ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА»

Физический факультет

Кафедра физики частиц и космологии

Пространственная структура протяженного микроволнового излучения из области центра Галактики

Реферат

Жежер Яны Валерьевны

Научный руководитель:

профессор, д. ф.-м. н. В.В. Белокуров

Зав. кафедрой

физики частиц и космологии

профессор, д. ф.-м. н. В.А. Рубаков

Москва

2015

Содержание

1 Введение **2**

1.1 Протяженное микроволновое излучение в области центра Галактики . . 2

1.2 Пузыри Ферми 3

1.3 Возможные объяснения “дымки” WMAP и связь с пузырями Ферми . . 4

2 Данные **5**

2.1 Тормозное излучение 6

2.2 Синхротронное излучение 7

2.3 Тепловое излучение пыли 8

2.4 Карты микроволнового излучения спутника Planck 9

3 Анализ данных **10**

3.1 Системы пикселизации неба 10

3.2 Метод минимизации при помощи шаблонов 14

3.3 Шаблон для WMAP/Planck haze 15

3.4 Маска 16

4 Результаты **17**

4.1 Асимметрия север-юг 18

4.2 Наличие подструктур 19

4.3 Размеры WMAP/Planck haze 19

5 Выводы **20**

Список литературы **22**

1 Введение

1.1 Протяженное микроволновое излучение в области центра Галактики

Осенью 2001 года был запущен космический аппарат WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) с целью провести точные измерения анизотропии реликтового излучения, необходимые для космологических исследований – определения геометрии, состава и эволюции Вселенной [1]. Основной продукт спутника WMAP – полные карты неба (full-sky maps) на пяти различных частотах (23 ГГц, 33 ГГц, 41 ГГц, 61 ГГц, 94 ГГц). Данные WMAP могут использоваться не только для исследования реликтового микроволнового излучения, но и для анализа излучения галактической среды. Считается, что основной вклад в излучение дают ионизованный газ, синхротронное излучение и тепловое излучение пыли. Для описания этих механизмов на данный момент существуют теоретические модели, на основе которых можно построить карту для каждого конкретного типа излучения. Сумма карт всех компонент излучения Галактики в сумме с картой температур реликтового излучения за вычетом центральной части Млечного Пути и точечных источников должна в пределах погрешности совпадать с экспериментально полученной картой неба на данной частоте, если предложенные модели полностью описывают действительность.

В 2003 году были обнародованы первичные данные WMAP, и при их анализе изложенным выше способом Д.П. Финкбейнер обнаружил остаточное излучение из центра Галактики, впоследствии названное “дымкой” – “haze” (WMAP haze, после подтверждения спутником Planck – WMAP/Planck haze) [2], рис. 1. Полученное излучение оказалось радиально-симметричным, простирающимся вне области Галактики примерно на 20^o, с жестким спектром ($E^2 DN/DE \propto E^{0.1-0.2}$).

На данный момент однозначного объяснения механизма WMAP haze не существует, а описать его с помощью стандартных галактических процессов не удается. Тормозное излучение от горячего газа исключается из-за отсутствия линии поглощения $H\alpha$ (переход из $n = 3$ в $n = 2$ в атоме водорода) и излучения в рентгеновском диапазоне. Другие механизмы – горячая пыль и синхротронное излучение не подтверждаются исследованиями на низких частотах [3].

В окончательных результатах коллаборации WMAP не подтвердилось наличие “дымки” в области центра Галактики [4]. Такой результат не согласуется с исследо-

ваниями коллаборации Planck [5], в которых протяженное микроволновое излучение вблизи центра Галактики наблюдается. Разногласия могут быть связаны с тем, что используются разные модельные предположения о механизмах излучения межзвездной среды.

1.2 Пузыри Ферми

В 2008 году был запущен спутник Fermi с космическим телескопом LAT (Fermi Gamma-ray Large Area Space Telescope) для изучения, с низкой околоземной орбиты, всего неба в диапазоне гамма-излучения: от 20 МэВ до 500 ГэВ [6]. Объектами наблюдения Fermi LAT являются: активные ядра галактик, гамма-всплески, пульсары, магнетары и остатки сверхновых, галактика Млечный путь, Солнечная система и другие высокоэнергетические источники гамма-излучения.

На энергиях порядка 1 ГэВ основную часть излучения вблизи плоскости Галактики составляют фотоны, образовавшиеся в результате распада π^0-мезонов, которые, в свою очередь, являются продуктами взаимодействия космических лучей (в основном электронной компоненты) с ионизованным водородом межзвездной среде. Кроме того наблюдаются обратное комптоновское рассеяние и тормозное излучение (bremsstrahlung), образованное взаимодействием электронов с частицами межзвездного вещества (протонами и другими более тяжелыми ядрами). По данным Fermi LAT можно построить полные карты неба для различных интервалов энергий и провести процедуру, аналогичную анализу WMAP – вычесть шаблоны, построенные на основе известных механизмов излучения.

В 2010 году таким образом M. Cy и другими были обнаружены “пузыри” Ферми (Fermi bubbles) [7] – радиально-симметричное относительно центра Галактики излучение, простирающееся вне ее плоскости на 50° (рис. 2) со спектром $dN/dE \sim E^{-2}$, жестче чем спектр диффузного гамма-излучения от Галактического диска [8].

Недавние исследования коллаборации Fermi LAT [9], основанные на анализе данных 50 месяцев функционирования телескопа Ферми подтвердили результаты M. Cy. В работе [9] проведен учет систематических ошибок и рассмотрены различные подходы к моделированию диффузного излучения. Были получены пространственная и спектральная структура пузырей Ферми, их граница, а само излучение “пузырей” выделено с большей точностью, что позволяет использовать эти данные в анализе процессов, происходящих в Млечном Пути.

1.3 Возможные объяснения “дымки” WMAP и связь с пузырями Ферми

Пока не построен однозначный механизм, объясняющий наличие протяженного микроволнового излучения из центра Галактики, и можно условно разделить существующие на три больших класса.

Первое предположение состоит в том, что наличие WMAP haze вызвано избыточным излучением, появляющимся вследствие аннигиляции частиц темной материи . Темная материя в форме “вимпов” (WIMP) – тяжелых слабо взаимодействующих частиц при аннигиляции может порождать пару частица-античастица: электрон-позитрон, W^+W^- и другие. Продукты распада темной материи могут аннигилировать с образованием избыточного излучения, а также, в случае W^+W^-, распадаться на другие частицы. Было показано, что излучение темной материи с профилем $\rho(r) \propto r^{-1.2}$ соответствует спектру WMAP haze, и таким образом можно установить ограничение на массу частиц и сечение их взаимодействия [10], [11].

Второй класс механизмов объясняет избыточное излучение при помощи пульсаров, близких к Солнечной системе. Пульсары – быстро вращающиеся нейтронные звезды, имеют свою магнитосферу, которая может быть источником электрон-позитронных пар. Интенсивность излучения зависит от таких характеристик пульсара как его возраст, период обращения, масса и магнитное поле – все эти значения в настоящее время измеряются экспериментально. Расчеты показывают, что популяция пульсаров Млеченого Пути, находящихся на расстояниях нескольких килопарсек от Земли, может создавать излучение, подобное “дымке” WMAP [12], [13].

Третий класс предлагает объединить воедино излучение различных энергий в области центра Галактики, которое мы наблюдаем: WMAP haze, Fermi bubbles, мягкое рентгеновское излучение [14], радио-излучение на частоте 2.3 ГГц [15], [16].

Здесь возможны два сценария формирования излучения. Первый предполагает, что все эти типы излучения вместе взятые могут производится самим галактическим центром (активное ядро галактики) и затем “выдуваться” в двух направлениях в пространство вне диска Млечного Пути [15]. Во втором случае электроны рождаются в сверхмассивной черной дыре в центре Галактики Sgr A* и адвектируются от нее на расстояния порядка нескольких килопарсек. Затем создаются условия для дополнительного ускроения частиц WMAP haze/Fermi bubbles на ударных волнах (shock acceleration) [17]. В рамках третьего класса моделей пузыри Ферми предстают

как эквивалент WMAP haze в области высоких энергий – оба явления объясняются единым механизмом.

Характеристическим свойством данного сценария является совпадение пространственной структуры "тумана" WMAP и пузырей Ферми. Настоящая работа посвящена проверке этой гипотезы.

2 Данные

Межзвездная среда (ISM – interstellar medium), а точнее, вещество межзвездной среды состоит из межзвездного газа и пыли, масса которой всего лишь 1% от массы газа. В свою очередь, межзвездный газ состоит из трех основных компонентов: холодные облака, атомного или молекулярного состава, межоблачное вещество, нейтральное или ионизованное и области горячего ионизованного газа, вероятнее всего образовавшегося в результате вспышек сверхновых [18]. Каждая составляющая образует фазу, то есть термодинамически устойчивую систему с примерно одинаковым в каждой фазе давлением. Атомный газ, в основном, наблюдается в форме теплого нейтрального веществе (WNM – warm neutral meduim; $T \approx 10^4\ K$) и холодного нейтрального вещества с температурой менее 100 K. Теплый ионизованный газ (WIM – warm ionized medium) частично ионизован и также имеет температуру порядка $10^4\ K$, а горячий ионизованный газ (HIM – hot ionizd medium) достигает температур $T \approx 10^6\ K$ и выше. Молекулярный газ (H_2), в основном, находится в гигантских молекулярных облаках (Giant Molecular Clouds). По химическому составу межзвездный газ в основном состоит из нейтрального и ионизованного водорода, гелия, а также других более тяжелых элементов – азота, кислорода и серы.

Космические лучи и электромагнитное излучение, поглощаемые газом и пылью, нагревают и ионизуют их. В свою очередь, межзвездные газ и пыль излучают электромагнитные волны в диапазонах от длинноволнового радиоизлучения до жестких гамма лучей. В излучении межзвездной среды выделяют три основных механизма: тормозное излучение, синхротронное излучение и излучение горячей пыли.

Основные данные, которые используются для изучения межзвездной среды, получаются от космических исследовательских аппаратов, инструменты которых измеряют интенсивность или температуру излучения в каждой точке неба; на основе этих данных строятся полные карты неба.

В данной работе проведен анализ карт микроволнового излучения спутника

Planck (раздел 2.4). Механизмы излучения межзвездной среды и карты, которые построены на основе теоретических представлений об этих механизмах, представлены в разделах 2.1, 2.2 и 2.3.

2.1 Тормозное излучение

Области ионизованного водорода (H_{II}) являются источниками протяженного теплового излучения. За это отвечает процес излучения при свободно-свободных переходах или тормозного излучения (free-free, bremsstrahlung). Свободные электроны в этих областях могут взаимодействовать с протонами без рекомбинации: пролетая мимо, они замедляются и излучают фотоны. Электроны могут взаимодействовать таким же образом с другими электронами, но излучения в таком случае не происходит, так как не меняется электрический дипольный момент.

Спектр такого излучения не совпадает со спектром черного тела, поскольку газ оптически прозрачен для тормозных электронов: у них не происходит перераспределения энергии. Кроме того, спектр непрерывный и достаточно плоский на радио частотах [19].

С другой стороны, H_{II} возникает при ионизации нейтрального водорода звездами O и B типа. Они производят фотоны с длинами волн $\lambda < 912$Å, которые соответствуют энергиям $> 13.6\ eV$, достаточным для ионизации основного состояния водорода. Затем происходит рекомбинация – либо напрямую в основное состояние, либо в возбужденное. Потом совершается переход в более низкоэнергетическое состояние с испусканием фотонов – в том числе переходы линии Лаймана H_α.

Валлс-Габауд показал, что яркостная температура T_{ff} тормозного излучения относится к интенсивности линни H_α как [20]:

$$\frac{T_{ff}}{I_{H_\alpha}} = \frac{1.56}{\nu_{30}^2} T_{30}^{0.317} 10^{0.029/T_4} \left(1 + \frac{n_{He_{II}}}{n_{He}} \frac{n_{H_e}}{n_H}\right) g_{ff}\left(\nu, T\right) \left(\frac{\mu K}{R}\right), \tag{1}$$

где 1 $R = 10^6/4\pi$ фотонов в с$^{-}$1 см$^{-2}$ ср$^{-1}$, ν_{30} частота в единицах 30 ГГц, T_4 температура в единицах $10^4\ K$, $\frac{n_{He_{II}}}{n_{He}}$ – доля ионизованного гелия, $\frac{n_{H_e}}{n_H}$ – распространенность гелия, а g_{ff} – аппроксимация поправочного множителя Гаунта:

$$g_{ff}\left(\nu, T\right) \approx 4.6 T_4^{0.21} \nu_{30}^{-0/14}. \tag{2}$$

Таким образом, H_α-излучение используется для оценки тормозного излучения межзвездного газа.

В данной работе в качестве шаблона free-free используется карта H_α-излучения Финкбейнера ([21]). Данная карта построена на основе трех широкоугольных наблюдений: Virginia Tech Spectral line Survey (VTSS), Southern H-Alpha Sky Survey (SHASSA) и Wisconsin H-Alpha Mapper (WHAM), первые два из которых имеют высокое разрешение, но плохую калибровку нулевой точки, а третье, наоборот, низкого разрешения но со стабильной нулевой точкой. Карта скорректирована для поглощения пылью излучения на луче зрения, считая что газ и пыль равномерно перемешаны между собой.

2.2 Синхротронное излучение

Синхротронное излучение – один из видов магнитотормозного излучения: излучение электромагнитных волн заряженными частицами, движущимися с релятивистскими скоростями в магнитном поле. Наиболее существенно таким образом излучает электронная компонента космических лучей. Синхротронное излучение – проявление общего закона электродинамики, согласно которому любая ускоренно (замедленно) движущаяся частица рождает электромагнитные волны. В отличие от нерелятивистского электрона, магнитотормозное излучение которого происходит на нерелятивистской гирочастоте $\omega_g = 2\pi\nu_g = eB/(m_e c)$, один релятивистский электрон с энергией $E = \gamma m_e c^2$ излучает в широком спектре частот [19]. Узкий конус, в пределах которого заключено излучение электрона, поворачивается вместе с поворотом вектора мгновеной скорости электрона.

Основной источник синхротронной эмиссии в Солнечной системе – облака релятивистских электронов, выброшенные из активных областей на Солнце. Кроме того, в Галактике источниками являются системы с джетами, такие как, например, молодые звездные объекты с биполярными оттоками и активные ядра галактик. Распределение энергии электронов изменяется при изменении положения их источника в Галактике, с более жестким спектром вблизи источников высокоэнергетичных электронов (например, остатки сверхновых), и с более мягким спектром в остальном пространстве [2].

Синхротронный механизм используется для интерпретации излучения объектов как нашей Галактики, так и других галактик; радио-, оптического и рентгеновского излучения Крабовидной туманности и других туманностей – остатков вспышек сверхновых звезд; некоторых видов излучения Солнца, пульсаров, квазаров.

Карта “408 MHz All Sky Continuum Survey” ([22], [23]), полученной Хасламом в 1982 году является хорошим шаблоном для синхротронного излучения. Она получена на основе измерений четырьмя различными телескопами: Jordell Bank MkI telescope (регион Галактического антицентра), Effelsberg 100 metre telescope (северная часть неба между склонениями -8° и 48°), Parkes 64 metre telescope (южная часть неба полностью) и Jordell Bank MkIA telescope (полярная область северной части неба). Вклад от тормозного излучения в наблюдаемой интенсивности очень мал, особенно вблизи Галактической плоскости; основная часть эмиссии исходит от электронов, получивших ударное ускорение сверхновыми, и имеющими достаточное время чтобы удалиться от своего источника.

2.3 Тепловое излучение пыли

Межзвездная пыль состоит из частичек, в состав которых входят кремний и углерод. Они относительно невелики, но имеют большой разброс в размерах: самые большие порядка 0.5мкм в диаметре, содержат $\sim 10^{11}$ атомов, но некоторые содержат $\sim 10^2$ атомов и по размерам похожи на большие молекулы.

Важное свойство пыли, которое, собственно, и позволяет ее детектировать – она поглощает и излучает свет, называется межзвездной экстинкцией. Например, существуют темные туманности – зоны исключения для галактик на низких галактических долготах. Это настолько плотные облака пыли, что не пропускают свет из источников за ними.

При этом, межзвездное поглощение селективно, то есть сильно зависит от длины волны. Эта зависимость немонотонна, имеет локальный максимум в области 2200 Å. Поглощение в синей части спектра происходит сильнее, чем в красной, поэтому пыль приводит к покраснению источников.

В работе [24] получена $100\mu m$-карта субмиллиметрового и микроволнового излучения диффузной межзвездной пыли в Галактике на основе данных COBE/DIRBE и IRAS/ISSA при вычете зодиакального света и точечных источников.

В последующей работе [25] была предложена мультикомпонентная модель распределения пыли, а карта соответственно экстраполирована на микроволновые частоты, поэтому она может использоваться в качестве шаблона для излучения горячей пыли в Галактике.

2.4 Карты микроволнового излучения спутника Planck

В 1992 году был запущен спутник COBE (COsmic Background Explorer). Наблюдения обсерватории позволили измерить характеристики реликтового фона Вселенной с беспрецедентной для своего времени точностью. Результаты наблюдений оказали огромное влияние на формирование современной картины мира и утверждения теории Большого взрыва как основной гипотезы формирования Вселенной, и, в свою очередь, дали толчок к запуску большого числа наземных и суборбитальных экспериментов, направленных на измерение карты анизотропии реликтового излучения [26].

Одним из таких экспериментов стала космическая обсерватория Planck. Предложения по ее созданию были выдвинуты еще в мае 1992 года Европейским Космическим Агенством (EKA) для оперирования двумя инструментами: COBRAS (COsmic Background Radiation Anisotropy Satellite, [27]) и SAMBA (SAtellite for Measurement of Background Anisotropies, [28]). Им требовался космический исследовательский аппарат, оснащенный оффсетным телескопом системы Грегори, который бы фокусировал излучение на набор детекторов: низкошумовой усилитель на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT) для COBRAS и низкотемпературный болометр для SAMBA, снабженные гофрированной рупорной антенной. Команда EKA создала на основе данных требований аппарат, где один телескопа типа COBRAS снимает данные для двух инструментов - Low Frequency Instrument (LFI), аналогичный инструменту COBRAS и High Frequency Intrument (HFI), аналогичный SAMBA. Изначальный запуск миссии COBRAS/SAMBA планировался в 2003 году, и вскоре после утверждения она была переименована в честь немецкого ученого Макса Планка [29]. Запуск спутника произошел 14 мая 2009 года.

Инструмент Planck Low Frequency Instrument представляет собой третье поколение микроволновых радиометров для космических наблюдений анизотропии реликтового излучения, вслед за высокочуствительным радиометром COBE (DMR - Differential Microwave Radiometer) и WMAP. LFI – прорыв в такого рода измерениях – состоит из ряда 22-канальных дифференциальных приемников с суперннизкошумными уселителями на основе криогенно-охлаждаемых транзисторов с высокой подвижностью электронов из фосфида индия (InP). Он предназначен для создания карт неба на 30, 44 и 70 ГГц (включая поляризованные компоненты) с высокой чувствительностью.

Инструмент HFI обследует небо на шести частотах от 100 до 857 ГГц, на низких частотах его чуствительность близка к фундаментальному пределу, задаваемой фотонной статистикой фона. Главные составляющие HFI – болометрические детекторы, микроскопические устройства, в которых поступающее излучение поглощается решеткой, увеличивая тем самым температуру твердотельного термометра. Такие детекторы имеют очень высокую производительность, но в то же время нечувствительны к ионизирующему излучению и к шумам, обусловленным микрофонным эффектом [18].

По сравнению с WMAP, угловое разрешение Planck в три раза выше, а уровень шума на оптимальной частоте около 100 ГГц ниже на порядок. Улучшенное угловое разрешение и чувствительность позволяют производить более точные измерения спектра мощности реликтового излучения, а большее покрытие по частоте обеспечивает отделение реликтового излучения от фона с большей точностью, что особенно важно при изучении поляризации.

Однако, с точки зрения данного исследования важно то, что полные карты неба Planck позволяют изучать пространственную структуру излучения межзвездной среды (ISM - interstellar medium), разделять его на отдельные компоненты. При таком разрешении возможно отделение друг от друга близких объектов и более детальное изучение структуры и состава среды.

3 Анализ данных

3.1 Системы пикселизации неба

Данные радиоастрономических обзоров могут быть разделены на две категории, каждая из которых требует независимого анализа. Первая – наблюдение точечных радиоисточников, вторая – наблюдение протяженных источников и фоновых компонент. Исследование фоновых составляющих сигнала, к которым относится и реликтовое излучение, связано прежде всего с анализом распределения спектральной мощности излучения в зависимости от углового масштаба, с одной стороны, а также с анализом фаз сферических гармоник, с другой стороны. Обе задачи на небесной сфере решаются с применением техники разложения протяженного сигнала на сферические гармоники, точность определения которых зависит, в частности, от методов пикселизации карт.

Процесс пикселизации неба – это представление сферы в виде объединения соответствующих разрешению малых участков (пикселей). Выбор той или иной схемы пикселизации зависит от особенностей решаемой задачи. При анализе пикселей в прямоугольной (цилиндрической) системе координат на "развернутой" небесной сфере необходимо учитывать проекционные искажения, расстояние между двумя точками на сфере и изменение площади пикселя в зависимости от удаления от экватора [30].

Впервые вопрос о том, какая из систем пикселизации предпочтительна, рассмотрел Макс Тегмарк [31]:

1) необходимо минимизировать наибольшее расстояние d до центра ближайшего пикселя. Например, в случае прямоугольного разбиения d – расстояние от угловых точек до центров пикселов;

2) сетка должна обеспечивать возможность точного интегрирования, используя значения в узлах.

Первый критерий приводит к выбору более предпочтительной формы пикселей, чем квадрат. Например, для шестиугольной ячейки – икосаэдра – можно вычислить величину $d \approx \left[8\pi/\left(3\sqrt{3}N\right)\right]^{1/2}$, и она оказывается примерно на 12% меньше, чем в случае квадратной сетки, и выбор d, таким образом, задает и выбор формы.

На данный момент широко используются две системы пикселизации – GLESP и HEALPix. Обе системы сопровождаются программным обеспечением, что в том числе послужило причиной их преимущественного распространения.

В системе пикселизации GLESP – Gauss–Legendre Sky Pixelization [32] главное внимание уделяется не оптимальному выбору пикселей и заполнению сферы, а точности проводимого анализа. Одна из задач исследования реликтового излучения – разложение сигнала на сферические гармоники и определение коэффициентов a_{lm}.

Разложим карту анизотропии по сферическим гармоникам:

$$\delta T\left(\theta,\phi\right) = \sum_{l=2}^{\infty}\sum_{m=-l}^{m=l} a_{lm} Y_{lm}\left(\theta,\phi\right), \tag{3}$$

$$Y_{lm}\left(x,\phi\right) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_l^m\left(x\right)\exp\left(\mathrm{i}m\phi\right),\ x=\cos\theta, \tag{4}$$

где $P_l^m\left(x\right)$ – присоединенные полиномы Лежандра, l – номер сферической гармоники (мультиполя), m – номер моды мультиполя. Для непрерывной функции $\delta T\left(x,\phi\right)$ коэффициенты разложения можно вычислить следующим образом:

$$a_{lm} = \int_{-1}^{1}\mathrm{d}x\int_{0}^{2\pi}\mathrm{d}\phi\delta T\left(x,\phi\right)Y_{lm}^{*}\left(x,\phi\right). \tag{5}$$

Для вычисления интеграла 5 удобно использовать метод гауссовых квадратур. Основная идея состоит в том, чтобы интегрирование по x выполнялось точно, в случае, если $\delta T(x,\phi)$ – полином по x не выше степени $2N$. Для этого можно найти весовые функции $w(x)$:

$$\int_{-1}^{1} \mathrm{d}x \delta T(x,\phi) Y_{lm}^{*}(x,\phi) = \sum_{j=1}^{N} w_j \delta T(x_j,\phi) Y_{lm}^{*}(x_j,\phi), \tag{6}$$

где N – максимальный ранг полинома Лежандра. Здесь функция $\delta T(x_j,\phi) Y_{lm}^{*}(x_j,\phi)$ должна браться в корнях сетки:

$$P_N(x_j) = 0. \tag{7}$$

Такое уравнение имеет точно N нулей в интервале от -1 до 1, а весовые коэффициенты имеют вид:

$$w_j = \frac{2}{1-x_j^2}\left[P_n^{'}(x_j)\right]^{-2}. \tag{8}$$

Применение подобного метода вычислений позволяет без итераций проводить расчеты, связанные с преобразованием сигнала, с точностью, ограниченной лишь машинным представлением чисел с плавающей запятой. С точки зрения минимизации вычислительных ошибок такое решение задачи о гармоническом разложении карт анизотропии температуры и поляризации является наиболее эффективным.

В системе пикселизации GLESP углы пикселей совпадают с узлами в квадратуре Гаусса-Лежандра и пиксели имеют квадратную форму.

Вторая система пикселизации – HEALPix – Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization [33] основана на выборе оптимальной формы пикселя. В том числе, в формате HEALPix представлены данные Planck, что послужило основанием для выбора этой системы, в настоящей работе.

Авторы данной системы сформулировали и реализовали три основных требования к математической структуре дискретной сетки на полном небе:

1) Иерархическая структура пикселей. Требование иерархичности позволяет быстро переходить к картам с большим или меньшим разрешением, а также упрощает поиск “соседей” и ряд вычислительных алгоритмов.

2) Равные площади дискретных элементов разбиения. Данное требование облегчает последующую обработку карт, так как белый шум на выборочной частоте инструмен-

та при интегрировании точно приводит к белому шуму в пиксельном пространстве, а регистрируемый сигнал записывается вне зависимости от размера пикселя.
3) Распределение пикселов одного ряда на сфере вдоль одной широты. Этот критерий оказывается существенным для получения высокой скорости вычислений во всех операциях расчётов сферических гармоник. Например, так как присоединенные полиномы Лежандра рассчитываются посредством медленных рекурсий, отклонение узлов сетки от одной широты приведет к большим затратам времени при возрастании числа обрабатываемых точек.

На основе вышеописанных пунктов было предложено разбиение, схема которого представлена на рисунке 3. Базовое разрешение в HEALPix задается 12 пикселями (или гранями) на трех кольцах вокруг полюсов и экватора. Следующий уровень иерархии формируется из предыдущего разбиением каждого пикселя на четыре равных по влощади. Разрешение определяется параметром N_{side}, который задает число разбиений базового пикселя. Он применяется для выбора требуемого разрешения карты, обусловленного, например, диаграммой направленности антенны. Все кольца одинаковой широты находятся между верхними и нижними углами экваториальных граней ($-2/3 < \cos\theta_* < 2/3$) или в экваториальной зоне, после разделения получаем $N_{eq} = 4N_{side}$. Оставшиеся кольца располагаются внутри областей полярных шапок ($|\cos\theta_*| > 2/3$) и содержат переменное число пикселей, возрастающее от кольца к кольцу с увеличением расстояния от полюса на один пиксель в каждом квадрате. Карта с пикселизацией HEALPix состоит из $N_{pix} = 12{N_{side}}^2$ пикселей с площадью $\Omega_{pix} = \pi/\left(3{N_{side}}^2\right)$. Различие между схемами GLESP и HEALPix показано на рисунке 4.

Система обрабатывает и хранит карты в виде FITS-файлов (Flexible Image Transport System – гибкая система передачи изображений). Для нумерования пикселей в карте используются две системы индексации: с кольцевым (ring) и гнездовым (nested) индексом (рисунок 5). В первом случае нумерация пикселей происходит последовательно вдоль их рядов по широте при обходе сферы от севера к югу. Во втором случае нумерация пикселей соответствует иерархичному построению: каждое разбиение пикселя на четыре добавляет два бита информации к номеру.

Программное обеспечение HEALPix позволяет производить базовые операции с картами: создание, сложение и вычитание, маскирование, визуализацию, а также производить процедуры гармонического разложения на сфере – разложение по мультиполям, вычисление углового спектра мощности и другие.

3.2 Метод минимизации при помощи шаблонов

Метод минимизации при помощи шаблонов использовался еще в оригинальном анализе WMAP. Это простая базовая минимизирующая схема, в которой шаблоны, основанные на механизмах излучения межзвездной среды, напрямую приводятся в соответствие экспериментальным данным [5], [34]. Метод прост в осуществлении, а его результаты легко интерпретировать. Кроме того, добавочные компоненты легко идентифицируются в остаточных картах.

Исходную карту можно представить в виде:

$$\vec{d} = \vec{a}P + \vec{x}, \tag{9}$$

где $\vec{d}$ – карта экспериментальных данных, P – матрица пространственных шаблонов, $\vec{a}$ – матрица амплитуд, а $\vec{x}$ – компонента, которую необходимо выделить. В индексных обозначениях это уравнение будет иметь вид:

$$d_i = \sum_i a_\alpha P_{\alpha i} + x_i, \tag{10}$$

где α пробегает значение от 1 до количества используемых шаблонов, а i – номер пикселя на карте.

Белый шум, который дает основной вклад в шумы карт неба, статистически не скоррелирован, поэтому его матрица ковариаций диагональна:

$$\langle d_i d_j \rangle = N_{\underline{i}} \delta_{\underline{ij}}, \tag{11}$$

где N_i – вектор длины N_{pix}.

Далее, хи-квадрат критерий запишется в виде:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{x_i x_i}{N_i} = \sum_i \frac{\left(d_i - \sum_\alpha a_\alpha P_{\alpha i}\right)^2}{N_i}. \tag{12}$$

Дифференцирование по a_α даст искомое решение для вектора амплитуд:

$$\frac{\delta \chi^2}{\delta a_\alpha} = 0, \tag{13}$$

$$\sum_i \frac{2\left(d_i - \sum_{\alpha'} a_{\alpha i} P_{\alpha' i}\right)}{N_i} \left(-P_{\alpha i}\right) = 0, \tag{14}$$

$$\sum_i \frac{d_i P_{\alpha i}}{N_i} = \sum_{i,\alpha'} a_{\alpha'} \frac{P_{\alpha' i} P_{\alpha i}}{N_i}, \tag{15}$$

или в матричных обозначениях:

$$\sum_{\alpha'} M_{\alpha\alpha'} a_{\alpha'} = F_\alpha \tag{16}$$

$$M_{\alpha\alpha'} = \sum_i \frac{P_{\alpha' i} P_{\alpha i}}{N_i}, \tag{17}$$

$$F_\alpha = \sum_i \frac{d_i P_{\alpha i}}{N_i}, \tag{18}$$

где

$$a_{\alpha'} = \left(M^{-1}\right)_{\alpha\alpha'} F_\alpha. \tag{19}$$

Окончательно решение можно записать в виде:

$$a_{\alpha'} = \left(P_{\alpha' i} N_i^{-1} P_{\alpha i}\right)^{-1} \left(P_{\alpha i} N_i^{-1} d_i\right). \tag{20}$$

Необходимо сделать важное замечание касательно шаблонов: кроме шаблонов, описывающих механизмы излучения междвездной среды, необходимо включить в матрицу P также шаблон для выделяемой неизвестной компоненты (в данной работе использовался двумерный гауссов эллипс). В противном случае остальные компоненты могут частично скомпенсировать искомое излучение. Кроме того, шаблон для реликтового излучения необходимо вычесть из карты до того. Номировочный множитель должен быть близок к единице, его точное значение можно определить по участкам неба вдали от Галактики.

3.3 Шаблон для WMAP/Planck haze

Как было сказано в параграфе 3.2, необходимо помимо шаблонов для механизмов излучения среды включить в матрицу шаблонов P также и некоторую приблизительную оценку для излучения, которое необходимо выделить, в данном случае для WMAP/Planck haze.

“Классическим” стал шаблон, используемый в [16] и [5]: двумерный гауссов эллипс с характерными длинами $\sigma_l = 15^\circ$ и $\sigma_b = 20^\circ$.

Стоит отметить, что карту Fermi bubbles нельзя использовать как шаблон для WMAP/Planck haze. Во-первых, морфология гамма-излучения на низкой долготе неоднозначна. Во-вторых, морфология синхротронного излучения (которое может быть ответственно за WMAP/Planck haze, см. 1.3) зависит от магнитного поля, а

гамма-излучения – от межзвездной радиации. То есть, хотя эти два типа излучения могут происходить из одного источника, их структура и причины, ее вызывающие, не одинаковы [5].

3.4 Маска

Для исследования излучения межзвездной среды необходимо "замаскировать" яркие объекты на небе: Галактику и точечные источники. В данной работе использовалась маска Planck для выделения и изучения отдельных компонент излучения ISM ($COM_CompMap_Mask-rulerminimal_2048_R1.00.fits$[1]), показанная на рисунке 6-а. Однако, такой маски недостаточно, когда речь идет о столь малоинтенсивном излучении, как WMAP haze, так как она закрывает не все сильно излучающие источники.

Следуя [5], также были также закрыты области, где галактическая экстинкция больше одной магнитуды. Экстинкция в межзвездной среде – это поглощение, излучение и рассеяние электромагнитного излучения веществом (пылью и газом), находящимся в межзвёздном пространстве между излучающим астрономическим объектом и наблюдателем. Из-за этого явления происходит видимое покраснение света удаленных звезд. В любой фотометрической системе межзвездное покраснение может быть описано как избыток цвета (colour excess) [35]. Например, в фотометрической системе UBV, избыток цвета E_{B-V} для показателя цвета $B-V$ может быть записан как:

$$E_{B-V} = (B-V)_{observed} - (B-V)_{intrinsic}, \tag{21}$$

где $(B-V)_{observed}$ – наблюдаемый показатель цвета, а $(B-V)_{intrinsic}$ – собственный показатель цвета звезды.

Карта галактического покраснения получена в работе [24] на основе данных IRAS и COBE/DIRBE ($lambda_sfd_ebv.fits$[2]) и представлена на рисунке 6-б.

Кроме того, так как отношение температуры тормозного излучения к интенсивности линии H_α является функцией температуры, для минимизации ошибок также маскируются области, где интенсивность излучения H_α больше 10 Рл: это связано с сильными пространственными флуктуациями в температуре газа.

На последнем шаге были закрыты яркие области неба, которые не маскируются

[1] $http://irsa.ipac.caltech.edu/data/Planck/release_1/ancillary-data/$

[2] $http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/foreground/f_products.cfm$

в предыдущих шагах и не описываются шаблонами: а частности, в области долгот $\approx 180^\circ$ вблизи Галактического диска существуют области с интенсивностью, сравнимой с интенсивностью излучения WMAP/Planck haze. Такие области, расположенные вдали от искомого излучения, были закрыты.

Итоговая маска представлена на рисунке 6-в и закрывает $34,5\%$ неба. Маска близка к используемой в анализе Planck [5].

4 Результаты

WMAP/Planck haze наблюдается на частотах 20-50 ГГц, поэтому в данном анализе использовались карты Planck 30 ГГц, 44 ГГц и 70 ГГц ($LFI_SkyMap_030_1024_R1.10_nominal.fits$, $LFI_SkyMap_044_1024_R1.10_nominal.fits$, $LFI_SkyMap_070_1024_R1.10_nominal.fits$[3]). Карты с наложенной на них маской, описанной в пункте 3.4, а также карты ковариаций их шума, используемые в методе минимизации при помощи шаблонов (3.2), показаны на рисунке 7 (а - в, соответственно).

В качестве шаблона для реликтового излучения использовалась карта SMICA (Spectral Matching Independent Component Analysis, $COM_CompMap_CMB-smica_2048_R1.20.fits$, см. ссылку [3]) [36]. В ее основе лежит метод сравнения спектров в Фурье-пространстве, он позволяет разделять источники с различными энергетическими спектрами. На рисунке 8-а показана карта SMICA, а на рисунке б – шаблон для WMAP/Planck haze, описанный в параграфе 3.3.

Карты шаблонов механизмов излучения межзвездной среды показаны на рисунке 9: шаблон H_α, используемый для создания карты тормозного излучения ($Halpha_fwhm06_1024.fits$, здесь и далее см. ссылку [2]), шаблон излучения горячей пыли ($lambda_fds_dust_94GHz.fits$) и карта Haslam 408 MHz, используемая как шаблон для синхротронного излучения ($lambda_haslam408_dsds.fits$) (а-в, соответственно).

Карты представлены в разных разрешениях, поэтому для проведения вычислений разрешение всех карт и шаблонов было приведено к $N_{side} = 512$, что, учитывая размеры исследуемой области, не влияет существенно на точность результатов.

[3] $http://irsa.ipac.caltech.edu/data/Planck/release_1/all-sky-maps/$

Выделенное излучение показано на рисунке 10 для трех исследуемых частот: 30, 44 и 70 ГГц, соответственно, оно качественно совпадает с результатами анализа коллаборации Planck. Как и ожидалось, наиболее отчетливо излучение проявляется на частоте 30 ГГц, поэтому в последующие результаты основаны на этой карте. Далее будут описаны результаты изучения пространственной структуры “дымки”.

4.1 Асимметрия север-юг

Для исследования асимметрии север-юг была создана карта двух симметричных относительно плоскости Галактики эллипсов (рисунок 11 а-б): в первом случае они повторяют размеры Fermi bubbles ($\sigma_l = \sigma_b = 20^\circ$, $b_0 = 20^\circ$), во втором это более плоские эллипсы с размерами $\sigma_l = 60^\circ$, $\sigma_b = 20^\circ$ и $b_0 = 20^\circ$, что с визуальной точки зрения качественно лучше показывает геометрию выделенного излучения.

Затем излучение WMAP haze было спроектировано для каждого случая по очереди сначала на верхний и нижний эллипсы: $e_i = (map, ellipse_i \times N^{-1}) \,/\, (ellipse_i, ellipse_i \times N^{-1})$. Затем полученные значения сравнивались.

Полученные значения для геометрии пузырей Ферми:

$$e_1 = (8.8 \pm 0.7) \times 10^{-5},\ e_2 = (7.5 \pm 0.6) \times 10^{-5},\ \frac{\chi^2}{d.o.f.} = 3.12, \tag{22}$$

где e_1 – коэффициент проекции на северный эллипс, e_2 – коэффициент проекции на южный эллипс.

Аналогично, для плоских эллипсов:

$$e_1 = (7.8 \pm 0.4) \times 10^{-5},\ e_2 = (5.9 \pm 0.4) \times 10^{-5},\ \frac{\chi^2}{d.o.f.} = 2.88. \tag{23}$$

Полученные результаты показывают, что в случае геометрии пузырей Ферми в пределах погрешности северная и южная часть излучения симметричны, а в случае геометрии плоских эллипсов северная часть имеет более интенсивное излучение. Однако, как будет показано далее, с точки зрения согласия с экспериментальными данными геометрия пузырей Ферми более предпочтительна в качестве шаблона WMAP/Planck haze.

4.2 Наличие подструктур

Согласно [9], в пузырях Ферми существуют подструктуры (“cocoon”) – области более интенсивного излучения относительно остальной части “пузыря”. Они были найдены как в северном, так и в южном пузырях.

Северная подструктура в выделенном излучении закрыта маской, поэтому исследовалась только южная полуплоскость. Для этого была создана карта подструктуры, а также использовалась карта нижнего эллипса пузырей Ферми из 4.1, и была вычислена средняя интенсивность по нижнему пузырю и по подструктуре (рисунок 11 в-г).

Полученные результаты:

$$\bar{I}_1 = (7.63 \pm 0.5) \times 10^{-5},\ \bar{I}_2 = (7.5 \pm 0.6) \times 10^{-5}, \tag{24}$$

где $\bar{I}_1$ – средняя интенсивность по южной подструктуре, $\bar{I}_2$ – средняя интенсивность по южному пузырю. В пределах погрешности интенсивности совпадают, но сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии южной подструктуры в WMAP/Planck haze на основании таких данных нельзя в связи с тем, что используемая маска закрывает большую часть области исследования.

4.3 Размеры WMAP/Planck haze

Размеры WMAP haze аппроксимировались при помощи, двух симметричных относительно плоскости Галактики эллипсов, с центрами в точках $l = 0,\ b = b_0$ и $l = 0,\ b = -b_0$.

В качестве параметров выступали σ_l, σ_b и b_0; минимизировался квадрат функции:

$$x\left(e_1, e_2\right) = map - e_1\left(\sigma_l, \sigma_b\right) * ellipse_1\left(\sigma_l, \sigma_b\right) - \\ - e_2\left(\sigma_l, \sigma_b\right) * ellipse_2\left(\sigma_l, \sigma_b\right), \tag{25}$$

где $ellipse1\left(\sigma_l, \sigma_b\right)$ и $ellipse2\left(\sigma_l, \sigma_b\right)$ – карты верхнего и нижнего эллипса, e_1 и e_2 – коэффициенты проекции карты на эллипсы $e_i = \left(map, ellipse_i \times N^{-1}\right) / \left(ellipse_i, ellipse_i \times N^{-1}\right)$, N^{-1} – обратная матрица ковариаций шума.

Минимизируемые параметры можно или накладывать на них ограничения, которые приводят к симметрии пузыря.

В случае $\sigma_l = \sigma_b = b_0$, b_0 – положение центра эллипса; результат минимизации функции $x\,(e_1, e_2)$ $\sigma_l = \sigma_b = b_0 = 25.5^\circ \pm 0.5^\circ$, $\chi^2/d.o.f. = 2.96$.

На рисунке 12 показана полученная аппроксимация размеров WMAP/Planck haze (б) и ее сравнение со структурой Fermi bubbles (в). Это дает указание на схожесть пространственных структур двух типов излучения.

5 Выводы

В данной работе было получено излучение "дымки" WMAP/Planck на частотах 30, 44 и 70 ГГц и изучена его пространственная структура для 30 ГГц в сравнении с пространственной структурой Fermi bubbles.

Анализ показал, что в пределах погрешности полученное излучение симметрично относительно плоскости Галактики.

Достоверно сделать указание о наличии или отсутствии подструктуры в WMAP/Planck haze не представляется возможным. Это связано с используемой маской, она закрывает довольно большую область, которая представляет интерес для исследования.

При анализе размеров WMAP/Planck haze для случая симметричной структуры получена оценка размеров $\sigma_l = \sigma_b = b_0 = 25.5^\circ \pm 0.5^\circ$, которая согласуется с данными Fermi.

В качестве будущего развития работы необходимо в первую очередь получить более правдоподобную маску: с одной стороны, она должна закрывать все яркие объекты на небе, с другой стороны не препятствовать изучению самой структуры WMAP/Planck haze. Используемая в данной работе маска достаточно сильно закрывает северную часть излучения, и возможные ее модификации требуют более детального изучения структуры галактического диска вблизи центра Галактики.

Кроме того, необходимо уточнять и улучшать шаблоны излучения межзвездной среды. Некоторые из них получены несколько десятков лет назад, и могут быть обновлены с использованием новейших средств наблюдения неба. Возможно, необходимо учесть механизмы излучения, интенсивность которых мала по сравнению с используемыми в данной работе: они могут обеспечивать избыток излучения вблизи плоскости Галактики, который в данной работе препятствует изучению WMAP/Planck haze. Это позволит точнее определить размеры излучения, изучить его границу и другие пространственные свойства.

В рамках данной работы было получено указание на схожесть пространственных структур WMAP/Planck haze и Fermi bubbles, в качестве дальнейшей работы предложено совершенствовать используемые методы и инструменты, исследовать теоретические модели излучения межзвездной среды и Галактического диска и увеличивать точность вычислений.

Список литературы

1. C.L. Bennett et al., "The Microwave Anisotropy Probe (MAP) Mission", ApJ **583** (2003) 1-23, astro-ph/0301158.

2. D.P. Finkbeiner, "Microwave ISM Emission Observed by WMAP", ApJ **614** (2004) 186-193, astro-ph/0311547.

3. D. Hooper, D. P. Finkbeiner, G. Dobler, "Evidence Of Dark Matter Annihilations In The WMAP Haze", Phys.Rev.D **76** 083012 (2007), astro-ph/0705.3655.

4. C. L. Bennett et al., "Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results", (2013), astro-ph/1212.5225.

5. Planck Collaboration: P. A. R. Ade, "Planck Intermediate Results. IX. Detection of the Galactic haze with Planck", (2012), astro-ph/1208.5483.

6. Fermi/LAT Collaboration: W. B. Atwood, et al., "The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-ray Space Telescope Mission", Astrophys.J. **697** 1071-1102 (2009), astro-ph/0902.1089.

7. M. Su, T. R. Slatyer, D. P. Finkbeiner, "Giant Gamma-ray Bubbles from Fermi-LAT: AGN Activity or Bipolar Galactic Wind?", Astrophys.J. **724** 1044-1082 (2010), astro-ph/1005.5480.

8. R. Yang, F. Aharonian, R. Crocker, "The Fermi Bubbles Revisited", astro-ph/1402.0403.

9. Fermi-LAT Collaboration, "The Spectrum and Morphology of the Fermi Bubbles", Astrophys.J. **793** 1 34 (2014), astro-ph/1407.7905.

10. D. Hooper, D. P. Finkbeiner, G. Dobler, "Evidence Of Dark Matter Annihilations In The WMAP Haze", Phys.Rev.D **76** 083012 (2007), astro-ph/0705.3655v1.

11. G. Caceres, "Explaining the WMAP Haze with Neutralino Dark Matter", hep-ph/0906.4306v1.

12. M. Kaplinghat, D. J. Phalen, K. M. Zurek, "Pulsars as the Source of the WMAP Haze", JCAP **0912** 010 (2009), astro-ph/0910.4590.

13. J. P. Harding, K. N. Abazajian, "Morphological Tests of the Pulsar and Dark Matter Interpretations of the WMAP Haze", Phys.Rev.D **81** 023505 (2010), astro-ph/0910.4590.

14. S. L. Snowden et al., "ROSAT Survey Diffuse X-Ray Background Maps. II.", ApJ **485** 125 (1997).

15. A. J. Fox et al., "Probing the Fermi Bubbles in Ultraviolet Absorption: A Spectroscopic Signature of the Milky Way's Biconical Nuclear Outflow", astro-ph/1412.1480.

16. G. Dobler et al., "The Fermi Haze: A Gamma-Ray Counterpart to the Microwave Haze", Astrophys.J. **717** 825-842 (2010), astro-ph/0910.4583v2.

17. D. O. Chernyshov et al., "Fermi bubbles as a source of cosmic rays above 10^{15} eV", Nuclear Physics B (Proceedings Supplements) 179-185 (2014), astro-ph/1412.2733.

18. Planck Collaboration, "Planck: The Scientific Programme", ESA-SCI **1** (2005), astro-ph/0604069.

19. А. В. Засов, К. В. Постнов, "Общая астрофизика", Век 2 (2006).

20. R. J. Reynolds, L. M. Haffner, "Mapping the Galactic Free-Free Foreground via Interstellar H-Alpha Emission", (2000), astro-ph/0010618.

21. D. P. Finkbeiner, "A Full-Sky H-alpha Template for Microwave Foreground Prediction", Astrophys.J.Suppl **146** 407 (2003), astro-ph/0301558.

22. C. G. T. Haslam et al., "A 408 MHz all-sky continuum survey. I - Observations at southern declinations and for the North Polar region", Astronomy and Astrophysics **100** 2 209-219 (1981).

23. C. G. T. Haslam et al., "A 408 MHz all-sky continuum survey. II - The atlas of contour maps", Astronomy and Astrophysics Supplement Series **47** 1, 2, 4-51, 53-142 (1982).

24. D. J. Schegel, D. P. Finkbeiner, M. Davis, "Maps of Dust IR Emission for Use in Estimation of Reddening and CMBR Foregrounds", Astrophys.J. **500** 525 (1998), astro-ph/9710327.

25. D. P. Finkbeiner, M. Davis, D. J. Schegel, "Extrapolation of Galactic Dust Emission at 100 Microns to CMBR Frequencies Using FIRAS", Astrophys.J. **524** 867-886 (1999), astro-ph/9905128.

26. N. W. Boggess et al., "The COBE mission - Its design and performance two years after launch", Astrophysical Journal, Part 1 **397** no. 2 420-429 (1992).

27. N. Mandolesi, G. F. Smoot, "COBRAS – Cosmic Background Radiation Anisotropy Satellite", A proposal submitted to ESA M3 Call for Mission Ideas (1993).

28. J. L. Puget, "Proposal for SAMBA - the SAtellite for Measurements of Background Anisotropies", A proposal submitted to ESA M3 Call for Mission Ideas (1993).

29. J. A. Tauber et al., "Planck pre-launch status: The Planck mission", Astronomy&Astrophysics **520** A1 (2010).

30. О. В. Верходанов, А. Г. Дорошкевич, "Системы пикселизации неба для анализа протяженного излучения", УФН **138** 8 (2013).

31. M. Tegmark, "An icosahedron-based method for pixelizing the celestial sphere", ApJ Letters **470** L81-84 (1996), astro-ph/9610094.

32. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky et al., "Gauss-Legendre Sky Pixelization (GLESP) for CMB maps", Int. J. Mod. Phys. D. **14** 275 (2005), astro-ph/0305537.

33. K. M. Gorsky et al., "HEALPix – a Framework for High Resolution Discretization, and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere", Astrophys.J **622** 759-771 (2005), astro-ph/0409513.

34. G. Dobler, "A Last Look at the Microwave Haze/Bubbles with WMAP", astro-ph/1109.4418.

35. А. В. Миронов, "Прецизионная фотометрия", Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга (1997).

36. J. Delabrouille, J.-F. Cardoso, G. Patanchon, "Multi-Detector Multi-Component spectral matching and applications for CMB data analysis", Mon.Not.Roy.Astron.Soc. **346** 1089 (2003), astro-ph/0211504.

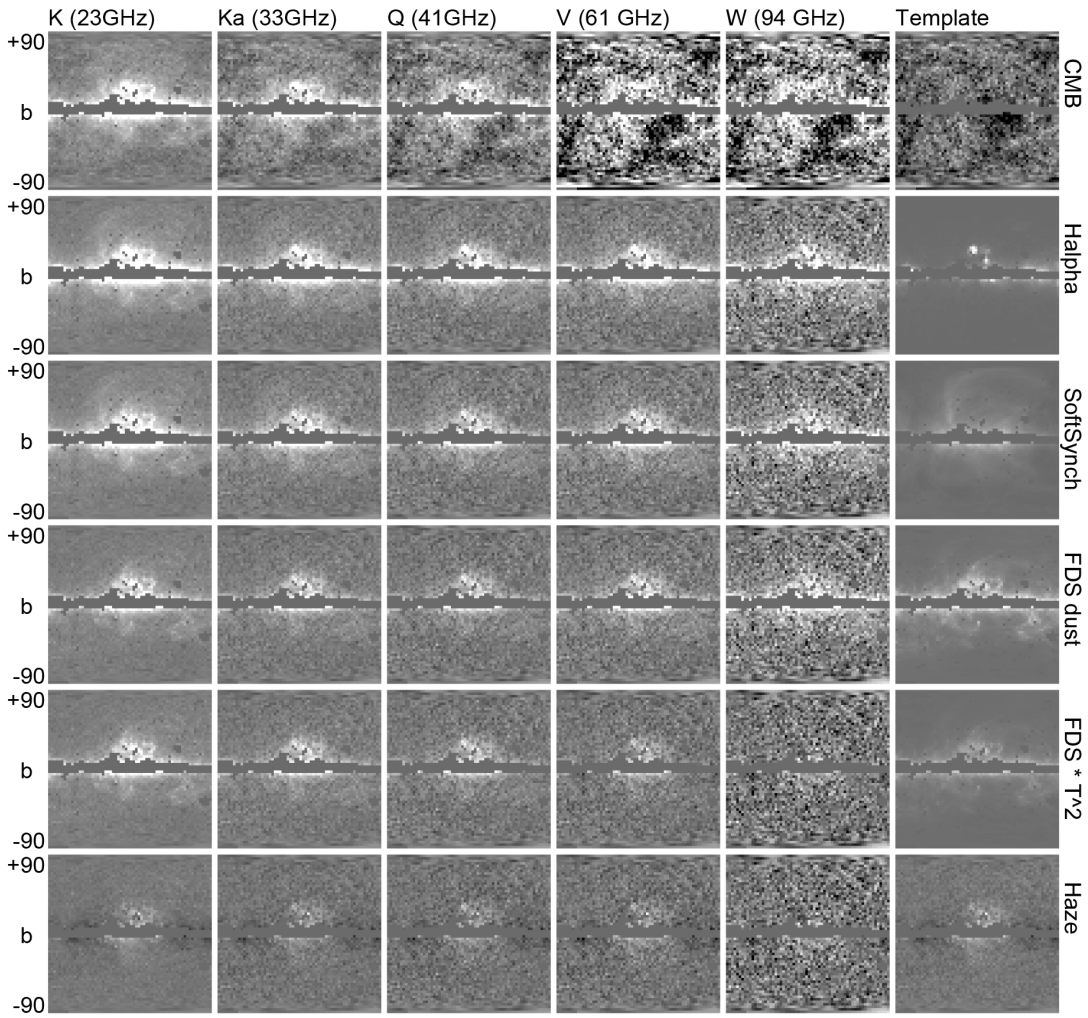

Рис. 1: WMAP haze, полученная Д.П, Финкбейнером (D.P. Finkbeiner, "Microwave ISM Emission Observed by WMAP", ApJ **614** (2003) 186-193) для пяти различных частот - 23 ГГц, 33 ГГц, 41 ГГц, 61 ГГц, 94 ГГц, после вычета механизмов тормозного, мягкого синхротронного и жесткого синхротронного излучений, вращающейся и термальной пыли.

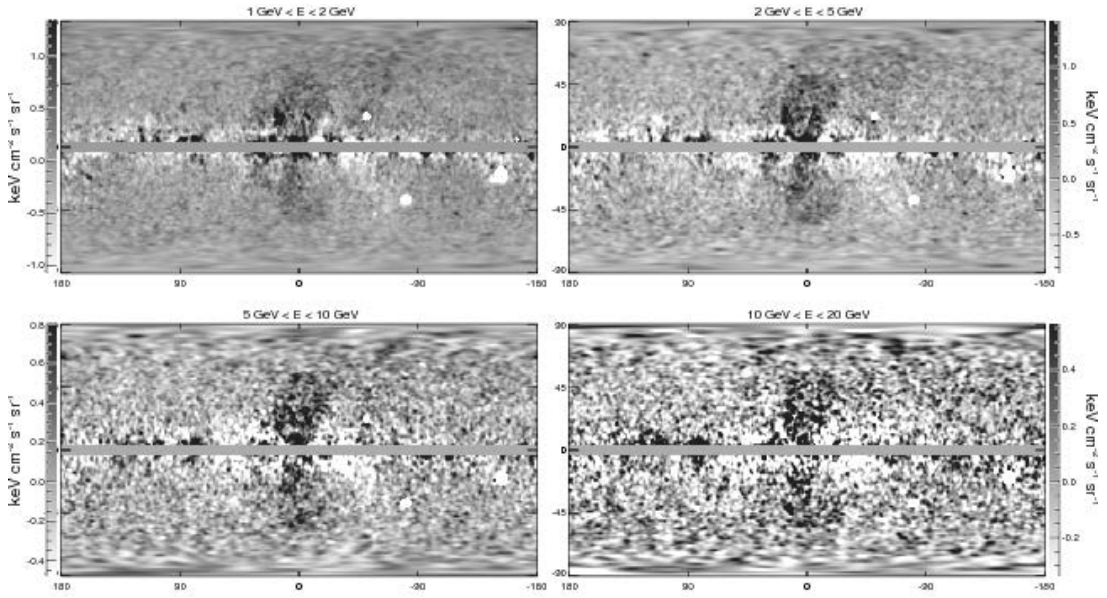

Рис. 2: Структура Fermi bubbles, полученная на четырех различных диапазонах энергий данных Fermi-LAT после вычета тормозного, обратного комптоновского излучений и излучения-продуктов распада π^0-мезонов, M. Su, T. R. Slatyer, D. P. Finkbeiner, "Giant Gamma-ray Bubbles from Fermi-LAT: AGN Activity or Bipolar Galactic Wind?", Astrophys.J. **724** 1044-1082 (2010).

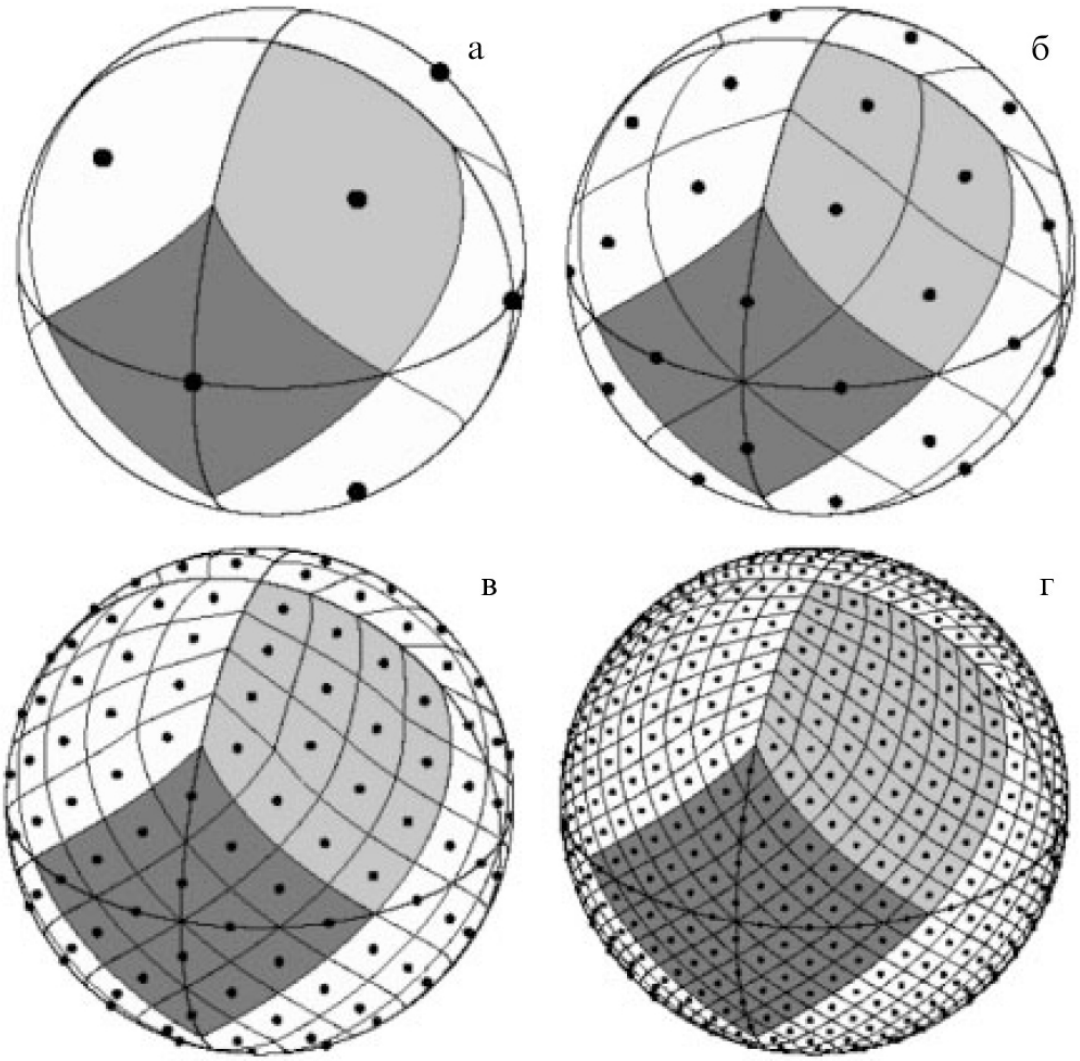

Рис. 3: Ортографический вид разбиения HEALPix на сфере. Сфера иерархически мозаично разбита на криволинейные четырехугольники. Светло-серым цветом отмечен один из восьми (по четыре на юге и на севере) идетничных полярных базовых пикселей. Темно-серым цветом показан один из четырех одинаковых экваториальных базовых пикселей. Разрешение возрастает при делении каждого пикселя на четыре новых. На картинке изображено увеличение параметра N_{side}, равного, соответственно, 1 (а), 2 (б), 4 (в) и 8 (г). Площади всех пикселей одинаково, они расположены на линиях постоянной широты. K. M. Gorsky et al., "HEALPix – a Framework for High Resolution Discretization, and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere", Astrophys.J **622** 759-771 (2005).

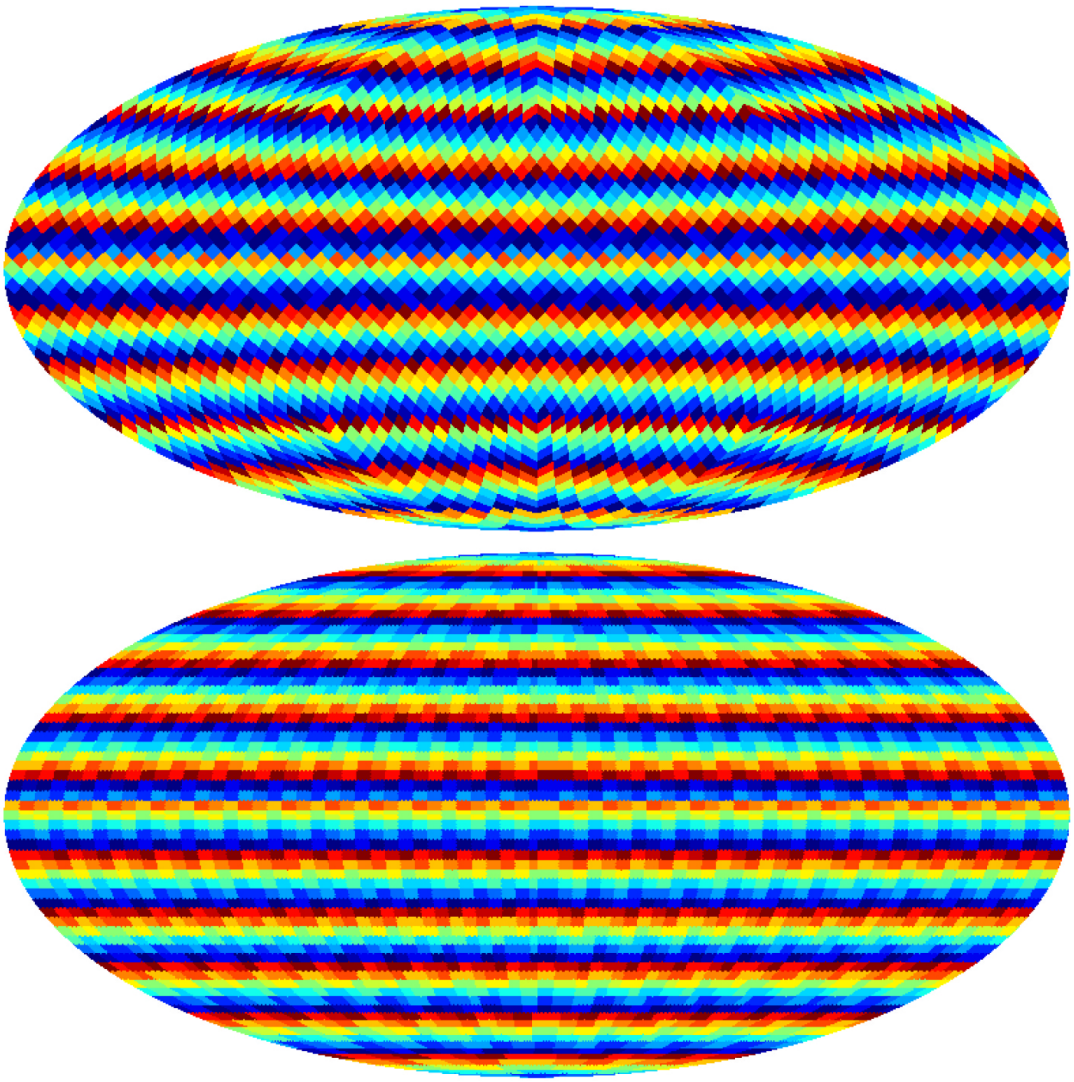

Рис. 4: Различие между системами пикселизации HEALPix (сверху) и GLESP (снизу), A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky et al., "Gauss-Legendre Sky Pixelization (GLESP) for CMB maps", Int. J. Mod. Phys. D. **14** 275 (2005).

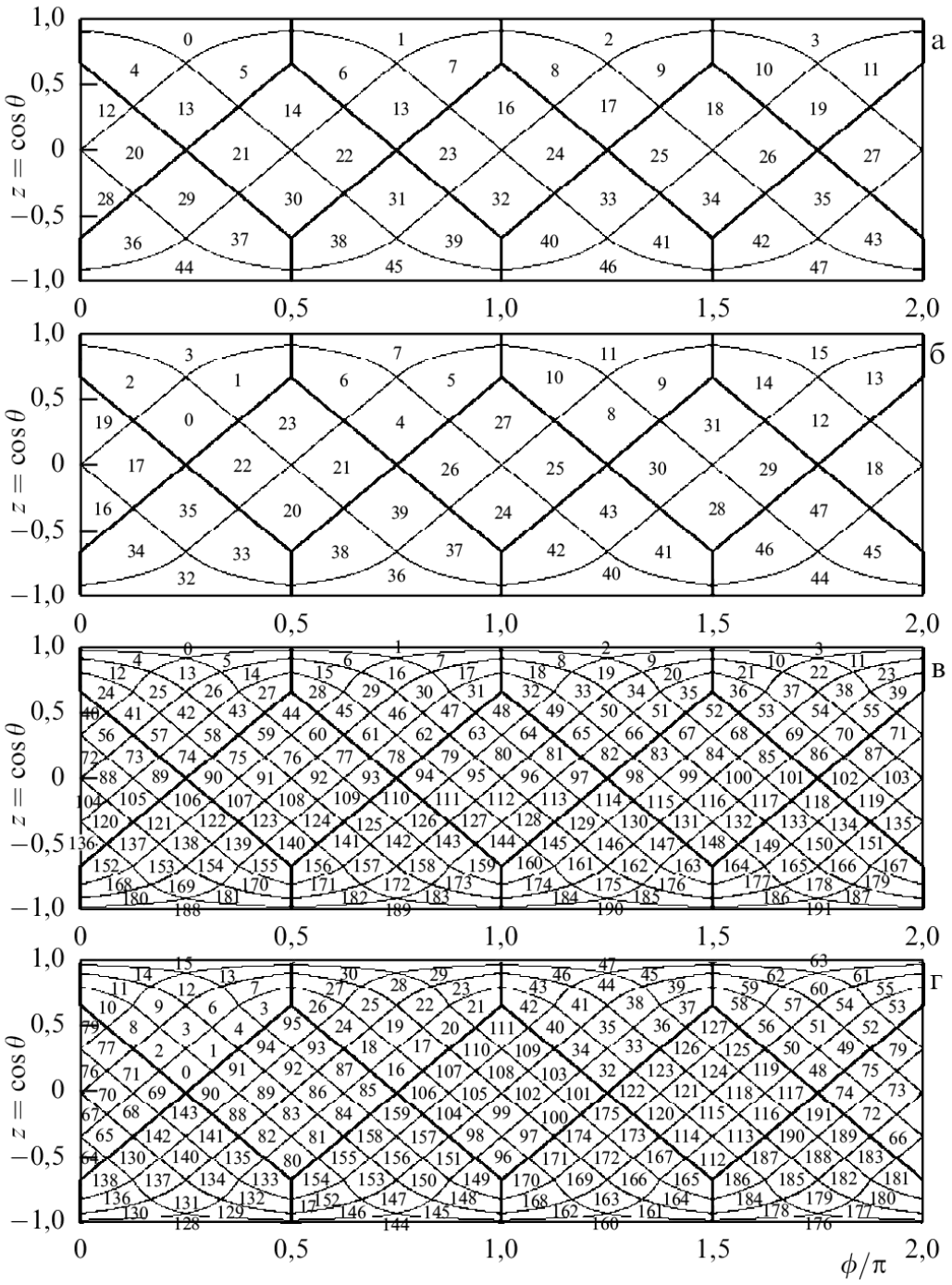

Рис. 5: Две системы индексации пикселов на сфере на сетке HEALPix для параметров разрешения $N_{side} = 2$ (а, б) и $N_{side} = 4$ (в,г). Показана нумерация RING и NESTED. K. M. Gorsky et al., "HEALPix – a Framework for High Resolution Discretization, and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere", Astrophys.J **622** 759-771 (2005).

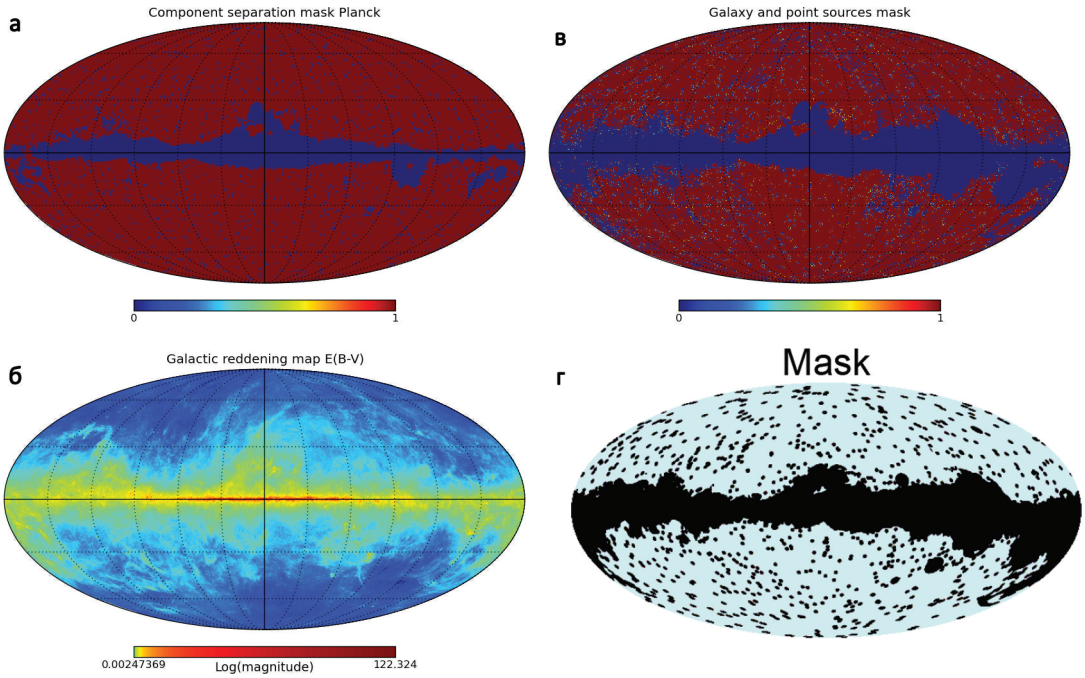

Рис. 6: Создание используемой маски Галактики и точечных источников. На рисунке а показана маска Planck для выделения и изучения компонент излучения межзвездной среды ($COM_CompMap_Mask-ruler minimal_2048_R1.00.fits$), на рисунке б показана карта галактического покраснения E_{B-V}. На рисунке в показана итоговая маска, в которой закрыты области с покраснением больше одной магнитуды, области, где излучение H_α больше десяти Рл и другие яркие объекты на небе, которые не закрываются при выше указанных процедурах, на рисунке г – маска, используемая коллаборацией Planck в исследовании [5].

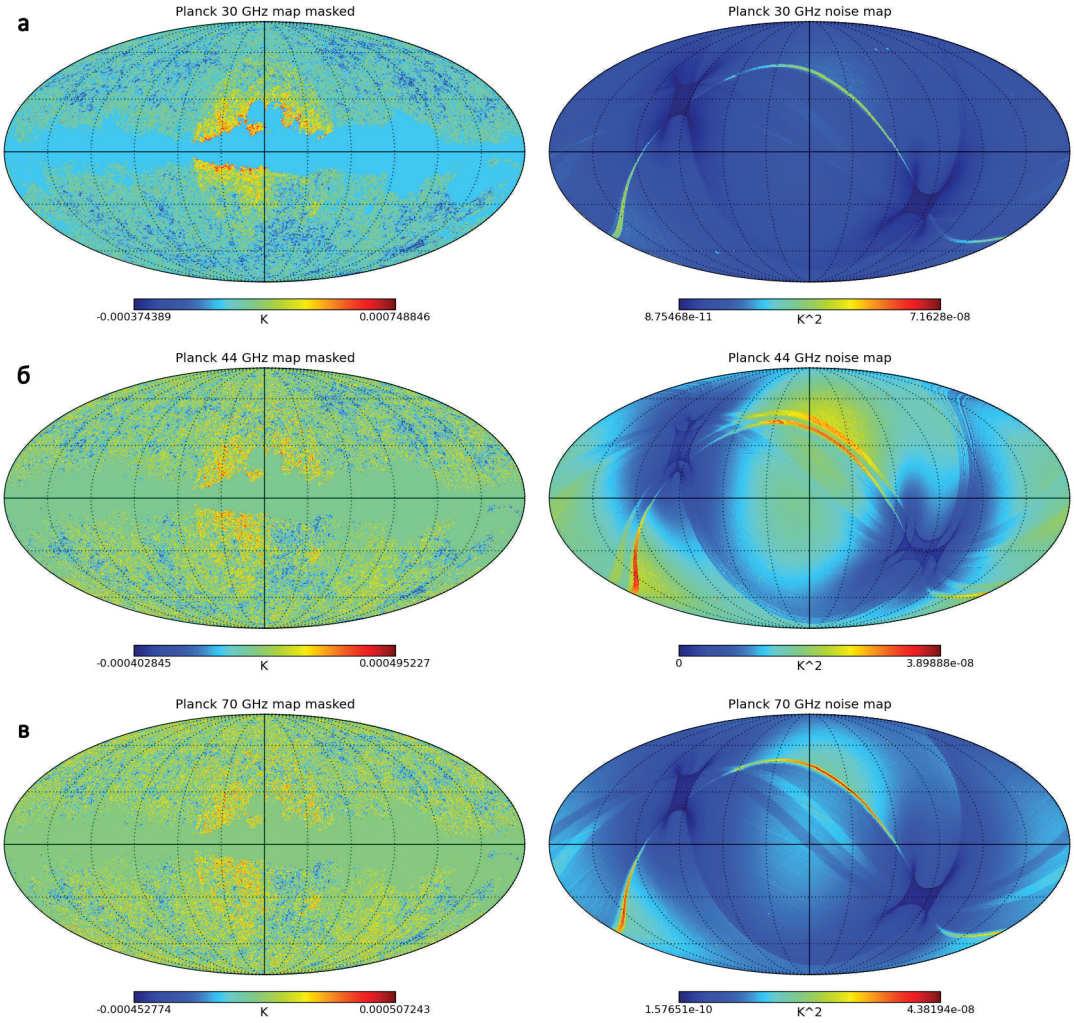

Рис. 7: Исходные карты спутника Planck и карты ковариаций их шумов: 30 ГГц, 44 ГГц и 70 ГГц, соответственно. На карты наложена маска, описанная в параграфе 3.4, рис. 6.

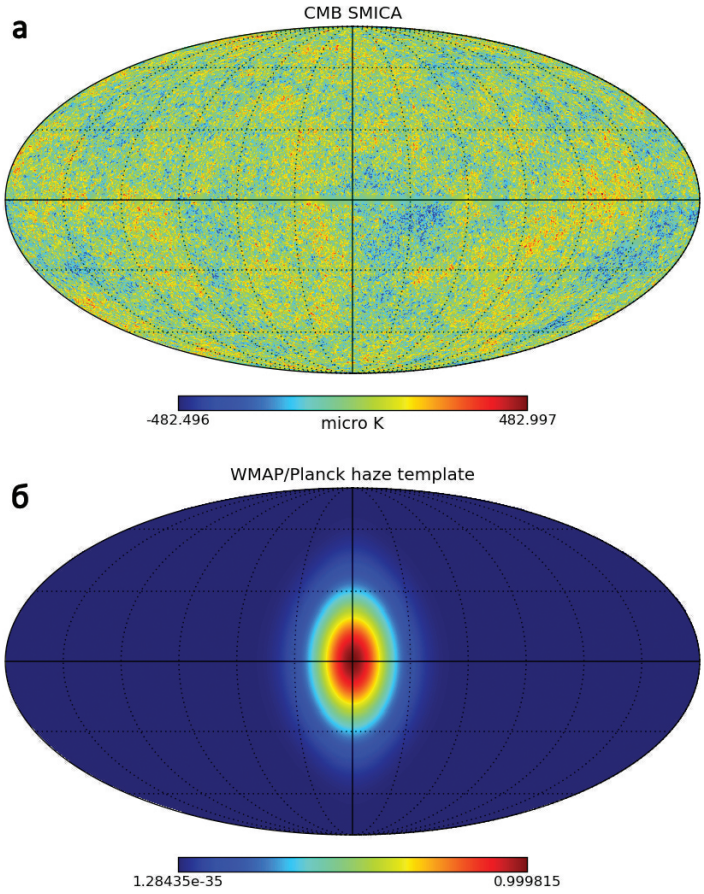

Рис. 8: а - карта анизотропии реликтового излучения SMICA, б - шаблон для WMAP/Planck haze, описанный в пункте 3.3 – двумерный гауссов эллипс с $\sigma_l = 15°$, $\sigma_b = 20°$.

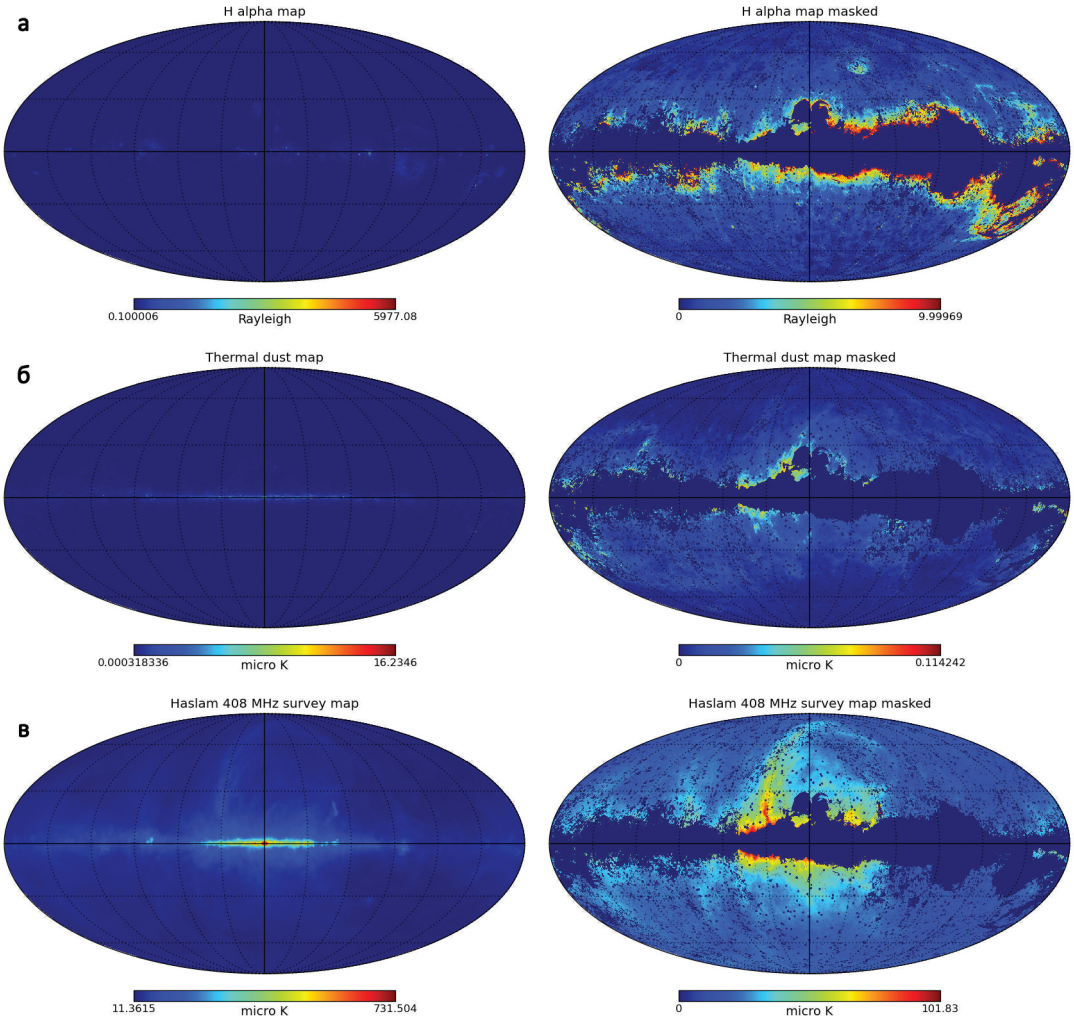

Рис. 9: Карты шаблонов механизмов излучения межзвездной среды: левый столбец – без наложения маски, правый столбец – с наложенной маской (3.4, рис. 6). а – шаблон H_α, используемый для создания карты тормозного излучения ($Halpha_fwhm06_1024.fits$), б – шаблон излучения горячей пыли ($lambda_fds_dust_94GHz.fits$), в – карта Haslam 408 MHz, используемая как шаблон для синхротронного излучения ($lambda_haslam408_dsds.fits$).

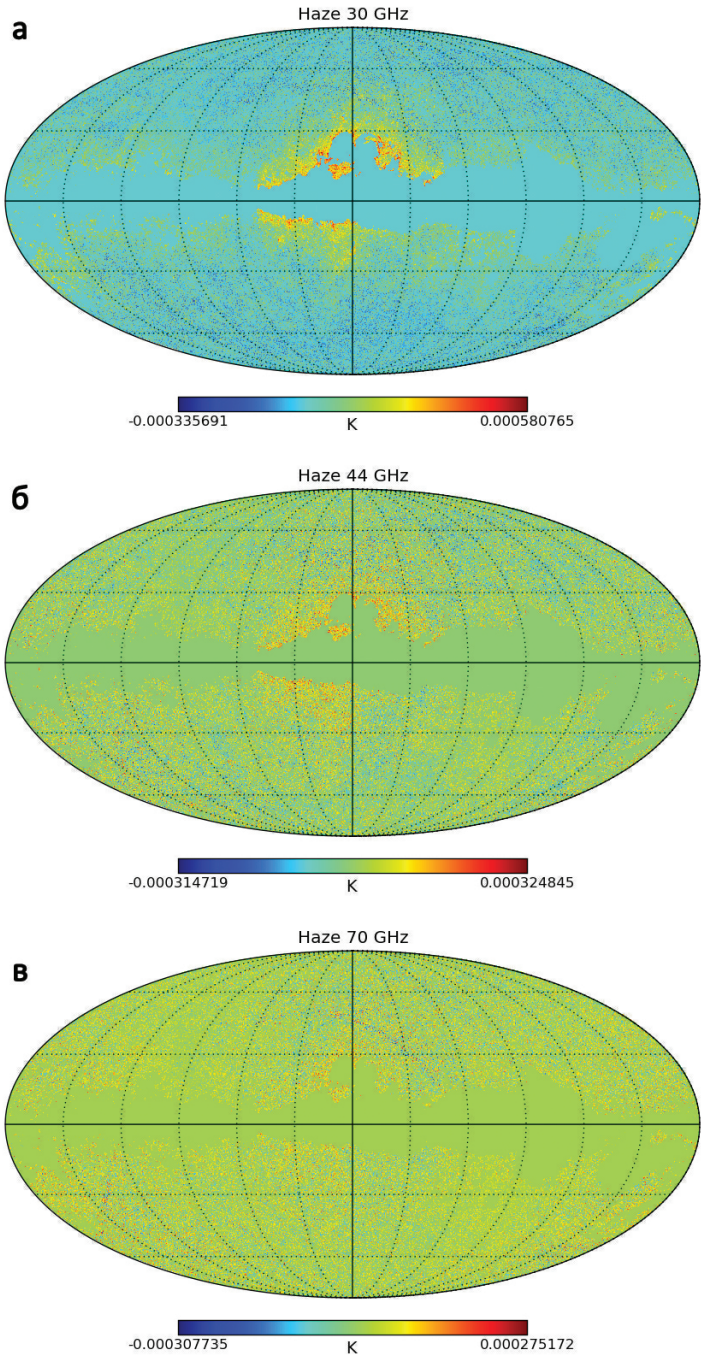

Рис. 10: Выделенное в процессе обработки излучение WMAP/Planck haze на частотах 30, 44 и 70 ГГц, соответственно.

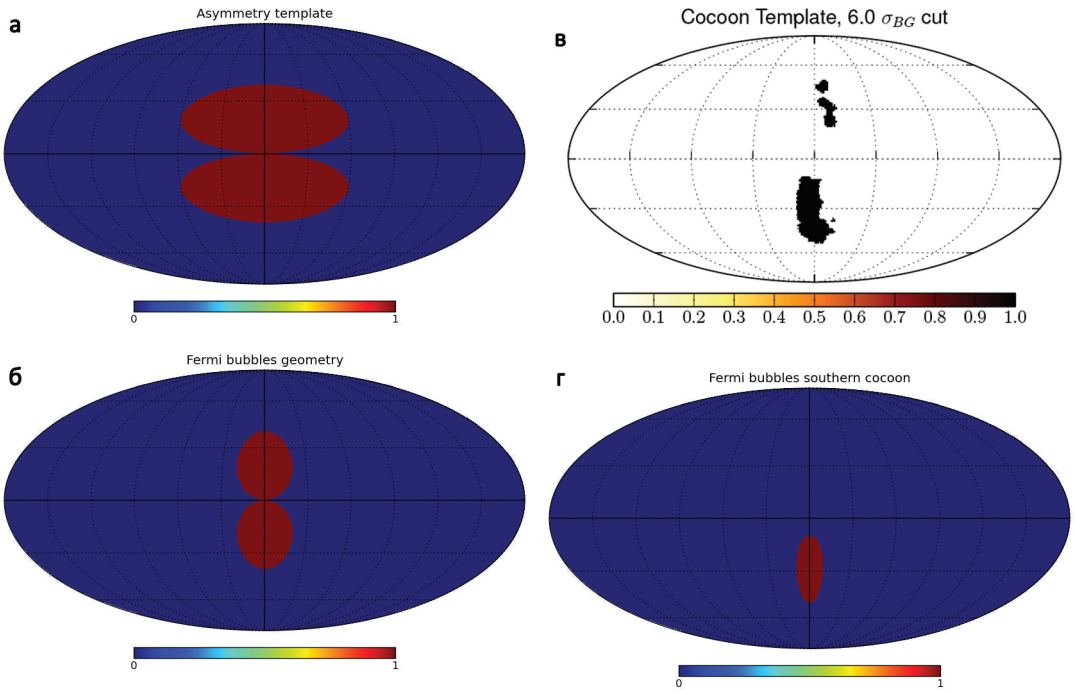

Рис. 11: а-б: шаблоны для проверки симметрии север-юг полученного излучения. Шаблон б повторяет пространственную структуру пузырей Ферми, шаблон а представляет собой два радиально-симметричных эллипса с полуосями $\sigma_l = \sigma_b = 20°$. в: подструктуры в пузырях Ферми, полученные в работе [9], г: шаблон для южной подструктуры.

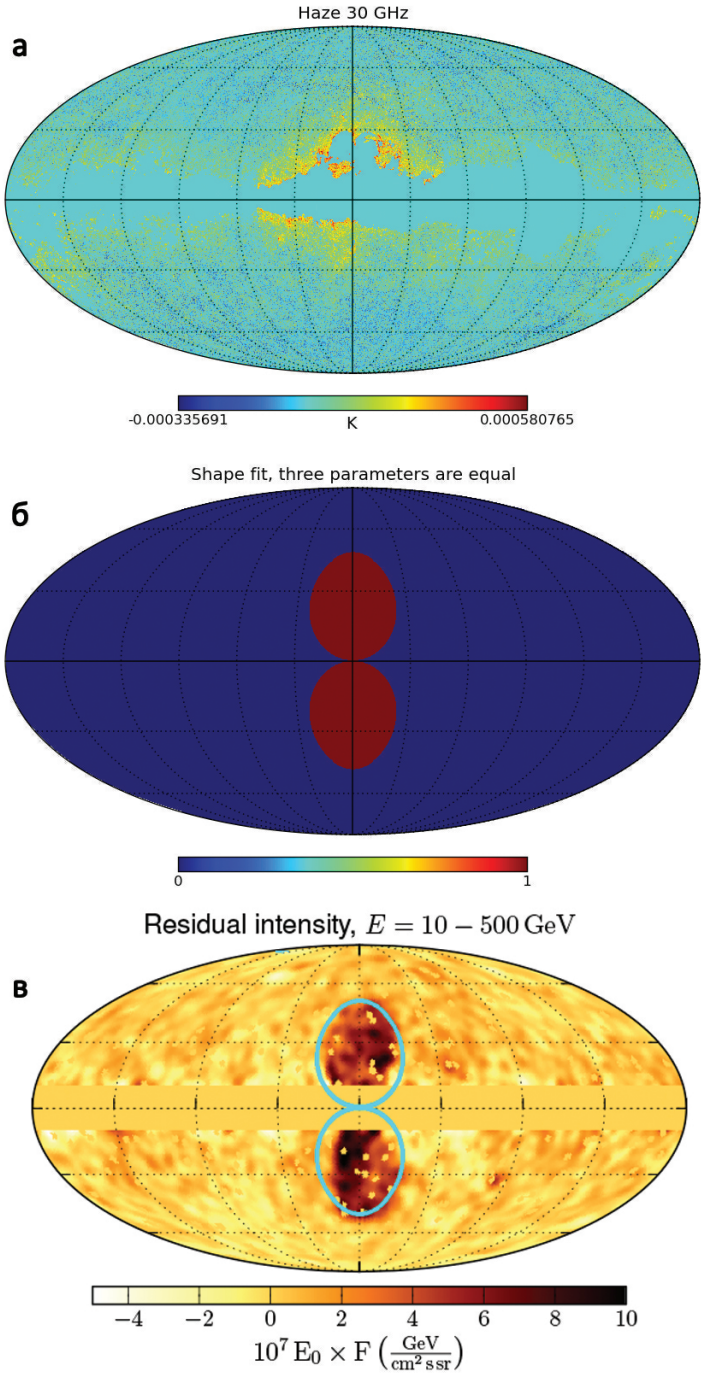

Рис. 12: Нахождение размеров полученного излучения: на рисунке а для сравнения показано избыточное излучение на частоте 30 ГГц, на рисунке б - аппроксимация двумя симметричными эллипсами, на рисунке в – полученная в [9] пространственная структура пузырей Ферми в сравнении с полученной пространственной структурой WMAP/Planck haze.