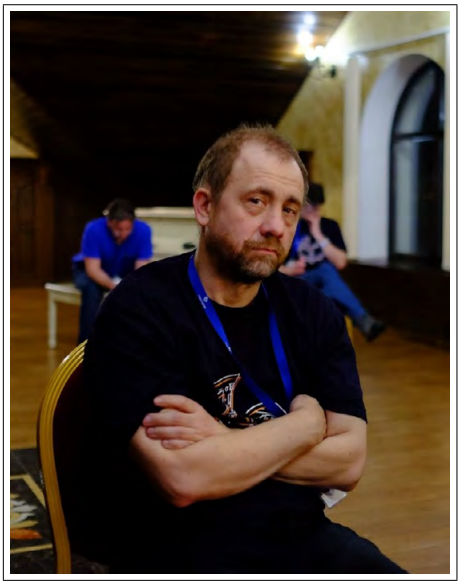
2017. Август. САО РАН. Астрофизическая школа. Лекция.

2017. Август. САО РАН. Астрофизическая школа.
С. Трушкин, С. Фабрика, Е. Ченцов.

2017. Апрель. Астрофизическая школа в Коуровской обсерватории.

2018. Апрель. Пущино. Астрофизическая школа в ПРАО АКЦ ФИАН.

2018. Август. Астрофизическая школа в Турку.
Д. Мамий.



2018. Апрель. Пущино.
Астрофизическая школа в ПРАО АКЦ ФИАН.

2018. САО. Дома. Д. Мамий.

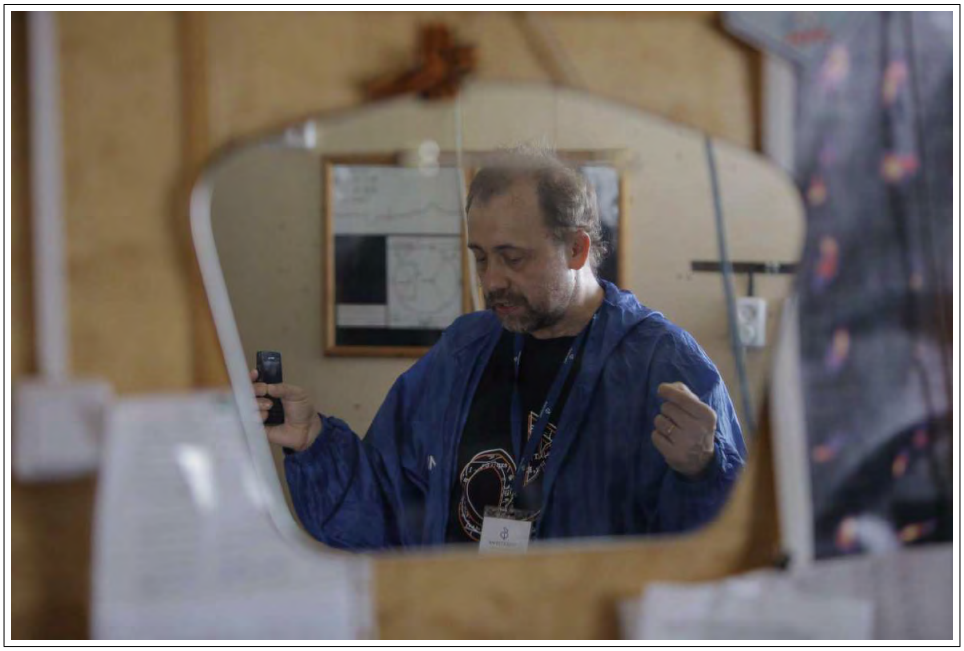
2018. 24 апреля. Астрофест.

2018. 21 января.
Э. Емельянов, Д. Мамий, Н. Андреев.

2019. Октябрь. Великий Новгород. Кафе.

2020. 1 марта. Форум “Ученые против мифов”.
Последнее выступление.

2019. Август. САО РАН. Астрофизическая школа.



2019. Август. САО РАН. Астрофизическая школа.

2019. Август. САО РАН. Астрофизическая школа.

2019. Август. САО РАН. Астрофизическая школа. Н. Катаржнов (спонсор школы),
М. Юрик (исполнительный директо некоммерческого фонда “Траектория”).

2019. Август. САО РАН. Астрофизическая школа. Наталия Верходанова.

2019. Апрель. Армения. Астрофизическая школа.

2019. Апрель. Армения. Астрофизическая школа.

2019. Апрель. Армения. Астрофизическая школа. Л. Пустильник.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

- Д.И. Соловьев, О.В. Верходанов, О.С. Улахович, Н.В. Верходанова, М.Л. Хабибуллина, Статистическое исследование центральных радиоисточников в областях с эффектом Сюняева-Зельдовича, Астрономический журнал, 99 (6), с. 443-453 (2022), DOI: https://doi.org/10.1134/S106377292207006X.
- O.V. Verkhodanov, A.P. Topchieva, A.D. Oronovskaya, S.A. Bazrov, D.A. Shorin, Search for Galaxy Cluster Candidates in the Cosmic Microwave Background Maps of the Planck Space Mission Using a Convolutional Neural Network Based on the Method of Tracing the Sunyaev-Zeldovich Effect, Astrophysical Bulletin, 76 (2), p. 123-131 (2021), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341321020103
- О.В. Верходанов, Реликтовое излучение и современная космологическая модель, Астрономический журнал, 98 (3), с. 179-196 (2021), DOI: https://doi.org/10.31857/S0004629921030051
- E.K. Majorova, O.V. Verkhodanov, O.P. Zhelenkova, Search for Candidate Objects with the Sunyaev-Zeldovich Effect on Planck Maps in the Neighborhood of RCR Catalog Radio Sources, Astrophysical Bulletin, 75 (2), p. 77-92 (2020), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341320020091
- V.V. Pushkarev, E.K. Majorova, and O.V. Verkhodanov, Spectral properties of background signal peaks at medium and high multipoles, Astrophysical Bulletin, 74 (4), p. 337-351 (2019), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341319040011
- A.A. Zaporozhets, O.V. Verkhodanov, Radio Sources of Random Sky Region, Astrophysical Bulletin, 74 (3), p. 247-256 (2019), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341319030015
- О.В. Верходанов, Есть ли нестыковки в понимании эволюции Вселенной?, в сб. *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: V междунар. научно-практ. конф., 20-24.05.2019 г., Майкопский гос. технол. университет: Сб. трудов, часть 1* (ISBN: 978-5-907004-38-2, Майкоп: Изд-во “ИП Кучеренко В.О.”, 2019), с. 108-118.
- О.В. Верходанов, Есть ли проблемы с согласованием скорости расширения Вселенной? Троицкий Вариант - Наука, №11(280), с. 4-5 (2019), https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434741/Est_li_problemy_s_soglasovaniem_skorosti_rasshireniya_Vselennoy
- I.V. Sokolov, A.J. Castro-Tirado, A.F. Valeev, I.A. Solovyev, O.P. Zhelenkova, O.V. Verkhodanov. The field galaxies clustering in GRB lines of sight based on observations with BTA and other telescopes. In *"The Multi-Messenger Astronomy: Gamma-Ray Bursts, Search for Electromagnetic Counterparts to Neutrino Events and Gravitational Waves"Proc. conf., 7-14 October, 2018 at SAO RAS* (ISBN 978-5-6041711-1-0, Publ. SNEG, Pyatigorsk, Russia 2019), p. 218-228, DOI: https://doi.org/10.26119/SAO.2019.1.35552
- О.В. Верходанов. Удивляющая реальность. Обзор книги Иэна Стюарта "Математика космоса. Как современная наука расшифровывает Вселенную". Троицкий Вариант - Наука, №23(267), с. 10 (2018), https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434434/Troitskiy_variant_Nauka_23_267_20_noyabrya_2018_goda
- O. Verkhodanov, N. Verkhodanova, O. Ulakhovich, D. Solovyov, M. Khabibullina, Advanced stream search for galaxy clusters with multifrequency microwave data, in *XXth International Seminar on High Energy Physics "Quarks-2018 INR RAS, Valdai, 28 May - 3 June, 2018*, Ed. by V. Volkova, Y. Zhezher, D. Levkov, V. Rubakov, V. Matveev, (EPJ Web of Conferences, 2018) 191, 01008, DOI: https://doi.org/10.1051/epjconf/201819101008
- O.V. Verkhodanov, D.D. Kozlova, Yu.V. Sotnikova, Cosmological evolution of average continuum spectra of radio sources at Z >2 Redshifts, Astrophysical Bulletin, 73 (4), p. 393-400 (2018), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341318040016
- О.В. Верходанов, Исследования CMB, Физика элементарных частиц и атомного ядра, 49 (4), с. 885-895 (2018), http://www1.jinr.ru/Pepan/v-49-4/06_Verhodanov.pdf

- I.V. Sokolov, I.V. Castro-Tirado, O.P. Zhelenkova, I.A. Solovyev, O.V. Verkhodanov, V.V. Sokolov, The excess density of field galaxies near z 0.56 around the gamma-ray burst GRB021004 position, Astrophysical Bulletin, 73 (2), p. 111 (2018), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341318020013
- О.В. Верходанов, Стивен Хокинг: великий популяризатор науки, Газета "Академия" (Ростов-на-Дону), №14 (790), с. 6 (2018).
- O.V. Verkhodanov, N.V. Verkhodanova, O.S. Ulakhovich, D.I. Solovyov, M.L. Khabibullina, Search for candidate objects with the Sunyaev-Zeldovich effect in the radio source vicinities. Astrophysical Bulletin, 73 (1), p. 1-21 (2018), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341318010017
- Ю.Н. Парийский, О.В. Верходанов, Обзоры фонового излучения на РАТАН-600, В сб. *Юбилейный сборник САО РАН. 50 лет*, под ред. В.В.Власюк (Нижний Архыз, 2018), с. 260-272, https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Books/50_years_SAO.pdf
- О.В. Верходанов, Г.М. Бескин, Астрономические школы для старшеклассников, В сб. *Юбилейный сборник САО РАН. 50 лет*, под ред. В.В.Власюк (Нижний Архыз, 2018), с. 303-308, https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Books/50_years_SAO.pdf
- О.В. Верходанов, Г.М. Бескин, К.С. Петров, М.К. Юрик, Астрофизическая школа "Траектория", Троицкий Вариант - Наука. №233, с. 7 (2017), https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/433698/Astrofizicheskaya_shkola_Traektoriya
- D. I. Solovyov, O. V. Verkhodanov, Modeling of giant radio galaxy distribution over the sphere in the millimeter-wavelength range, Astrophysical Bulletin, 72 (3), p. 217-223 (2017), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341317030117
- О.В. Верходанов, Гармонический анализ на сфере и космологияеские результаты космической миссии Planck, в сб. *Материалы IV Международной научно-практической конференции. Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий, Часть 1, Майкоп, 15-18 мая 2017 г.* (ISBN 978-5-906696-85-4, Майкоп: Изд-во "ИП Кучеренко В.О.", 2017), с. 161-173.
- O.V. Verkhodanov, Low Multipoles Anomalies of CMB Maps, in *Radiation mechanisms of astrophysical objects*, Ed. by V. Grinin, et al. (Yerevan: Edit Print, 2017), p. 363-370, http://www.astro.spbu.ru/sobolev100/?q=ru/proceedings
- O.V. Verkhodanov, E.K. Majorova, O.P. Zhelenkova, D.I.Solovyov, M.L.Khabibullina, O.S.Ulakhovich, Faint Radio Galaxies on the Planck Mission Maps, in *Radiation mechanisms of astrophysical objects*, Ed. by V. Grinin et al. (Yerevan: Edit Print, 2017), p. 381-384, http://www.astro.spbu.ru/sobolev100/?q=ru/proceedings
- Yu.N. Parijskij, O.P. Zhelenkova, A.I. Kopylov, A.V. Temirova, O.V. Verhodanov, V.N.Komarova, Search and study of objects of the early universe, Astrophysical Bulletin, 72 (2), p. 93-99 (2017), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341317020018
- Ю.Н. Парийский, О.В. Верходанов, Обзоры на РАТАН-600 и космологический ген, Астрономический журнал, 94 (4), с. 323-327 (2017), DOI: https://doi.org/10.7868/S0004629917040156
- O.V. Verkhodanov, D.I. Solovyov, O.S. Ulakhovich, M.L. Khabibullina, E.K. Majorova, Radio galaxies of different populations on the Planck mission maps, Astronomy Reports, 61 (4), p. 297-298 (2017), DOI: https://doi.org/10.1134/S1063772917040187
- O. Verkhodanov, D. Solovyov, E. Majorova, M. Khabibullina, To the problem of the secondary CMB anisotropy separation, in *Proc. 19th Int. Seminar on High Energy Physics (QUARKS-2016)*, Ed. By V.A. Andrianov, V.A. Matveev, V.A. Rubakov, V.T. Kim, A.A. Andrianov, M.D. Fitkevich (EPJ Web of Conferences, 2016), 125, 03019, DOI: https://doi.org/10.1051/epjconf/201612503019
- O.V. Verkhodanov, Ya.V. Naiden, A Comparison of anisotropic statistical properties of CMB maps based on the WMAP and Planck space Mission data, Astrophysical Bulletin, 71 (4), p. 371-383 (2016), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341316040015
- О.В. Верходанов, Е.К. Майорова, О.П. Желенкова, Д.И. Соловьев, М.Л. Хабибуллина, Источники RCR-каталога с нормальными и плоскими спектрами по данным микроволнового обзора Planck, Астрономический журнал, 93 (7), с. 616-641 (2016), DOI: https://doi.org/10.7868/S0004629916070082

- O.V. Verkhodanov, V.V. Sokolov, M.L. Khabibullina, Correlation between sphere distributions of gamma-ray bursts and CMB fluctuations, in *Proc. Int. Workshop on "Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October 7-14, 2015* (Publish.house "Sneg", Pyatigorsk, 2016), p. 142-150, https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2015/proc/Verkhodanov.pdf
- I.V. Sokolov, A.J. Castro-Tirado, O.V. Verkhodanov, O.P. Zhelenkova, Y.V. Baryshev, Clustering of galaxies around the GRB 021004 sight-line at $z \sim 0.5$, in *Proc. Int. Workshop on "Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October 7-14, 2015* (Publish.house "Sneg" Pyatigorsk, 2016), p. 111-123, https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2015/Proc_SAO-BNO-2015_final_full.pdf?#page=112
- O.V. Verkhodanov, D.I. Solovyov, O.S. Ulakhovich, M.L. Khabibullina, A comparison of properties of different population radio galaxies based on the Planck mission microwave data, Astrophysical Bulletin, 71 (2), p. 139-150 (2016), DOI: https://link.springer.com/article/10.1134/S1990341316020024
- О.В. Верходанов, Космологические результаты космической миссии "Планк". Сравнение с данными экспериментов WMAP и BICEP2, Успехи физических наук, 186 (1), с. 3-46 (2016), DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.0186.201601b.0003
- O.V. Verkhodanov, Mini Course 5. Problems of CMB Data Registration and Analysis, in *"The Cosmic Microwave Background", Proc. II Jose Plinio Baptista School of Cosmology*, Ed. by Julio C. Fabris, Oliver F. Piattella, Davi C. Rodrigues, Hermano E.S. Velten, Winfried Zimdahl (Print ISBN 978-3-319-44768-1, Astrophysics and Space Science Proceedings, Springer International Publishing, 2016) 45, p. 167-228, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-44769-8_4
- О.В. Верходанов, Ю.Н. Парийский, РАТАН-600 и радиогалактики, Земля и Вселенная, №5, с. 6-25 (2016), https://www.libnauka.ru/journal/zemlya-i-vselennaya/vypusk-5-2016-zemlya-i-vselennaya/ratan-600-i-radiogalaktiki-zemlya-i-vselennaya/
- О.В. Верходанов, Е.К. Майорова, О.П. Желенкова, Д.И. Соловьев, М.Л. Хабибуллина, Источники RCR-каталога с крутыми спектрами в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах по данным миссии Planck, Письма в Астрономический журнал, 41 (9), p. 499-515 (2015), DOI: https://doi.org/10.7868/S0320010815090065
- T.V. Keshelava and O.V. Verkhodanov, Search for clustering of background objects near distant radio galaxies using the MST method, Astrophysical Bulletin, 70 (3), p. 257-263 (2015), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341315030025
- O.V. Verkhodanov, E.K. Majorova, O.P. Zhelenkova, M.L. Khabibullina, D.I. Solovyov, Yu.N. Parijskij, Investigation of the RCR Catalog Sources in the Millimeter and Submillimeter Ranges Based on the Planck Mission Data, Astrophysical Bulletin, 70 (2), p. 156-182 (2015), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341315020030
- O.V. Verkhodanov, Series Anomalies of Low Multipoles of WMAP and Planck Missions: What are They?, Physics of Particles and Nuclei, 46 (2), p. 237-247 (2015), DOI: https://doi.org/10.1134/S1063779615020197
- О.В. Верходанов, Анализ данных на полной сфере и последние космологические результаты, в кн. *"Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий", материалы III Международной научно-практической конференции, Майкоп, 11-14 мая 2015* (Майкоп, МГТУ, 2015), с. 71-88.
- О.В. Верходанов, Аномалии реликтового излучения: интрига остается, в "Сб. научно-популярных статей - победителей конкурса РФФИ 2014 года, под ред. В.А. Шахнова", (Физика и астрономия, Москва: Молнет, 2015), вып.18, с. 20-36, https://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1942628
- Д.И. Соловьев, О.В. Верходанов, Радиогалактики с признаками слияния из списка кандидатов в гигантские радиогалактики по данным обзора NVSS, Письма в Астрономический журнал, 40 (10), с. 671-680 (2014), DOI: https://doi.org/10.7868/S0320010814090022

- Ya.V. Naiden and O. V. Verkhodanov, Two-Dimensional Spectral Estimators of Statistical Anisotropy and Search for the Isolated Directions in Planck Mission Data, Astrophysical Bulletin, 69 (4), p. 488-496 (2014), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341314040105
- M.L. Khabibullina, O.V. Verkhodanov, and V.V. Sokolov, Statistics of the Planck CMB Signal in Direction of Gamma-Ray Bursts from the BATSE and BeppoSAX Catalogs, Astrophysical Bulletin, 69 (4), p. 472-487 (2014), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341314040099
- Д.И. Соловьев, О.В. Верходанов, Поиск и исследование слабых радиогалактик большого углового размера по данным обзора NVSS, Астрономический журнал, 91 (8), с. 592-602 (2014), DOI: https://doi.org/10.7868/S0004629914080064
- O.V. Verkhodanov, Comparison of Low-Harmonics Spectra and Maps According to the WMAP and Planck Space Missions, Astrophysical Bulletin, 69 (3), p. 330-338 (2014), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341314030092
- Yu.N. Parijskij, P. Thomasson, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, T.W.B. Muxlow, R. Beswick, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, O.V. Verkhodanov, Observations of the z = 4.514 radio galaxy RC J0311+0507, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 439 (3), p. 2314-2322 (2014), DOI: https://doi.org/10.1093/mnras/stu047
- D.I. Solovyov, O.V. Verkhodanov, Radio and Optical Identification of Giant Radio Galaxies from NVSS Radio Survey, Astrophysical Bulletin, 69 (2), p. 141-159 (2014), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341314020023
- O.V. Verkhodanov, Ya.V. Naiden, V.N. Chernenkov, N.V. Verkhodanova, Database of extended radiation maps and its access system, Astrophysical Bulletin, 69 (1), p. 113-120 (2014), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341314010106
- О.В. Верходанов, Реликтовое излучение: читаем код Вселенно, в *Сб. научно-популярных статей - победителей конкурса РФФИ 2013 года*, под ред. В.А. Шахнова (Физика и астрономия, Москва: Молнет, 2014), Вып.17, с. 37-50, https://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1918455
- О.В. Верходанов, "Планк": новый шаг в понимании Вселенной, Земля и Вселенная, №1, с. 3-21 (2014), https://www.libnauka.ru/journal/zemlya-i-vselennaya/vypusk-1-2014-zemlya-i-vselennaya/plank-novyy-shag-v-ponimanii-vselennoy-zemlya-i-vselennaya/
- Ya.V. Naiden, O.V. Verkhodanov, Correlation properties of the WMAP CMB and 2MRS and SDSS catalogs at different redshifts, Astrophysical Bulletin, 68 (4), p. 471-480 (2013), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341313040093
- Ya.V. Naiden, O.V. Verkhodanov, Power spectrum distortions in CMB map one-dimensional cross-sections depending on the cosmological model. II, Astrophysical Bulletin, 68 (4), p. 465-470 (2013), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341313040081
- О.В. Верходанов, А.Г. Дорошкевич, Системы пикселизации неба для анализа протяжнного излучения, Успехи физических наук, 183 (8), с. 849-862 (2013), DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.0183.201308c.0849
- Ya.V. Naiden, O.V. Verkhodanov, Power spectrum distortions in CMB map one-dimensional cross-sections depending on the cosmological model, Astrophysical Bulletin, 68 (2), p. 226-235 (2013), DOI: https://link.springer.com/article/10.1134/S1990341313020119
- О.В. Верходанов, Радиогалактики рассказывают о Вселенной, в *Сб. научно-популярных статей - победителей конкурса РФФИ 2012 года* (Физика и астрономия, Москва: Молнет, 2013), вып. 16, с. 70-83, https://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1893890
- О.В. Верходанов, Поиск негауссовости в наблюдательных данных по реликтовому микроволновому фону, Успехи физических наук, 182 (11), p. 1177-1193 (2012), DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201211d.1177
- M. Hansen, W. Zhao, A.M. Frejsel, P.D. Naselsky, J. Kim, O.V. Verkhodanov, Faraday rotation as a diagnostic of Galactic foreground contamination of cosmic microwave background maps, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 426 (1), p. 57-69 (2012), DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21606.x

- P. Naselsky, C.H. Christensen, P.R. Christensen, P.H. Damgaard, A. Frejsel, J.J. Gaardhoje, A. Hansen, M. Hansen, J. Kim, O. Verkhodanov, U.A. Wiedemann, Morphology of high-multiplicity events in heavy ion collisions, Physical Review C, 86 (2), id. 024916 (2012), DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevC.86.024916
- O.V. Verkhodanov, T.V. Keshelava and Ya.V. Naiden, On two low harmonics of CMB correlation maps, Astrophysical Bulletin, 67 (3), p. 245-252 (2012), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341312030017
- O.V. Verkhodanov, A.G Doroshkevich, Chapter 8. The sky pixelization for CMB mapping, in *Advances in Machine Learning and Data Mining for Astronomy*, Ed. by. Michael Way, Jeffrey Scargle, Kamal Ali and Ashok Srivastava (ISBN: 9781439841730, Chapman and Hall/CRC Press, USA, 2012), p. 133-159.
- О.В. Верходанов, Радиотелескопы в космологии, в кн. *"Наблюдательная и теоретическая космология", Труды Летней школы Фонда Дмитрия Зимина "Династия"* (7-ой Школы современной астрофизики, САО РАН, Нижний Архыз, 2011) (М.:URSS, 2012), с. 202-249.
- О.В. Верходанов, Космология с радиогалактиками, в кн. *"Наблюдательная и теоретическая космология", Труды Летней школы Фонда Дмитрия Зимина "Династия"* (7-ой Школы современной астрофизики, САО РАН, Нижний Архыз, 2011) (М.:URSS, 2012), с. 250-292.
- О.В. Верходанов, Реликтовое излучение: как измерить космологические параметры, в кн. *"Наблюдательная и теоретическая космология", Труды Летней школы Фонда Дмитрия Зимина "Династия"* (7-ой Школы современной астрофизики, САО РАН, Нижний Архыз, 2011) (М.:URSS, 2012), с. 293-326.
- О.В. Верходанов, Негауссовость микроволнового фона: новая физика и старые проблемы, в кн. *"Наблюдательная и теоретическая космология", Труды Летней школы Фонда Дмитрия Зимина"Династия"* (7-ой Школы современной астрофизики, САО РАН, Нижний Архыз, 2011) (М.:URSS, 2012), с. 327-368.
- О.В. Верходанов, Построение углового спектра мощности реликтового излучения. Лабораторная работа 1, в кн. *"Наблюдательная и теоретическая космология", Труды Летней школы Фонда Дмитрия Зимина "Династия"* (7-ой Школы современной астрофизики, САО РАН, Нижний Архыз, 2011) (М.:URSS, 2012), с. 369-380.
- О.В. Верходанов, Селекция кандидатов в далекие радиогалактики. Лабораторная работа 2, в кн. *"Наблюдательная и теоретическая космология", Труды Летней школы Фонда Дмитрия Зимина "Династия"* (7-ой Школы современной астрофизики, САО РАН, Нижний Архыз, 2011) (М.:URSS, 2012), с. 381-392.
- О.В. Верходанов, На пороге эпохи точной космологии, в сб. *"Альманах 2010", Фонд Дмитрия Зимина "Династия"* (Москва, 2012). с. 129-131.
- O.V. Verkhodanov and Ya.V. Naiden, Does the contribution of infrared and submillimeter sources reveal itself at low harmonics of the CMB?, Astrophysical Bulletin, 67 (1), p. 1-16 (2012), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341312010014
- D.I. Solovyov and O.V. Verkhodanov, A Search for Faint Giant Radio Galaxies in the NVSS Survey, Astrophysical Bulletin, 66 (4), p. 416-423 (2011), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341311040031
- O.V. Verkhodanov and A.A. Basova, Non-Gaussianity of Peak Statistics in Contrasting Spots of WMAP ILC, Astrophysical Bulletin, 66 (4), p. 407-415 (2011), DOI: https://doi.org/10.1134/S199034131104002X
- Ya.V. Naiden, O.V. Verkhodanov, Determination of microwave background map inhomogeneity from angular power spectrum, Astrophysical Bulletin, 66 (3), p. 345-354 (2011), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341311030072
- М.Л. Хабибуллина, О.В. Верходанов, М. Сингх, А. Пирия, С. Нанди, Н.В. Верходанова, Второй сет наблюдение гигантских радиогалактик на РАТАН-600, Астрономический журнал, 88 (5), с. 429-436 (2011), https://elibrary.ru/item.asp?id=16344057
- O.V. Verkhodanov, M.L. Khabibullina, Statistics of WMAP ILC map temperature fluctuations towards distant radio galaxies, Astrophysical Bulletin, 66 (2), p. 183-189 (2011), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341311020052

- M.L. Khabibullina, O.V. Verkhodanov, M. Singh, A. Pyria, S. Nandi, N.V. Verkhodanova, A study of giant radio galaxies at RATAN-600, Astrophysical Bulletin, 66 (2), p. 171-182 (2011), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341311020040
- М.Л. Хабибуллина, О.В. Верходанов, К вопросу о возможности оценки масс черных дыр далеких радиогалактик, Астрономический журнал, 88 (4), с. 333-341 (2011), https://elibrary.ru/item.asp?id=15638863
- A.G. Doroshkevich, O.V. Verkhodanov, CMB component separation in the pixel domain, Physical Review D, 83 (4), id. 043002 (2011), DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.043002
- A.G. Doroshkevich, O.V. Verkhodanov, P.D. Naselsky, Ja. Kim, D.I. Novikov, V.I. Turchaninov, I.D. Novikov, L.-Y. Chiang, M. Hansen, The Gauss-Legendre Sky Pixelization for the CMB polarization (GLESP-pol). Errors due to pixelization of the CMB sky, International Journal of Modern Physics D, 20 (6), p. 1053-1078 (2011), DOI: https://doi.org/10.1142/S0218271811019219
- M. Singh, O.V. Verkhodanov, A. Pirya, H.C. Chandola, M.L. Khabibullina, High frequency study of few large size radio galaxies, in *Proc. 29th Meeting of the Astron. Soc. India, held 23-25 February*, Ed. by P. Khare and C.H. Ishwara-Chandra (ASI Conf. Series, 2011), 3, p. 149, https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2011ASInC...3..149S
- O.V. Verkhodanov, M.L. Khabibullina, Dominant Multipoles in WMAP5 Mosaic Data Correlation Maps, Astrophysical Bulletin, 65 (4), p. 390-399 (2010), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341310040061
- Ю.Н. Парийский, А.И. Копылов, А.В. Темирова, Н.С. Соболева, О.П. Желенкова, О.В. Верходанов, В.М. Госс, Т.А. Фатхуллин, Результаты спектроскопических исследований объектов проекта "Большое трио" с помощью спектрографа "Скорпио" на 6-м телескопе САО РАН, Астрономический Журнал, 87 (8), с. 739-796 (2010), DOI: https://doi.org/10.1134/S1063772910080019
- O.V. Verkhodanov, V.V. Sokolov, M.L. Khabibullina, S.V. Karpov, GRB Sky Distribution Puzzles, Astrophysical Bulletin, 65 (3), p. 238-249 (2010), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341310030053
- М.Л. Хабибуллина, О.В. Верходанов, М. Сингх, А. Пирия, Н.В. Верходанова, С. Нанди, Радиоспектры гигантских радиогалактик по данным РАТАН-600, Астрономический Журнал, 87 (7), p. 627-633 (2010), https://elibrary.ru/item.asp?id=15108853
- V.S. Berkutov, Ya. V. Naiden, O.V. Verkhodanov, Axial Symmetries in WMAP ILC Data, Astrophysical Bulletin, 65 (2), p. 187-195, DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341310020082
- D.I. Soloviev, O.V. Verkhodanov, Statistics of extragalactic objects in the Cold Spot region on the CMB maps, Astrophysical Bulletin, 65 (2), p. 121-131 (2010), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341310020021
- P.D. Naselsky, P.R. Christensen, P. Coles, O.V. Verkhodanov, D.I. Novikov, Ja. Kim, Understanding the WMAP Cold Spot mystery, Astrophysical Bulletin, 65 (2), p. 101-120 (2010), DOI: https://doi.org/10.1134/S199034131002001X
- Y.N. Parijskij, O.P. Zhelenkova, A.I. Kopylov, O.V. Verkhodanov, T.A. Fatkhullin, P. Thomasson, T. W. B. Muxlow, R. Beswick, N. S. Soboleva, A. V. Temirova, MERLIN and EVN observations of a z=4.515 radio galaxy, RC J0311+0507, and the problem of SMBHs in the early Universe, in *Proceedings of the 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting: VLBI and the new generation of radio arrays. September 20-24, 2010, Manchester, UK* (2010), id. 31, DOI: https://doi.org/10.22323/1.125.0031
- О.В. Верходанов, М.Л. Хабибуллина, О спектральном индексе далеких радиогалактик. Письма в Астрономический журнал, 36 (1), с. 9-15 (2010), https://elibrary.ru/item.asp?id=13044832
- О.В. Верходанов, Современная космологическая модель или как мы постигаем устройство Вселенной, в *Материалах Шестой Межрегиональной Летней Школы Физиков (ЛМШФ-6), под ред. Арапова А.Г., 27 июля-13 августа 2010, Волгоград - Ростов-на-Дону - Зеленчукская — Новороссийск* (Екатеринбург: издательство АСФ России, 2010), с. 97-98.
- M.L. Khabibullina, O.V. Verkhodanov, Catalog of radio galaxies with z>0.3. III: Angular sizes and flux density according to the NVSS data, Astrophysical Bulletin, 64 (4), p. 340-348 (2009), DOI: https://doi.org/10.1134/S199034130904004X

- M.L. Khabibullina, O.V. Verkhodanov, Catalog of radio galaxies with z>0.3. II: Photometric Data,Astrophysical Bulletin, 64 (3), p. 276-285 (2009), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341309030079
- O.V. Verkhodanov, M.L. Khabibullina, E.K. Majorova, Tessellated mapping of cosmic background radiation correlations, Astrophysical Bulletin, 64 (3), p. 263-269 (2009), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341309030055
- M.L. Khabibullina, O.V. Verkhodanov, Catalog of radio galaxies with z>0.3. I: Construction of the sample, Astrophysical Bulletin, 64 (2), p. 123-139 (2009), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341309020023
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, H. Andernach, V.N. Chernenkov, The CATS Service: An Astrophysical Research Tool, Data Science Journal, 8, p. 34-40 (2009), DOI: https://doi.org/10.2481/dsj.8.34
- O.V. Verkhodanov, N.V. Verkhodanova, H. Andernach, Radio identification of decameter-wave sources. II: The $30° < \delta < 40°$ declination interval, Astrophysical Bulletin, 64 (1), p. 72-105 (2009), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341309010052
- О.В. Верходанов, Ю.Н. Парийский, *Радиогалактики и космология* (ISBN 978-5-9221-1135-5, Москва: Физмалит, 2009), http://sed.sao.ru/~vo/book/abstr.html
- O. V. Verkhodanov, M.L. Khabibullina, E.K. Majorova, Yu. N. Parijskij, Correlation Properties of the Maps of the NVSS Survey and WMAP ILC, Astrophysical Bulletin, 63 (4), p. 366-373 (2008), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341308040056
- O.V. Verkhodanov, P.D. Naselsky, L.Y. Chiang, A.G. Doroshkevich, I.D. Novikov, Review of non-Gaussianity at low and high multipoles from WMAP data, in *Particles and Cosmology, Proc. 14th Internat. School, held in Baksan Valley, Kabardino-Balkaria, Russia, April 16-21, 2007*, Ed. by S.V. Demidov, V.A. Matveev, V.A. Rubakov (ISBN 978-5-94274-055-9, 2008), p. 119-126.
- O.V. Verkhodanov, Yu.N. Parijskij, Hubble parameter and Ω_Λ from observations of radio galaxies, in *Particles and Cosmology, Proc. 14th Internat. School, held in Baksan Valley, Kabardino-Balkaria, Russia, April 16-21, 2007*, Ed. by S.V. Demidov, V.A. Matveev, V.A. Rubakov (ISBN 978-5-94274-055-9, 2008), p. 109-118.
- P.D. Naselsky, O.V. Verkhodanov, M.T.B. Nielsen, Instability of reconstruction of the low CMB multipole, Astrophysical Bulletin, 63 (3), p. 216-227 (2008), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341308030024
- M.L. Khabibullina , O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, Properties of one-dimensional sections of WMAP maps at the declination $\delta = 41°$, Astrophysical Bulletin, 63 (2), p. 95-101, DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341308020016
- O.V. Verkhodanov, N.V. Verkhodanova, H. Andernach, Ultra-steep spectrum decametric sources for cosmological researches, in *Practical Cosmology, V.II, Proc. Internat. Conf. "Problems of Practical Cosmology", 23-27 June 2008, St.Petersburg*, Ed. By Yu. Baryshev, Igor N. Taganov, P. Teerikorpi (Russian Geographical Society, 2008), p. 251-255, http://ppc08.astro.spbu.ru/materials/thesis_pdf/83-verkh3.pdf
- O.V. Verkhodanov, M.L. Khabibullina, M. Singh, A. Pirya, N.V. Verkhodanova, S. Nandi, Giant radio galaxies: problems of understanding and problems for CMB?, in *Practical Cosmology, V.II, Proc. Internat. Conf. "Problems of Practical Cosmology", 23-27 June 2008, St.Petersburg*, Ed. By Yu. Baryshev, Igor N. Taganov, P. Teerikorpi (Russian Geographical Society, 2008), p. 247-250, http://ppc08.astro.spbu.ru/materials/thesis_pdf/82-verkh2.pdf
- M.L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, Properties of WMAP cross-sections in the field of the RATAN-600 survey, in *Practical Cosmology, V.II, Proc. Internat. Conf. "Problems of Practical Cosmology", 23-27 June 2008, St.Petersburg*, Ed. By Yu. Baryshev, Igor N. Taganov, P. Teerikorpi (Russian Geographical Society, 2008), p. 239-246, http://ppc08.astro.spbu.ru/materials/thesis_pdf/81-khabib.pdf
- O.V. Verkhodanov, CMB data analysis: methods and problems, in *Practical Cosmology, V.II, Proc. Internat. Conf. "Problems of Practical Cosmology", 23-27 June 2008, St.Petersburg*, Ed. By Yu. Baryshev, Igor N. Taganov, P. Teerikorpi (Russian Geographical Society, 2008), p. 206-212, http://ppc08.astro.spbu.ru/materials/thesis_pdf/77-verkh1.pdf

- P.D. Naselsky, O.V. Verkhodanov, Peculiarities of phases of the WMAP quadrupole, International Journal of Modern Physics D, 17 (1), p. 179-194 (2008), DOI: https://doi.org/10.1142/S0218271808011936
- P.D. Naselsky, O.V. Verkhodanov, P.R. Christensen, L.-Y. Chiang, On the antenna beam shape reconstruction using planet transit, Astrophysical Bulletin, 62 (3), p. 285-295 (2007), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341307030078
- P.D. Naselsky, O.V. Verkhodanov, Do We Need to Correct the Internal Linear Combination Quadrupole?, Astrophysical Bulletin, 62 (3), p. 203-208 (2007), DOI: https://doi.org/10.1134/S1990341307030017
- A. I. Kopylov, Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, A. V. Temirova, O. V. Verkhodanov, W. M. Goss, O. P. Zhelenkova, RC J0311+0507: A Candidate to Superpowerful Radio Galaxies with z = 4.514, in "Galaxy Evolution Across the Hubble Time", in *Proceedings of the International Astronomical Union 2, IAU Symposium 235, held 14-17 August, 2006 in Prague, Czech Republic*, Ed. by F. Combes and J. Palous, (Cambridge University Press, 2007), p. 431-431, DOI: https://doi.org/10.1017/S1743921306010581
- О.В. Верходанов, В.Н. Черненков, С.А. Трушкин, Н.В. Верходанова, А.И. Копылов, В.К. Кононов, Информационная система САО РАН в области радиокосмологии, в сб. *Труды Всеросийской Астроном. Конференции ВАК-2007, "Космические рубежи XXI века"* (Казань, Изд-во КГУ, 2007), с. 438-440.
- О.В. Верходанов, А.Г. Дорошкевич, И.Д. Новиков, П.Д. Насельский, В.И. Турчанинов, Д.И. Новиков, П.Р. Кристенсен, Л.-И. Чианг, Новая версия пакета анализа карт фоновых излучений на небесной сфере, в сб. *Труды Всеросийской Астроном. Конференции ВАК-2007, "Космические рубежи XXI века"* (Казань, Изд-во КГУ, 2007), с. 452-453.
- П.Д. Насельский, О.В. Верходанов, О проблеме квадруполя реликтового излучения, в сб. *Труды Всеросийской Астроном. Конференции ВАК-2007, "Космические рубежи XXI века"* (Казань, Изд-во КГУ, 2007), с. 437-438.
- О.В. Верходанов, Н.В. Верходанова, Х. Андернах, Отождествление декаметровых источников, в сб. *Труды Всеросийской Астроном. Конференции ВАК-2007, "Космические рубежи XXI века"* (Казань, Изд-во КГУ, 2007), с. 467-468
- А.И. Копылов, Уи.М. Госс, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, О.В. Верходанов, А.В. Темирова, О.П. Желенкова, RC J0311+0507: кадидат в сверхмощные радиогалактики в ранней Вселенной на красном смещении z=4.514, Письма в Астрономический журнал, 32 (7), с. 483-488 (2006), https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17332895
- P.D. Naselsky, L.-Y. Chiang, I.D. Novikov, O.V. Verkhodanov, Foreground analysis from the 1-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) data, International Journal of Modern Physics D, 14 (7), p. 1273-1292 (2005), DOI: https://doi.org/10.1142/S0218271805007280
- Y.N. Parijskij, N.N. Bursov, A.B. Berlin, A.A. Balanovskij, V.B. Khaikin, E.K. Majorova, M.G. Mingaliev, N.A. Nizhelskij, O.M. Pylypenko, P.A. Tsibulev, O.V. Verkhodanov, G.V. Zhekanis, Y.K. Zverev, RATAN-600 new zenith field survey and CMB problems, Gravitation and Cosmology, 11 (1), p. 139-144 (2005).
- О.В. Верходанов, С.А. Трушкин, Х. Андернах, В.Н. Черненков, Текущий статус базы данных CATS, Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН, 58, с. 118-131 (2005), https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9570823
- О.В. Верходанов, А.Г. Дорошкевич, П.Д. Насельский, Д.И. Новиков, В.И. Турчанинов, И.Д. Новиков, П.Р. Кристенсен, Л.-И. Чианг, Пакет анализа данных GLESP для карт реликтового излучения на полной сфере и его реализация в рамках системы обработки FADPS, Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН, 58, с. 40-51 (2005), https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9570819
- О.В. Верходанов, Ю.Н. Парийский, А.А. Старобинский, Определение Ω_Λ и H_0 по фотометрическим данным радиогалактик, Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН, 58, с. 5-16 (2005), https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9570815
- О.В. Верходанов, А.И. Копылов, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, К вопросу о фотометрических оценках красного смещения радиогалактик типа FRII, Письма в Астрономический журнал, 31 (4), с. 243-249 (2005), https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9154349

- A.G. Doroshkevich, P.D. Naselsky, O.V. Verkhodanov, D.I. Novikov, V.I. Turchaninov, I.D. Novikov, P.R. Christensen, L.-Y. Chiang, Gauss–Legendre Sky Pixelization (GLESP) for CMB maps, International Journal of Modern Physics D, 14 (2), p. 275-290,DOI: https://doi.org/10.1142/S0218271805006183
- V.H. Chavushyan, O.V. Verkhodanov, J.R. Valdes, R. Mujica, S.A. Trushkin, IRAS F02044+0957: an interacting system, Astrophysics, 48 (1), p. 89-98, DOI: https://doi.org/10.1007/s10511-005-0010-y
- P.D. Naselsky, L.-Y. Chiang, P. Olesen, O.V. Verkhodanov, Primordial Magnetic Field and Non-Gaussianity of the One-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Data, The Astrophysical Journal, 615 (1), p. 45-54, DOI: https://doi.org/10.1086/424477
- S. K. Balayan, O. V. Verkhodanov, Objects with a Continuum Spectrum in the Second Byurakan Sky Survey, Astrophysics, 47 (4), p. 505-512 (2004), DOI: https://doi.org/10.1023/B:ASYS.0000049789.18676.81
- P.D. Naselsky, A.G. Doroshkevich, O.V. Verkhodanov, Cross-correlation of the phases of the CMB and foregrounds derived from the WMAP data, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 349 (2), p. 695-704, DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07541.x
- N.V. Verkhodanova, O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, V.N. Chernenkov, System to study evolution of radio galaxies as a part of a virtual radio observatory, in *Toward an International Virtual Observatory, Proc. ESO/ESA/NASA/NSF Conf., Garching, Germany, 2002*, Ed. by P.J. Quinn, K.M. Gorski (ESO Astrophysics Symposia, Berlin: Springer, 2004), p. 321, DOI: https://doi.org/10.1007/10857598_70
- O.V. Verkhodanov, V.K. Kononov, S.A. Trushkin, A.I. Kopylov, N.V. Verkhodanova, A.G. Gubanov, O.P. Zhelenkova, V.N. Chernenkov, To Creation of Virtual Radio Observatory, in *Toward an International Virtual Observatory, Proc. ESO/ESA/NASA/NSF Conf., Garching, Germany, 2002*, Ed. by P.J. Quinn, K.M. Gorski (ESO Astrophysics Symposia, Berlin: Springer, 2004), p. 318, DOI: https://doi.org/10.1007/10857598_69
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, V.N. Chernenkov, H. Andernach, The CATS Database as a Tool to Study Radio Sources, in *Toward an International Virtual Observatory, Proc. ESO/ESA/NASA/NSF Conf., Garching, Germany, 2002*, Ed. by P.J. Quinn, K.M. Gorski (ESO Astrophysics Symposia, Berlin: Springer, 2004), p. 316, DOI: https://doi.org/10.1007/10857598_68
- Yu.N. Parijskij, N.N. Bursov, A.B. Berlin, A.A. Balanovskij, V.B. Khaikin, E.K. Majorova, M.G. Mingaliev, N.A. Nizhelskij, O.M. Pylypenko, P.A. Tsibulev, O.V. Verkhodanov, G.V. Zhekanis, Yu.K. Zverev, RATAN-600 new zenith field survey and CMB problems, Gravitation and Cosmology, 10 (4), p. 1-10, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0508065
- P.D. Naselsky, A.G. Doroshkevich, O.V. Verkhodanov, Phase cross-correlation of the WMAP ILC map and foregrounds, The Astrophysical Journal, 599 (2), L53-L56, DOI: https://doi.org/10.1086/381249
- P.D. Naselsky, O.V. Verkhodanov, P.R. Christensen, L.-Y. Chiang, Beam reconstruction using planet transit, The Planck Newsletter, 8 (5) (2003).
- P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, L.-Y. Chiang, I. D. Novikov, Phase analysis of the 1-year WMAP data and its application for the CMB foreground separation, (2003), https://arxiv.org/abs/astro-ph/0310235
- L.-Y. Chiang, P.D. Naselsky, O.V. Verkhodanov, M.J. Way, Non-Gaussianity of the Derived Maps from the First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Data, The Astrophysical Journal, 590 (2), L65-L68, DOI: https://doi.org/10.1086/376822
- В.Л. Афанасьев, С.Н. Додонов, А.В. Моисеев, О.В. Верходанов, А.И. Копылов, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, О.П. Желенкова, В.М. Госс, Спектроскопия RC-объектов, Астрономический журнал, 80 (5), с. 409-418 (2003), https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17268024
- О.В. Верходанов, В.О. Чавушян, Р. Мухика, С.А. Трушкин, Х.Р. Валдес, Исследование объектов кросс-списка IRAS и 365 МГц Техасского каталогов, Астрономический журнал, 80 (2), с. 140-150 (2003), https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17263375
- О.В. Верходанов, Н.В. Верходанова, Х. Андернах, Радиоотождествление и непрерывные спектры декаметровых источников, Астрономический журнал, 80 (2), с. 130-139 (2003), https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17263374

- O.V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, Problems of observational radio cosmology. Review, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 55, p. 66-88 (2003), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/55.pdf
- V.H. Chavushyan, R. Mujica, L. Carrasco, J.R. Valdes, J.A. Stepanian, O. Verkhodanov, The FIRST-APM QSOs Survey in the SBS sky region — FAQS, in *"AGN Surveys", Proceedings of the IAU Colloquium No. 184: held 18 June - 22 June 2001, Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (ASP Conf. Series, 2003), 284, p. 293-294, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0010516
- O.V. Verkhodanov, V.H. Chavushyan, R. Mujica, J.R. Valdes, S.A. Trushkin, IRAS F02044+0957: radio source in interacting system of galaxies, in *"AGN Surveys", Proceedings of the IAU Colloquium No. 184: held 18 June - 22 June 2001, Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (ASP Conf. Series, 2003), 284, p. 308-309, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112140
- O.V. Verkhodanov, Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.I. Kopylov, A.V. Temirova., O.P. Zhelenkova, Photometric study of radio galaxies in RATAN–600 "Cold" survey, in *"AGN Surveys", Proceedings of the IAU Colloquium No. 184: held 18 June - 22 June 2001, Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (ASP Conf. Series, 2003), 284, p. 310-311, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112144
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, N.V. Verkhodanova, O.P. Zhelenkova, V.N. Chernenkov, Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, System to estimate ages and redshifts for radio galaxies, in *"AGN Surveys", Proceedings of the IAU Colloquium No. 184: held 18 June - 22 June 2001, Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (ASP Conf. Series, 2003), 284, p. 312-313, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112142
- O.V. Verkhodanov, N.V. Verkhodanova, H. Andernach, Decametric AGNs: FIRST and NVSS maps and radio spectra, in *"AGN Surveys", Proceedings of the IAU Colloquium No. 184: held 18 June - 22 June 2001, Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (ASP Conf. Series, 2003), 284, p. 306-307, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112143
- О.В. Верходанов, А.И. Копылов, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, О.П. Желенкова, Цветовые красные смещения и возраст звездного населения далеких радиогалактик RC каталога, Астрономический журнал, 79 (7), с. 589-600 (2002), DOI: https://doi.org/10.1134/1.1495030
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, N.V. Verkhodanova, V.N. Chernenkov, Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, The SEDs Database to Study Evolution of Radio Galaxies, in *"The Universe at Low Radio Frequencies", Proceedings of IAU Symposium 199, held 30 Nov - 4 Dec 1999, Pune, India*, Ed. by A. Pramesh Rao, G. Swarup, and Gopal-Krishna (2002), p. 247-248, https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2002IAUS..199..247V
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, H. Andernach, Low Frequency Catalogues of the CATS Database, in *"The Universe at Low Radio Frequencies", Proceedings of IAU Symposium 199, held 30 Nov - 4 Dec 1999, Pune, India*, Ed. by A. Pramesh Rao, G. Swarup, and Gopal-Krishna (2002), p. 245-246, astro-ph/9912332
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, Study of Objects of Low Radio Frequency Catalogues and IRAS Data - Cross-Identification, in *"The Universe at Low Radio Frequencies", Proceedings of IAU Symposium 199, held 30 Nov - 4 Dec 1999, Pune, India*, Ed. by A. Pramesh Rao, G. Swarup, and Gopal-Krishna (2002), p. 221-224, https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2002IAUS..199..221V
- Yu.N. Parijski, W.M. Goss, A.I. Kopylov, N.S. Soboleva, O.V. Verkhodanov, A.V. Temirova, O.P. Zhelenkova, BVRI-Photometry of Distant Radio Galaxies from RC Catalogue in SAO RAS, in *"The Universe at Low Radio Frequencies", Proceedings of IAU Symposium 199, held 30 Nov - 4 Dec 1999, Pune, India*, Ed. by A. Pramesh Rao, G. Swarup, and Gopal-Krishna (2002), p. 219-220, https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2002IAUS..199..219P
- H. Andernach, O.V. Verkhodanov, N.V. Verkhodanova, Radio-optical Identification of Very-Steep Spectrum Radio Sources from the UTR-2 Catalogue, in *"The Universe at Low Radio Frequencies", Proceedings of IAU Symposium 199, held 30 Nov - 4 Dec 1999, Pune, India*, Ed. by A. Pramesh Rao, G. Swarup, and Gopal-Krishna (2002), p. 217-218, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0001473

- O.V. Verkhodanov, H. Andernach, N.V. Verkhodanova, The Problem of Identifying Decametric Sources, in *"The Universe at Low Radio Frequencies", Proceedings of IAU Symposium 199, held 30 Nov - 4 Dec 1999, Pune, India*, Ed. by A. Pramesh Rao, G. Swarup, and Gopal-Krishna (2002), p. 215-216, astro-ph/9912331
- V.K. Kononov, S.V. Pavlov, M.G. Mingaliev, O.V. Verkhodanov, E.K. Nizhelskaya, N.V. Khubieva, ODA-R - the Bank of observational data of the radiotelescope RATAN-600. The first version, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 53, p. 131-133 (2002), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/53.pdf
- O.V. Verkhodanov, V.K. Kononov, A variant of description of dissimilar astronomical data, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 53, p. 119-123 (2002), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/53.pdf
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, N.V. Verkhodanova, O.P. Zhelenkova, V.N. Chernenkov, Y.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, System to estimation of ages and redshifts for radio galaxies, in *AGN Surveys, Proceedings of IAU Colloquium 184, ASP Conference Proceedings, Vol. 284, held 18-22 June, 2001 in Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2002), p. 312, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112142
- O.V. Verkhodanov, Y.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.I. Kopylov, A.V. Temirova, O.P. Zhelenkova, W.M. Goss, Photometric Study of Radio Galaxies in RATAN-600 "Cold" survey, in *AGN Surveys, Proceedings of IAU Colloquium 184, ASP Conference Proceedings, Vol. 284, held 18-22 June, 2001 in Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2002), p. 310, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112144
- O.V. Verkhodanov, V.H. Chavushyan, R. Mújica, J.R. Valdés, S.A. Trushkin, IRAS F02044+0957: A Radio Source in Interacting System of Galaxies, in *AGN Surveys, Proceedings of IAU Colloquium 184, ASP Conference Proceedings, Vol. 284, held 18-22 June, 2001 in Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2002), p. 308, https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2002ASPC..284..308V
- N.V. Verkhodanova, O.V. Verkhodanov, H. Andernach, Decametric AGNs: FIRST and NVSS Maps and Radio Spectra, in *AGN Surveys, Proceedings of IAU Colloquium 184, ASP Conference Proceedings, Vol. 284, held 18-22 June, 2001 in Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2002), p. 306, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0112143
- V.H. Chavushyan, R. Mújica, J.R. Valdés, L. Carrasco, J.A. Stepanian, O.V. Verkhodanov, The FIRST-APM QSO Survey (FAQS) in the SBS Region. Current Status, in *AGN Surveys, Proceedings of IAU Colloquium 184, ASP Conference Proceedings, Vol. 284, held 18-22 June, 2001 in Byurakan, Armenia*, Ed. by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2002), p. 293, https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2002ASPC..284..293C
- O.V. Verkhodanov, H. Andernach, N.V. Verkhodanova, Steep-spectrum UTR sources in FIRST survey, Astronomical and Astrophyscal Transactions, 20, p. 321-322 (2001), DOI: https://doi.org/10.1080/10556790108229719
- P. Prugniel, P.F. Ortiz, L. Binette, G. Busarello, V. Golev, B. Joguet, P. Merluzzi, G. Paturel, G. Theureau, M. Tsvetkov, O. Verkhodanov, A. Zasov, HYPERLEDA: a Tool for Studying Galaxies, in *Mining the Sky: Proceedings of the MPA/ESO/MPE Workshop Held at Garching, Germany, July 31 - August 4, 2000, ESO ASTROPHYSICS SYMPOSIA*, Ed. by A.J. Banday, S. Zaroubi, and M. Bartelmann (ISBN 3-540-42468-7, Springer-Verlag, 2001), p. 683, DOI: https://doi.org/10.1007/10849171_92
- O.V. Verkhodanov, Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.I. Kopylov, A.V. Temirova, O.P. Zhelenkova, W.M. Goss, Results of investigation of radio galaxies of the survey "Cold" photometry, colour redshifts and the age of the stellar population, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 52, p. 5-133 (2001), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/52.pdf
- V. Chavushyan, R. Mujica, L. Carrasco, J.R. Valdes, O. Verkhodanov, J. Stepanian, The FIRST-APM QSO survey (FAQS) in the SBS Region. Preliminary Results, in *The New Era of Wide Field Astronomy, ASP Conference Series, Vol. 232*, Ed. by R. Clowes, A. Adamson, G. Bromage (ISBN: 1-58381-065-X, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2001), p. 102-104, https://arxiv.org/abs/astro-ph/0010516

- N.V. Verkhodanova, O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, V.N. Chernenkov, Y.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, System to Study Evolution of Radio Galaxies, in *Astronomische Gesellschaft Abstract Series, Vol. 18. Abstracts of Contributed Talks and Posters presented at the Annual Scientific Meeting of the Astronomische Gesellschaft at the Joint European and National Meeting JENAM 2001 of the European Astronomical Society and the Astronomische Gesellschaft at Munich, September 10-15*, 2001, abstract P239.
- O.V. Verkhodanov, V.K. Kononov, S.A. Trushkin, A.I. Kopylov, N.V. Verkhodanova, O.P. Zhelenkova, V.N. Chernenkov, Organizing of Virtual Mini Observatory, in *Astronomische Gesellschaft Abstract Series, Vol. 18. Abstracts of Contributed Talks and Posters presented at the Annual Scientific Meeting of the Astronomische Gesellschaft at the Joint European and National Meeting JENAM 2001 of the European Astronomical Society and the Astronomische Gesellschaft at Munich, September 10-15*, 2001, abstract P238.
- S.A. Trushkin, O.V. Verkhodanov, V.N. Chernenkov, H. Andernach, The Database CATS - a Real Step to Virtual Radio Observatory, in *Astronomische Gesellschaft Abstract Series, Vol. 18. Abstracts of Contributed Talks and Posters presented at the Annual Scientific Meeting of the Astronomische Gesellschaft at the Joint European and National Meeting JENAM 2001 of the European Astronomical Society and the Astronomische Gesellschaft at Munich, September 10-15*, 2001, abstract P237.
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, Y.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, O.P. Zhelenkova, Photometric Study of Radio Galaxy Ages of RATAN-600 "Cold" Sources, in *Astronomische Gesellschaft Abstract Series, Vol. 18. Abstracts of Contributed Talks and Posters presented at the Annual Scientific Meeting of the Astronomische Gesellschaft at the Joint European and National Meeting JENAM 2001 of the European Astronomical Society and the Astronomische Gesellschaft at Munich, September 10-15*, 2001, abstract P148.
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, On the virtual observatory and CATS database, in *Proc. of the International Workshop on Computer Science and Information Technologies, CSIT'2001, Ufa, Russia, September 21-26* (2001), volume 2, p. 7-11.
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, N.V. Verkhodanova, V.N. Chernenkov, Advance of the database "Evolution of radio galaxies", in *Proc. of the International Workshop on Computer Science and Information Technologies, CSIT'2001. Ufa, Russia, September 21-26*, (2001), volume 2, p. 1-6.
- Н.С. Соболева, В.М. Госс, О.В. Верходанов, О.П. Желенкова, А.В. Темирова, А.И. Копылов, Ю.Н. Парийский, RC J0105+0501 - радиогалактика с красным смещением $z =\sim 3.5$, Письма в Астрономический журнал, 26 (10), с. 723-728 (2000).
- O.V. Verkhodanov, D.A. Pavlov, An algorithm for cleaning extended interferences in radio astronomical records, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 49, p. 45-52 (2000), https://arxiv.org/abs/astro-ph/0008430
- Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, А.И. Копылов, О.В. Верходанов, А.В. Темирова, О.П. Желенкова, Дж. Уинн, А. Флетчер, Б. Берк, Радиогалактика RC J1148+0455, Письма в Астрономический журнал, 26 (7), с. 493-498 (2000), DOI: https://doi.org/10.1134/1.20410
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, N.V. Verkhodanova, V.N. Chernenkov, Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, Creation of the database of spectral energy distributions of radio galaxies, Baltic Astronomy, 9, p. 668-669 (2000), DOI: https://doi.org/10.1515/astro-2000-0446
- S.A. Trushkin, O.V. Verkhodanov, V.N. Chernenkov, H. Andernach, CATS - The Largest Radio Astronomical Database: Galactic Facilities, Baltic Astronomy, 9, p. 608-612 (2000), DOI: https://doi.org/10.1515/astro-2000-0424
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, V.N. Chernenkov, H. Andernach, CATS - The Largest Radio Astronomical Database: Extragalactic Facilities, Baltic Astronomy, 9, p. 604-607 (2000), DOI: https://doi.org/10.1515/astro-2000-0423
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, Searching out and studying sources of low-frequency radio emission near infrared objects, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 50, p. 115-141 (2000), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/50.pdf
- O.V. Verkhodanov, H. Andernach, N.V. Verkhodanova, Radio identification of decametric sources. I. Catalogue, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 49, p. 53-100 (2000), https://arxiv.org/abs/astro-ph/0008431

- Н.М. Липовка, А.А. Липовка, О.В. Верходанов, Е. Чавира, Исследование ярких источников с крутыми спектрами, Астрономический журнал, 77 (1), с. 3-6 (2000), DOI: https://doi.org/10.1134/1.163820
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, N.V. Verkhodanova, V.N. Chernenkov, Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, The software system "Evolution of radio galaxies", Astronomical and Astrophysical Transactions, 19 (3-4), p. 662-667 (2000), DOI: https://doi.org/10.1080/10556790008238611
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, N.V. Verkhodanova, V.N. Chernenkov, The informational system "Evolution of radio galaxies", in *Proc. of the International Workshop on Computer Science and Information Technologies. CSIT'2000. Ufa, Russia, September 18-23* (2000), volume 2, p. 235-239.
- O.V. Verkhodanov, H. Andernach, N.V. Verkhodanova, USS radio sources from the UTR-2 survey, Astronomy and Astrophysics Transactions, 19 (3-4), p. 542-549 (2000), DOI: https://doi.org/10.1080/10556790008238600
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, O.P. Zhelenkova, A.V. Temirova, J. Winn, A. Fletcher, B. Burke, RC J1148+0455 identification: gravitational lens or group of galaxies?, Astronomical and Astrophysical Transactions, 19 (3-4), p. 536-541 (2000), DOI: https://doi.org/10.1080/10556790008238599
- Yu.N. Parijskij, W.M. Goss, A.I. Kopylov, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, O.V. Verkhodanov, O.P. Zhelenkova, RATAN-600 - VLA - BTA-6m ("Big Trio") project: multicolour studying of distant radio galaxies, Astronomical and Astrophysical Transactions, 19 (3-4), p. 297-304, DOI: https://doi.org/10.1080/10556790008238579
- H.M. Tovmassian, V.H. Chavushyan, O.V. Verkhodanov, H. Tiersch, Radio emission of Shakhbazian compact galaxy groups,The Astrophysical Journal, 523 (1), p. 87-99 (1999), DOI: https://doi.org/10.1086/307726
- О.В. Верходанов, Н.В. Верходанова, Исследование отдельных источников в области 47 град. по склонению на РАТАН-600, Астрономический журнал, 76 (7), с. 483-494 (1999).
- С.Н. Додонов, Ю.Н. Парийский, В.М. Госс, А.И. Копылов, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, О.В. Верходанов, О.П. Желенкова, Спектроскопия пяти радиоисточников подвыборки RC объектов с крутыми спектрами, Астрономический журнал, 76 (5), с. 323-332 (1999).
- O. Cardona, N.M. Lipovka, A.A. Lipovka, E. Chavira, O.V. Verkhodanov, Radio and infrared activity of blue galaxies, The Universe as Seen by ISO, Ed. by P. Cox and M. F. Kessler (ESA-SP 427, 1999), p. 865, https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1999ESASP.427..865C
- А.М. Боташев, О.В. Верходанов, О. Кардона, Н.М. Липовка, А.А. Липовка, М.Г. Мингалиев, Е. Чавира, Исследование галактик в скоплении A1185 и его окрестностях, Астрономический журнал, 76 (2), с. 83-92 (1999).
- T. Pursimo, K. Nilsson, P. Teerikorpy, A. Kopylov, N. Soboleva, Yu. Parijskij, Yu. Baryshev, O. Verkhodanov, A. Temirova, O. Zhelenkova, W. Goss, A. Sillanpaa, L.O. Takalo, Optical morphology of distant RATAN-600 radio galaxies from subarcsecond resolution NOT images, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 134, p. 505-521 (1999), DOI: https://doi.org/10.1051/aas:1999152
- O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, Redshifts and age of stellar systems of distant radio galaxies from multicolour photometry data, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 48, p. 41-120 (1999), https://arxiv.org/abs/astro-ph/9910559
- Yu.N. Parijskij, W.M. Goss, O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, 5 radio sources of the Zenith survey at RATAN-600: VLA maps, radio spectra and optical identification, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 48, p. 5-16 (1999), https://arxiv.org/abs/astro-ph/9910383
- Yu.N. Parijskij, W.M. Goss, A.I. Kopylov, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, O.V. Verkhodanov, O.P. Zhelenkova, The program of distant radio galaxies at Special astrophysical observatory of Russia, Astronomical and Astrophysical Transactions, 18, p. 437-446 (1999), DOI: https://doi.org/10.1080/10556799908203000

- Yu.N. Parijskij, A.I. Kopylov, A.I. Kopylov, W.M. Goss, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, O.V. Verkhodanov, O.P. Zhelenkova, A.V. Chepurnov, RATAN-600 and the early Universe, Astronomical and Astrophysical Transactions, 18, p. 61-65 (1999), DOI: https://doi.org/10.1080/10556799908203035
- О.В. Верходанов, С.А. Трушкин, Отождествление радиоизлучающих IRAS-источников. I. IRAS F02044+0957 - система взаимодействующих галактик?, в *Труды Всероссийской конференции "Астрофизика на рубеже веков", 17-22 мая, ПРАО*, под ред. Н.С.Кардашева, Р.Д. Дагкесаманского и Ю.А. Ковалева (Астрокосмический центр ФИАН, 1999), с. 557-564.
- О.В. Верходанов, А.И. Копылов, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, О.П. Желенкова, А.В. Темирова, Дж. Уинн, А. Флетчер, Б. Берк, О природе радиоисточника RC B1146+052: радиоспектр, структура компонентов и оптическое отождествление, в *Труды Всероссийской конференции "Астрофизика на рубеже веков", 17-22 мая, ПРАО*, под ред. Н.С.Кардашева, Р.Д. Дагкесаманского и Ю.А. Ковалева (Астрокосмический центр ФИАН, 1999), с. 549-556.
- T. Pursimo, K. Nilsson, P. Teerikorpy, A. Kopylov, N. Soboleva, Yu. Parijskij, Yu. Baryshev, O. Verkhodanov, A. Temirova, O. Zhelenkova, W. Goss, Optical morphology of distant RATAN-600 radio galaxies, in *"Radioastronomical Researches", Proc. VIII Russian-Finnish Symp. on Radioastronomy, June 28-July 3, 1999, St.Petersburgm* (Main Astron. Observatory RAS, 1999), p. 95-98.
- Ю.Н. Парийский, В.М. Госс, А.И. Копылов, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, О.В. Верходанов, О.П. Желенкова, Завершение оптического отождествления объектов выборки RC-каталога с ультракрутыми спектрами и оценка их красных смещений, Астрономический журнал, 75 (4), с. 483-497 (1998).
- O. Verkhodanov, H. Andernach, N.V. Verkhodanova, N. Loiseau, Radio Spectra and NVSS Maps of Decametric Sources, in *Proc. Observational Cosmology with the New Radio Surveys*, Ed. by M. Bremer, N. Jackson and I. P'erez-Fournon (ISBN 0-7923-4885-0, Kluwer Acad. Publ., ASSL, 1998), 226, p. 255-256, DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-011-5238-9_44
- Yu. Parijskij, A. Kopylov, N. Soboleva, O. Verkhodanov, A. Temirova, O. Zhelenkova, P. Tcibulev, A. Chepurnov, V. Stolyarov and N. Bursov, "Dark ages" of the univese, in *"Current Topics in Astrofundamental Physics: Primordial Cosmology", Erice, Italy, 4-15 Sept., 1997*, Ed. by N. Sancher and A. Zidini (Kluwer Academic Publisher, 1998), p. 443-466.
- О.В. Верходанов, Введение в "компьютерную" астрономию, в сб. *"Буковские лекции по асторофизике 1997 г." Материалы IV школы победителей Астрономических олимпиад*, под ред. О.В.Верходанова (Нижний Архыз, САО РАН, 1998), с. 55-63.
- О.В. Верходанов, А.И. Копылов, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, Цветовые возрасты родительских галактик далеких радиоисточников, в кн. *"Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Тезисы докл. XV конф., 25-29 мая, 1998 г. в Пущино* (Пущинский научный центр, 1998), с. 22-24.
- О.В. Верходанов, Н.В. Верходанова, Новые данные по Зенитному обзору на РАТАН-600, в кн. *"Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Тезисы докл. XV конф., 25-29 мая, 1998 г. в Пущино* (Пущинский научный центр, 1998), с. 18-22.
- О.В. Верходанов, Х. Андернах, Н.В. Верходанова, О свойствах декаметровых источников (по отождествлениям в базе данных CATS), в кн. *"Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Тезисы докл. XV конф., 25-29 мая, 1998 г. в Пущино* (Пущинский научный центр, 1998), с. 15-18.
- H. Andernach, O. Verkhodanov, N. Verkhodanova, N. Loiseau, Search for AGN at low frequency: UTR source identification, in *Abstract Book of XXIII IAU General Assembly, Kyoto, Japan*, p. 139, Abstract S183-048P.
- S.A. Trushkin, O.V. Verkhodanov, Cross-identification of the IRAS Point-Source and Texas catalogs of radio sources, Baltic Astronomy, 6 (2), p. 345-346 (1997), DOI: https://doi.org/10.1515/astro-1997-0257
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, V.N. Chernenkov, CATS: a database system of astrophysical catalogues, Baltic Astronomy, 6 (2), p. 275-278 (1997), DOI: https://doi.org/10.1515/astro-1997-0224
- H. Andernach, S.A. Trushkin, A.G. Gubanov, O.V. Verkhodanov, V.B. Titov, A. Micol, Preparing a public database of radio sources, Baltic Astronomy, 6 (2), p. 259-262 (1997), DOI: https://doi.org/10.1515/astro-1997-0220

- Y.N. Parijskij, W.M. Goss, A.I. Kopylov, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, O.V. Verkhodanov, O.P. Zhelenkova, The Program of Distant Radio Galaxies in Special Astrophysical Observatory of Russia, in *Joint European and National Astronomical Meeting, JENAM-97. 6th European and 3rd Hellenic Astronomical Conference, held in Thessaloniki, Greece, 2-5 July, 1997* (1997), Meeting Abstract, id. 202.
- A.M. Botaschev, N.O. Cardona, N.E. Chavira, N.M. Lipovka, A.A. Lipovka, M.G. Mingaliev, O.V. Verkhodanov, Investigation of A1185 cluster and its vicinity, in *Joint European and National Astronomical Meeting, JENAM-97. 6th European and 3rd Hellenic Astronomical Conference, held in Thessaloniki, Greece, 2-5 July, 1997* (1997), Meeting Abstract, id. 183.
- O.V. Verkhodanov, S.A. Trushkin, H. Andernach, V.N. Chernenkov, The CATS database to operate with astrophysical catalogs, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt amd H.E. Payne (ASP Conference Series, 1997), 125, p. 322-325, `https://arxiv.org/abs/astro-ph/9610262`
- V.S. Shergin, O.V. Verkhodanov, V.N. Chernenkov, B.L. Erukhimov, V.L. Gorokhov, Non-parametric algorithms in data reduction at RATAN-600, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H.E. Payne (ASP Conference Series, 1997), 125, p. 182-185, `https://www.cv.nrao.edu/adass/adassVI/verkhodanov2.html`
- O.V. Verkhodanov, Multiwaves continuum data reduction at RATAN-600, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H.E. Payne (ASP Conference Series, 1997), 125, p. 46-49, `https://www.cv.nrao.edu/adass/adassVI/verkhodanov1.html`
- Х. Андернах, О.В. Верходанов, Н. Лоасоо, NVSS карты источников каталога УТР, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 334-335.
- О.В. Верходанов, Х. Андернах, Н.В. Верходанова, Результаты многочастотных отождествлений источников каталога УТР, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 338-339.
- О.В. Верходанов, Х. Андернах, Н.В. Верходанова, Интерактивное построение спектров радиоисточников каталога УТР, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 330-331.
- С.А. Трушкин, О.В. Верходанов, Спектры и статистические свойства объектов ITA-каталога, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 328-329.
- О.В. Верходанов, С.А. Трушкин, Кросс-идентификация Техасского каталога на 365 МГц и трех основных каталогов спутника IRAS, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 332-333.
- С.А. Трушкин, О.В. Верходанов, В.Н. Черненков, База данных астрофизических каталогов CATS - инструмент галактических и внегалактических исследований, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 336-337.
- В.Н. Черненков, О.В. Верходанов, С.А. Трушкин, Система поиска астрофизической информации в базе данных CATS, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 324-325.
- О.В. Верходанов, В.К. Кононов, С.А. Трушкин, В.Н. Черненков, Система описания данных галактических и внегалактических источников, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 316-317.
- О.В. Верходанов, Интерактивная система построения и обработки континуальных спектров радиоисточников, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 322-323.

- О.В. Верходанов, Н.В. Верходанова, Новые данные по Зенитному обзору в области 47 градусов: наблюдения 1995г. на РАТАН-600, NVSS и АРМ отождествления, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 195-196.
- Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, А.И. Копылов, О.В. Верходанов, Подборка предельно далеких объектов во Вселенной (состояние на 1996 г.), в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 154-155.
- Ю.Н. Парийский, В.М. Госс, А.И. Копылов, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, О.В. Верходанов, О.П. Желенкова, Природа радиоисточников RC каталога: оценки красных смещений и физических условий в объектах программы "Большое Трио", в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 193-194.
- О.В. Верходанов, О. Кардона, Н.М. Липовка, А.А. Липовка, Е. Чавира, Оптические отождествления радиообъектов в области неба с обилием голубых галактик, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 213-214.
- А.М. Боташев, О.В. Верходанов, О. Кардона, Н.М. Липовка, А.А. Липовка, М.Г. Мингалиев, Е. Чавира, Исследование галактик в скоплении A1185 и его окрестностях, в кн. *"Проблемы современной радиоастрономии", Материалы XXVII Радиоастрономической конференции, С.-Петербург, Институт Прикладной Астрономии (ИПА) РАН* (1997), т.1, с. 164-165.
- O.V. Verkhodanov, V.N. Chernenkov, S.A. Trushkin, Furter advance in the CATS database operation. First year of WWW access, in *Proc. of the First East-Europian Symposium on Advances in Databases and Information Systems (ADBIS'97), Санкт-Петербургский университет, Сентябрь 2-5, 1997* (Издательство "Невский Диалект", 1997), 1, p. 73-77.
- А. Флетчер, С. Коннер, Ф. Крофорд, Дж. Картрайт, Б. Берк, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, А.И. Копылов, А.В. Темирова, О.В. Верходанов, М.Н. Наугольная, Объекты RC-каталога. Отождествление с точностью выше 1"по Паломарским отпечаткам с использованием VLA карт их архива Массачусетского технологического института, Астрономический журнал, 73 (6), с. 835-843 (1996).
- S.A. Trushkin, H. Andernach, A. Micol, A.G. Gubanov, O.V. Verkhodanov, V.B. Titov, V.N. Chernenkov, Public Databases for Radio Astronomy: a joint venture between East and West, in *Proc. of the Third International Workshop on "Advances in Databases and Information Systems", 1996, Sept.10-13* (Moscow Engineering Physical Inst. Publishing, 1996), 2, p. 37-41.
- Y.N. Parijskij, N.S. Soboleva, W.M. Goss, A.I. Kopylov, O.V. Verkhodanov, A.V. Temirova, O.P. Zhelenkova, The RATAN-600 - VLA - 6m Russian telescope: Early Universe Project, in *Extragalactic radio sources: proceedings of the 175th Symposium of the International Astronomical Union, held in Bologna, Italy, 10-14 October 1995*, Ed. by Ron D. Ekers, C. Fanti, and L. Padrielli (Published by Kluwer Academic Publishers, 1996), p. 591.
- O.V. Verkhodanov, On one algorithm of fitting of the function, preassigned by table, to tabular defined points, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 41, p. 149-151 (1996), `https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/41.pdf`
- Yu.N. Parijskij, N.S. Soboleva, O.V. Verkhodanov, A.I. Kopylov, O.P. Zhelenkova, On observations of diffuse optical emission along the axis of double radio sources of RC catalog at the 6 m optical telescope, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 40, p. 125-127 (1996), `https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/40.pdf`
- Yu.N. Parijskij, W.M. Goss, A.I. Kopylov, N.S. Soboleva, A.V. Temirova, O.V. Verkhodanov, O.P. Zhelenkova, M.N. Naugolnaya, Investigation of RATAN-600 RC radio sources, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 40, p. 5-124 (1996), `https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/40.pdf`
- O.V. Verkhodanov, V.L. Gorokhov, On the properties of the extremal-median detector of faint radio sources of the indefinite shape, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 39, p. 155-160 (1996), `https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/39.pdf`

- S.A. Trushkin, O.V. Verkhodanov, On the cross-identification of the IRAS-Point Source and Texas catalogs, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 39, p. 150-154 (1996), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/39.pdf
- O.V. Verkhodanov, V.K. Kononov, V.N. Chernenkov, The methods and facilities of astrophysical experiments support in the SAO RAS. Short review of the problems, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 39, p. 146-149 (1996), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/39.pdf
- А.И. Копылов, В.М. Госс, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, О.П. Желенкова, В.В. Витковский, М.Н. Наугольная, О.В. Верходанов, Оптические отождествления подвыборки радиоисточников RC-каталога с крутыми спектрами с помощью 6-метрового телескопа САО РАН: Оптические наблюдения, Астрономический журнал, 72 (5), с. 613-629 (1995).
- Копылов А.И., Госс В.М., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Темирова А.В., Желенкова О.П., Витковский Вал.В., Наугольная М.Н., Верходанов О.В. Оптические отождествления подвыборки радиоисточников RC-каталога с крутыми спектрами с помощью 6-метрового телескопа САО РАН. Требования к координатной точности и глубине изображения, наблюдения на VLA и фотометрические методы оценки красного смещения, Астрономический журнал, 72 (4), с. 437-446 (1995).
- Y.N. Parijskij, N.S. Soboleva, W.M. Goss, A.I. Kopylov, O.V. Verkhodanov, A.V. Temirova, O.P. Zhelenkova, The RATAN-600 - VLA - 6m Russian telescope Early Universe Project, in *Proceed. of 175th IAU Symposium "Extragalactic radio sources"*, Ed. by R. Ekers, C. Fanti, L. Padrielli (Italy, Bologna, Kluwer Academic Publishes, 1995), p. 591-592.
- В.Л. Горохов, О.В. Верходанов, Об уточнении полноты радиообзоров и радиокаталогов за счет статистического имитационного моделирования процесса обзора, Письма в Астрономический журнал, 20 (10), с. 776-780 (1994), https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1994AstL...20..671G
- О.В. Верходанов, Исследование объектов Зенитного обзора 1988 г, Астрономический журнал, 71 (3), с. 352-359 (1994).
- Yu.N. Parijskij, O.V. Verkhodanov, G.A. Pinchuk, A.T. Bajkova, A.Ya. Golnev, N.A. Esepkina, Yu.N. Zverev, E.K. Majorova, M.G. Mingaliev, L.V. Opeikina, A.A. Stotskij, A.V. Temirova, P.A. Fridman, Radio telescope RATAN-600 in the "Zenith" mode, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 38, p. 58-12 (1994), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/38.pdf
- Y.N. Parijskij, G.A. Pinchuk, O.V. Verkhodanov, V.B. Khaikin, Y.K. Zverev, G.V. Zhekanis, RATAN-600 as a MM-Array, in *Astronomy with Millimeter and Submillimeter Wave Interferometry, IAU Colloquium 140*, Ed. By M. Ishiguro and J. Welch (ASP Conference Series, 1994), 59, p. 392, https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1994amsw.conf..392P
- V.B. Khaikin, O.V. Verkhodanov, Results of simulation of two-dimensional beam pattern and parameters of RATAN-600 radio telescope in comparison with the experiment, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 36, p. 166-176 (1993), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/36.pdf
- O.V. Verkhodanov, B.L. Erukhimov, M.L. Monosov, V.N. Chernenkov, V.S. Shergin, Basic principles of flexible astronomical data processing system in UNIX environment, Bulletin of the Special Astrophysical Observatory RAS, 36, p. 132-137 (1993), https://www.sao.ru/Doc-en/Science/Public/Bulletin/V1-57/36.pdf
- Y.N. Parijskij, B.L. Erukhimo, M.G. Mingaliev, V.N. Chernenkov, O.V. Verkhodanov, A.V. Chepurnov, RATAN-600 and CMB anisotropy: new RATAN-600 limits, Highlights of Astronomy, 9, p. 327 (1992).
- Yu.N. Parijskij, G.A. Pinchuk, O.V. Verkhodanov, V.B. Khaikin, Yu.K. Zverev, G.V. Zhekanis, RATAN-600 as mm-ARRAY, in *Proceedings of IAU Colloquium 140. Astronomy with millimeter and submillimeter wave interferometry, Japan, 1992*, Ed. by M. Ishiguro and Wm. Welch. Hakone (Published Astron. Soc. of the Pacific, 1994), p. 392-397.
- М.Г. Мингалиев, О.В. Верходанов, А.Р. Хабрахманов, Зенитный обзор 1988г. на РАТАН-600 на длине волны 8.0 см, Письма в Астрономический журнал, 17 (9), с. 787-793 (1991).
- М.Г. Мингалиев, О.В. Верходанов, А.Р. Хабрахманов, В.Я. Гольнев А.В. Темирова, Зенитный обзор 1988г. на РАТАН-600 на длине волны 8.0 см, Сообщения САО, 68, с. 47-54 (1991).

- Н.Н. Бурсов, О.В. Верходанов, Б.Л. Ерухимов, Н.М. Липовка, Т.Б. Пятунина, Н.С. Соболева, А.В. Темирова, В.Н. Черненков, Применение метода сечений для определения параметров радиоисточников в режиме неподвижного фокуса на РАТАН-600, Известия САО АН СССР, No 28. с. 136-148 (1989).
- Yu.N. Parijskij, B.L. Erukhimov, M.G. Mingaliev, A.B. Berlin, N.N. Bursov, N.A. Nizhelskij, M.N. Naugolnaya, V.N. Chernenkov, O.V. Verkhodanov, A.V. Chepurnov, A.A. Starobinskij, Discovery of the small scale anisotropy at 2.7 cm: radio sources or relic emission?, in *"Observational tests of inflation". Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Durham UK, 1990* (Kluwer Academic Publishers, 1991) p. 437-442.

СПИСОК ВИДЕО-ЛЕКЦИЙ

ЛЕКЦИИ ФОНДА ТРАЕКТОРИЯ (youtube-канал)

Астрофизическая школа Траектория (АФШ)

- 7ая АФШ, САО РАН, Нижний Архыз, 10/08/2019, Космология и антропный принцип, https://www.youtube.com/watch?v=h4JCqrDfOCY&t=506s
- 6ая АФШ, Ереван, 29/03/2019, Реликтовое излучение и элементарные частицы, https://www.youtube.com/watch?v=BydXsFjnZ_Q
- 6ая АФШ, Ереван, 28/03/2019, К 140-летию Альберта Эйнштейна, https://www.youtube.com/watch?v=UO-nKOxluw4
- 5ая АФШ, Университет Турку, 20/08/2018, Космологические тесты III: реликтовое излучение, https://www.youtube.com/watch?v=CaA3pVqGdXk
- 5ая АФШ, Университет Турку, 18/08/2018, Космологические тесты II: современные тесты, https://www.youtube.com/watch?v=yHelB1euFO4
- 5ая АФШ, Университет Турку, 18/08/2018, Космологические тесты I: классические тесты, https://www.youtube.com/watch?v=yTbi4cZO59M
- 4ая АФШ, ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, 6/04/2018, Нобелевские премии по астрофизике.Что в них поучительного? https://www.youtube.com/watch?v=O7dtznUPxv4
- 4ая АФШ, ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, 7/04/2018, Радиоинтерферометрия, https://www.youtube.com/watch?v=mSB24sskJe8
- 4ая АФШ, ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, 3/04/2018, Хочу быть астрономом. Что делать? https://www.youtube.com/watch?v=6qQPmgcI1Io
- 3я АФШ, САО РАН, Нижний Архыз, 15/08/2017, Часть 3. Карты реликтового излучения в разных вселенных, https://www.youtube.com/watch?v=6Ey8lJodIaY
- 3я АФШ, САО РАН, Нижний Архыз, 9/08/2017, Часть 2. Космология видимой вселенной, https://www.youtube.com/watch?v=2IHbF8ctG_Y
- 3я АФШ, САО РАН, Нижний Архыз, 9/08/2017, Часть 1. Рождение и эволюция невидимой вселенной, https://www.youtube.com/watch?v=IVVzoyRNRkU
- 3я АФШ, САО РАН, Нижний Архыз, 7/08/2017, Как читать астрономические данные, https://www.youtube.com/watch?v=4vpSvqNzcDs
- 2ая АФШ, Коуровская обсерватория, 7/04/2017, Как сгенерировать природный шум, https://www.youtube.com/watch?v=Om77OVraRqA
- 2ая АФШ, Коуровская обсерватория, 9/04/2017, Астрофизика. Лекция 3: "Электромагнитный спектр", https://www.youtube.com/watch?v=eUOh0A5hMgU
- 2ая АФШ, Коуровская обсерватория, 7/04/2017, Астрофизика. Лекция 2: "Сложные системы", https://www.youtube.com/watch?v=hLBVaqib1Ps
- 2ая АФШ, Коуровская обсерватория, 6/04/2017, Астрофизика. Лекция 1: "Вращение", https://www.youtube.com/watch?v=umf-dIqRIdE
- 1ая АФШ, САО РАН, Нижний Архыз, 19/08/2016, Современная космология, https://www.youtube.com/watch?v=pfipBBeYNKI
- 1ая АФШ, САО РАН, Нижний Архыз, 17/08/2016, Радиогалактики, https://www.youtube.com/watch?v=XWDqmXOV9ck

Публичные лекции, научные гостиные Фонда Траектория и другое

- Москва, Фонд Траектория, III семинар учителей, 5/01/2020, Нобелевская премия по астрофизике 2019г. Филлип Джеймс Пиблс, https://www.youtube.com/watch?v=jH8fFFgKg1I&t=866s
- Москва, Фонд Траектория, 5/01/2020, Вопрос лектору, https://www.youtube.com/watch?v=vcXQv_JikRc
- Санкт-Петербург, Yota Lab, Планетарий 1, 18/11/2018, Реликтовое излучение как основной космологический тест, https://www.youtube.com/watch?v=oHxyY1bu8J8
- Санкт-Петербургский губернаторский физ.-мат. лицей No 30, 18/11/2018, Космология и цивилизация, https://www.youtube.com/watch?v=A38Wcb5ge7g
- Снегири, Московская обл., Астрофест 2018, 21/04/2018, Научная гостиная "Открытия в новых областях астрономии и цивилизация", https://www.youtube.com/watch?v=7AoFNpNiOWo
- Санкт-Петербург, Интеллектуальное пространство "Зануда", 15/11/2017, Генетический код Вселенной, https://www.youtube.com/watch?v=juOvBBOyBqs
- Санкт-Петербург, Президентский физико-математический лицей No 239, 24/04/2017, Реликтовое излучение Вселенной: драмы и победы, https://www.youtube.com/watch?v=joH1CD2wTJ8
- Снегири, Московская обл., Астрофест 2017, 23/04/2017, Научная гостиная "Жизнь во Вселенной", https://www.youtube.com/watch?v=9A08AGJ3sKo
- Москва, Культурно-просветительский центр "Архэ", 21/04/2017, Современная космология: взгляд радиоастронома, https://www.youtube.com/watch?v=z2HOfRceNLs

Тематические мини-лекции "Научный экспресс" Фонда Траектория

- Москва, Фонд Траектория, 12/06/2019 (запись 05/10/2017), Удивительная Радиовселенная. Лекция 6. Современная картина Мира, https://www.youtube.com/watch?v=Idyhdagy_5I
- Москва, Фонд Траектория, 27/05/2019 (запись 05/10/2017), Удивительная Радиовселенная. Лекция 5. Реликтовое излучение. Дополнение, https://www.youtube.com/watch?v=j8kAWlTU1N8
- Москва, Фонд Траектория, 12/05/2019 (запись 05/10/2017), Удивительная Радиовселенная. Лекция 4. Реликтовое излучение, https://www.youtube.com/watch?v=uWb-hOsgmyQ
- Москва, Фонд Траектория, 28/04/2019 (запись 05/10/2017), Удивительная Радиовселенная. Лекция 3. Радиогалактики, https://www.youtube.com/watch?v=OFX-iiGCUSo
- Москва, Фонд Траектория, 19/04/2019 (запись 05/10/2017), Удивительная Радиовселенная. Лекция 2. Механизмы радиоизлучения, https://www.youtube.com/watch?v=JyrhskbFNuI
- Москва, Фонд Траектория, 12/04/2019 (запись 05/10/2017), Удивительная Радиовселенная. Лекция 1. Радиоастрономия и радиотелескопы, https://www.youtube.com/watch?v=oiKXOVwAMYc

ЛЕКЦИИ ИЗДАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТА "ПОСТНАУКА" (youtube-канал)

- Авторский раздел https://postnauka.ru/themes/verkhodanov
- 26/06/2019, Как увидеть Вселенную, https://www.youtube.com/watch?v=dC3ihOnWdIw
- 26/06/2019, Космологические принципы, https://www.youtube.com/watch?v=-CAIZYgYl_M&t=47s
- 26/06/2019, Астрономические ошибки, https://www.youtube.com/watch?v=WmGkW6Af9bM
- 17/05/2019, Интервью "Что я знаю - Как мы наблюдаем Вселенную", https://www.youtube.com/watch?v=CoTksc2utok
- 2014-2018, курс "Реликтовое излучение" (с включением лекций Д.С. Горбунова, В.А. Рубакова, А.А. Старобинского), https://www.youtube.com/watch?v=Q655Siyo9h4
- 15/11/2018, Великое закрытие реликтовых гравитационных волн,

https://www.youtube.com/watch?v=IAh9fvT2M3E

- 15/11/2018, Реликтовое излучение как универсальный код, https://www.youtube.com/watch?v=WusB47NhoL0
- 15/11/2018, Карта неоднородностей реликтового излучения, https://www.youtube.com/watch?v=8B3FPwlYIno
- 15/11/2018, Главный космологический тест, https://www.youtube.com/watch?v=r6CGmAtTNgc
- 15/11/2018, История исследований реликтового излучения, https://www.youtube.com/watch?v=rWuv6hv7bhc
- 8/09/2018, Наблюдательные тесты космологии и стандартный спектр, https://www.youtube.com/watch?v=pyrjOPVn0oc
- 8/09/2018, Астрономия в повседневности, https://www.youtube.com/watch?v=Dt2Kgnn-fJk
- 8/09/2018, Нестыковки в космологии, https://www.youtube.com/watch?v=leIP1crnqcA
- 8/09/2018, Гигантские радиогалактики, https://www.youtube.com/watch?v=Q_DLcDGhBfY
- 11/2014, Аномалии реликтового излучения, https://www.youtube.com/watch?v=zG7l61f84Ug
- 11/2014, Стандартная космологическая модель, https://www.youtube.com/watch?v=mRrsaareLSM
- 11/2014, Радиогалактики, https://www.youtube.com/watch?v=NE0ZP8-uMR4

ФЕСТИВАЛЬ НАУК, ИССКУСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ ФЕНИСТ, НИЖНИЙ НОВГОРОД (youtube-канал)

- Фенист 2019, 29/09/2019, Как мы наблюдаем Вселенную, https://www.youtube.com/watch?v=lygEM_jv2X0
- Фенист 2019, 28/09/2019, Современные задачи космологии, https://www.youtube.com/watch?v=3eN7ekuWhrc
- Фенист 2018, 09/2018, Точная наука - наблюдательная космология, https://www.youtube.com/watch?v=s-0jRVPFGQg
- Фенист 2018, 09/2018, круглый стол “Как добываются научные знания”, https://www.youtube.com/watch?v=7Fp1tAGq5ds
- Фенист 2017, 09/2017, Поиск объектов с ЗС эффектом по данным миссии Planck, https://www.youtube.com/watch?v=_C6ZQ0b8yLQ
- Фенист 2017, 09/2017, Загадки современной космологии, https://www.youtube.com/watch?v=klSZYDoUZ0U
- Фенист 2017, 09/2017, Генетический код Вселенной, https://www.youtube.com/watch?v=OU3CeCdD5J4
- Фенист 2017, 09/2017, Реликтовое излучение: история происхождения всего, https://www.youtube.com/watch?v=IHKlhGJnC2E
- Фенист 2016, 09/2016, Космологические результаты космической миссии Planck, https://www.youtube.com/watch?v=3XmtOfclHZI
- Фенист 2016, 09/2016, Удивительная Вселенная, https://www.youtube.com/watch?v=b_SAZ-xTcCM
- Фенист 2016, 09/2016, Радиогалактики, https://www.youtube.com/watch?v=ejHVOP3Ii0Y

КАВКАЗСКИЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР (youtube-канал)

- Майкоп, АГУ, Осенние математические чтения, 18/10/2019, Можно ли согласовать модель Вселенной или нестыковки в космологии, https://www.youtube.com/watch?v=laqyK1MKgCw&t=1s
- Майкоп, IV Астрономический фестиваль, АГУ, РЕМШ, 21/05/2019, Открытия в астрофизике XXI века, https://www.youtube.com/watch?v=BNGgW7uHiBU

- Майкоп, Адыгейский государственный университет, 08/02/2019, История Вселенной: из прошлого в будущее, https://www.youtube.com/watch?v=AYlatFan0xg
- Майкоп, Адыгейский государственный университет, 08/02/2019, Одиноки ли мы во Вселенной?, https://www.youtube.com/watch?v=HSdZC3vl6Dk
- Майкоп, Адыгейский государственный университет, 20/12/2018, Математика и космос, https://www.youtube.com/watch?v=FmjZyug2g8o

ДРУГОЕ

- Москва, Космо-лекторий, сообщество “Твой сектор космоса”, в Центре развития на Таганке, 01/03/2020, Реликтовое излучение: ключ к пониманию Вселенной, https://www.youtube.com/watch?v=f7H4O7h2kl8
- Ярославль, Ярославский ГУ им.П.Г.Демидова, 28/02/2020, Как устроена Вселенная?, https://www.youtube.com/watch?v=4Z_NVsw-9g4
- Москва, Филлиповская школа, 4/10/2019, Вселенная Эйнштейна,
  Часть 1, https://www.youtube.com/watch?v=Vsb-JSQOYn8,
  Часть 2, https://www.youtube.com/watch?v=4s8cc16syOs,
  Часть 3, https://www.youtube.com/watch?v=Ss5ooH_wt7E,
  Часть 4, https://www.youtube.com/watch?v=u2QRtVZ1OTo
- Канал “Архыз 24”, 14/08/2019, Прямая речь, https://www.youtube.com/watch?v=zV2YLqUjCq8
- Санкт-Петербург, Люмьер-Холл Планетария No 1, лекция в рамках Международного фестиваля документального кино “Мир Знаний”, 18/11/2018, Что происходит в наблюдательной космологии? (Лаборатория Научных Видео, Проект “Щепотка соли”, https://vk.com/granumsalis), https://www.youtube.com/watch?v=NIdV7th2NS8
- Санкт-Петербург, ГБОУ лицей №214, 17/11/18, Что мы знаем о Вселенной и зачем нам это нужно?, https://www.youtube.com/watch?v=_jyXnFbma3E
- Москва, Филипповская школа, 8/10/2018, История Вселенной и цивилизация, https://vk.com/wall-122174973_333
- Москва, библиотека Ф.М.Достоевского, 9/11/2017, Генетический код Вселенной, https://www.youtube.com/watch?v=EZMavJIQYzs
- Москва, Роскосмос ТВ, 7/7/2017, Лопнет ли Вселенная?, https://www.youtube.com/watch?v=UKpSj5WMWuY
- Москва, Культурно-просветительский центр “Архэ”, 21/04/2017, Современная космология: взгляд радиоастронома, https://www.youtube.com/watch?v=boFUvQqW_S0
- Краснодар, Научно-просветительский форум “REvolution”, Краснодарский выставочный зал, 3/10/2016, Загадки современной космологии, https://www.youtube.com/watch?v=qfwqvxiwznc
- “Элементы” большой науки, пос. Поведники, IX Конференция лауреатов Всероссийского конкурса учителей математики, физики, химии и биологии фонда Дмитрия Зимина “Династия”, 7/07/2013, Современная космологическая модель: откуда мы это знаем?,
  (Коллекция https://elementy.ru/video/a/5273393/Oleg_Vasilevich_Verkhodanov на Элементах), https://www.youtube.com/watch?v=K_cZCdes4R4

Научно-популярное издание
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

О. ВЕРХОДАНОВ. СБОРНИК ИЗБРАННЫХ ТРУДОВ.

О.В. Верходанов – астрофизик, космолог и популяризатор науки

Подбор статей: д.ф.-м.н. Трушкин С.А.,
к.ф.-м.н. Сотникова Ю.В.
Дизайн обложки: Верходанова В.О.
Работа с фотоархивом,
раздел «Воспоминания»: Верходанова Н.В.
Предисловие: д.ф.-м.н. Трушкин С.А.
Технические редакторы: Черепкова Ю.В.,
к.ф.-м.н. Кайсина Е.И.
Верстка макета: Черепкова Ю.В.

9 785604 506226

ISBN 978-5-6045062-2-6

Знак информационной продукции
(Федеральный закон №436-ФЗ от 29.12.2010 г.):

12+

Заказ № 389241
Подписано в печать 26.04.2025. Формат 72x104/16
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 29. Тираж 100 экз.

Изготовлено ИП Решетиленко П.А.
Россия, Ставропольский край, 357500 г. Пятигорск, ул. Делегатская, 97.
Тел.: 8 (928) 634 29 47
E-mail: sneg@sneg-design.ru.

2025 г.