

На правах рукописи

РЯБИНКОВ АНДРЕЙ ИВАНОВИЧ

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
АБСОРБЦИОННЫХ СИСТЕМ
В СПЕКТРАХ КВАЗАРОВ**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2008

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель доктор физико-математических наук
Каминкер А.Д.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Гнедин Ю.Н. (ГАО РАН)

доктор физико-математических наук
Комберг Б.В. (АКЦ ФИАН)

Ведущая организация Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга МГУ

Защита состоится 25 декабря 2008 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан 24 ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук _____ Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Исследования распределения вещества во Вселенной на масштабах десятков и сотен мегапарсек (Мпк) интенсивно ведутся в настоящее время, особенно в связи с открытием вариаций температуры реликтового излучения. В результате анализа глубоких обзоров галактик и скоплений галактик было установлено существование так называемой крупномасштабной структуры, объединяющей такие структурные элементы, как “стены”, “волокна” и “войды” (пустоты). В силу пределов чувствительности детектирующих приборов современные глубокие обзоры неба включают галактики и скопления галактик, соответствующие сравнительно небольшим значениям космологического красного смещения ($z \leq 0.5$). В этой связи представляют особый интерес исследования пространственно-временного распределения вещества во Вселенной при больших значениях красных смещений ($z > 0.5$). Одним из перспективных методов таких исследований является статистический анализ абсорбционных систем в спектрах квазаров.

Квазары – наиболее яркие объекты со светимостью $\sim 10^{46} - 10^{47}$ эрг/с – расположены на больших космологических расстояниях, соответствующих космологическому красному смещению $0 < z < 6$. Линии и системы линий поглощения в спектре квазара формируются при прохождении излучения квазара сквозь вещество далеких галактик, расположенных на луче зрения между наблюдателем и квазаром. Необходимость развития данного метода с учетом быстрого накопления наблюдательного материала определяет актуальность темы диссертации и ее место в современных исследованиях.

Цели работы. Целью диссертационной работы является исследование степени однородности и изотропности распределения вещества на масштабах десятков и сотен Мпк в интервале космологических красных смещений от настоящей эпохи ($z = 0$) до эпохи $z \sim 4$. В качестве индикатора вещества используются линии поглощения абсорбционных систем, наблюдаемые в спектрах квазаров. Исследование проводится методами математической статистики. Совокупность абсорбционных систем рассматривается как одномерный поток событий, структура которого изучается с использованием статистических процедур (т.н. статистик), которые широко применяются для исследования крупномасштабной структуры Вселенной.

Целями диссертации являются:

1. Моделирование потоков событий с заданной структурой и анализ их свойств с использованием современных статистических процедур, применяемых при решении общей задачи обнаружения сигнала на фоне шума. Выделение статистических процедур, обеспечивающих наибольшую значимость обнаруженного сигнала.
2. Составление каталога абсорбционных систем. Исследование распределения абсорбционных систем, представленных в каталоге, в интервале красных смещений $z_{\text{abs}} = 0 - 3.88$. Анализ влияния селекционных эффектов.
3. Поиск пространственных и временных периодов в распределении абсорбционных систем и их сравнение с характерными масштабами, полученными

ми другими авторами при анализе распределений галактик и их скоплений для небольших значений $z < 0.5$.

4. Моделирование пространственных структур с различной степенью упорядоченности. Моделирование потоков, образованных случайными пересечениями (прокальваниями) таких структур лучами зрения. Исследование характеристик таких потоков теми же методами, что использовались при анализе распределения абсорбционных систем.

Новизна работы.

1. Для анализа распределений абсорбционных систем предложен единый подход теории потоков событий. В рамках этого подхода предложен ряд новых статистических процедур, в том числе оценка значимости коэффициентов вейвлет-преобразования, примененного к точечной статистике; новая методика построения двухточечной корреляционной функции и оценка ее спектральных особенностей и др.
2. Проведено математическое моделирование потоков событий с различной заданной структурой и предложена классификация статистик, используемых при исследовании крупномасштабной структуры распределения вещества во Вселенной.
3. Составлен наиболее полный на данный момент каталог абсорбционных систем, содержащий информацию о 20 837 линиях различных элементов, зарегистрированных в спектрах 784 квазаров.
4. Проведено наиболее полное на данный момент исследование распределения ~ 2500 абсорбционных систем, образованных линиями т.н. "тяжелых элементов" (т.е. всех элементов за исключением водорода), в широком интервале красных смещений $0 \leq z \leq 3.88$.
5. Впервые последовательно проведен статистический анализ пространственных структур, характеристики которых обладают как детерминированными (упорядоченными), так и стохастическими (случайными) свойствами. Показано, что такие структуры во Вселенной могут объяснить не только результаты, полученные в данной диссертации, но и аналогичные результаты других статистических исследований.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов диссертации, полученных путем обработки и анализа данных наблюдений, подтверждается использованием общепринятых методик обработки результатов физического эксперимента. Все используемые методики основаны на методах математической статистики. При проведении статистического анализа во всех случаях производился выбор функции преобразования, определялась процедура ее вычисления и критерий согласия, формулировалась основная гипотеза и определялась ее критическая область. Полученный результат сопровождается указанием уровня значимости или доверительной вероятности, при котором он получен.

Достоверность результатов диссертации, полученных аналитически или путем численного моделирования, подтверждается использованием адекватных математических и численных методов в рамках физических приближений,

применимость которых ограничена четко сформулированными критериями. Результаты численных расчетов, там, где это было возможно, сверялись с теоретическими формулами, полученными в предельных случаях.

Практическая значимость работы. Результаты диссертации, относящиеся к статистическому анализу и моделированию потоков событий, важны для адекватной интерпретации результатов статистических исследований распределений астрофизических объектов. Предложенные в работе статистические процедуры расширяют возможности таких исследований

Результаты диссертации, относящиеся к анализу распределений абсорбционных систем и моделированию пространственных структур, важны для теории образования крупномасштабной структуры во Вселенной.

Обнаружение периодичности в распределении абсорбционных систем открывает возможность применения практического метода измерения пространственных и временных масштабов крупномасштабного распределения вещества во Вселенной.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическое моделирование потоков событий с различной заданной структурой (случайной и регулярной). Предложение и разработка новых статистических процедур: определение коэффициентов точечного вейвлет-преобразования, оценка их значимости и анализ их свойств; построение двухточечной корреляционной функции и оценка ее спектральных особенностей.
2. Составление каталога абсорбционных систем, зарегистрированных в спектрах квазаров. Статистический анализ распределения абсорбционных систем в интервале космологических красных смещений $0 \leq z \leq 3.88$. Обнаружение последовательности статистически значимых максимумов (пики) и минимумов (провалов), положение которых при угловых масштабах секторов выборки $> 90^\circ$ не зависит от направления наблюдений. Интерпретация обнаруженной последовательности, как системы концентрических сферических слоев с повышенной и пониженной концентрацией абсорбционных систем.
3. Анализ регулярности обнаруженной системы пиков и провалов. Выявление периодичности распределения абсорбционных систем относительно сопутствующей системы координат при $z > 1$. Сравнение с оценками масштабов, полученных другими авторами при анализе распределений галактик и их скоплений для небольших значений $z < 0.5$.
4. Моделирование частично упорядоченных пространственных структур и анализ распределения абсорбционных систем в рамках гипотезы о существовании частичной упорядоченности крупномасштабной структуры распределения вещества во Вселенной.

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период с 1997 по 2008 гг. и изложены в 7 печатных работах (включая 5 статей в реферируемых журналах). Результаты диссертации были

представлены на международных и всероссийских конференциях: международные конференции “Ранняя Вселенная: космологические проблемы и инструментальные технологии” (Санкт-Петербург, Россия, 1999), IV международная конференция “Космология. Релятивистская астрофизика. Космомикрофизика. (COSMION-99)” (Москва, Россия, 1999), V международная конференция по космофизике (COSMION-2001) (Москва, Россия, 2001), Вторая международная гравитационная конференция “Гравитация, космология и релятивистская астрофизика” (Харьков, Украина, 2003); Всероссийская астрономическая конференция “Горизонты Вселенной” (Москва, Россия, 2004); на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф.Иоффе (Санкт-Петербург, Россия), на Санкт-Петербургском Астрономическом семинаре (Санкт-Петербург, Россия, 2004), на Общественном семинаре астрофизиков (Москва, Россия, 1999 и 2008) и на семинаре Отделения теоретической физики им. И.Е.Тамма Физического института им. П.Н.Лебедева РАН (Москва, Россия, 2004).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, содержит 200 страниц печатного текста, в том числе 75 рисунков, 2 таблицы и список литературы, включающий 116 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обоснована ее актуальность, новизна и достоверность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приведен краткий обзор результатов, полученных при исследованиях крупномасштабной структуры распределения вещества во Вселенной, характерных масштабов и степени упорядоченности элементов структуры; обсуждаются предлагаемые в литературе модели крупномасштабной структуры.

В **главе 2** для анализа распределений абсорбционных систем предложен единый подход теории потоков событий. Цель рассмотрения – определение детерминированных изменений интенсивности анализируемого потока событий на фоне их случайных вариаций. В разделе 2.1 рассмотрены вопросы теории потоков событий, их свойства, классификация и предельные теоремы. Раздел 2.2 посвящен вопросам математического моделирования потоков событий с заданной структурой. Описана процедура построения простейшего потока событий (стационарный пуассоновский поток). Предложена процедура, позволяющая изменять его интенсивность в соответствии с заданной функцией. Для этого введена рекуррентная формула построения моделируемых потоков событий:

$$x_{i+1} = \frac{\delta x_i}{1 + \lambda(i)} + x_i, \quad (1)$$

где x_{i+1} – момент (i+1)-го события моделируемого потока; δx_i – i-ый интервал

между событиями простейшего потока, полученного отдельно; $\lambda(i)$ – детерминированная составляющая интенсивности моделируемого потока. Процедура (1) позволяет из простейшего потока событий (x_1 равен моменту первого события простейшего потока) при заданной функции $\lambda(i)$ построить поток, интенсивность которого представляет собой смесь детерминированной функции $\lambda(i)$ с пуассоновским шумом. При проведении моделирования изменение интенсивности потока задавалось линейной, квадратичной, косинусоидальной функциями и одной из функций вейвлет-преобразования при разных значениях отношения сигнал-шум.

В разделе 2.3 рассмотрены статистические процедуры (т.н. статистики), которые наиболее часто применяются для исследования крупномасштабной структуры распределения вещества во Вселенной, и результаты их применения для анализа моделируемых потоков. В разделе 2.3.1 описана последовательность проведения статистического анализа. В разделе 2.3.2 предложена классификация статистик: статистики выборочной функции распределения, геометрические статистики, топологические статистики, спектральные статистики, вейвлет-статистики. Рассмотренные статистики можно разделить на две группы – точечные и биновые. Точечной называется статистика, у которой аргументом функции преобразования результатов измерений является совокупность точечных координат событий потока. В биновой статистике в качестве аргумента функции преобразования используется сглаживающая функция от координат событий потока, например, число событий потока, попавших в определенный интервал (бин). При наличии особенностей в структуре анализируемого потока биновые статистики дают более значимый результат, чем точечные статистики, но требуют отдельной процедуры выбора сглаживающей функции (например, размера бина).

В разделе 2.3.3 исследованы статистики выборочных функций распределения: функции распределения интервала между событиями потока и функции распределения числа событий потока в непересекающихся интервалах. Показано, что при применении рассмотренных статистик для решения задачи обнаружения сигнала на фоне шума велика вероятность ошибки второго рода, т.е. принятие основной гипотезы (поток событий является простейшим) в то время, как верна альтернативная гипотеза (интенсивность анализируемого потока значимо изменится). Для того, чтобы уменьшить вероятность ошибки второго рода, в рамках данных статистик предложена новая статистическая процедура: статистика отклонения от среднего. Она позволяет определить размер бина, который обеспечивает наибольшую значимость вариаций интенсивности потока, выделенных на фоне шума.

В разделе 2.3.4 рассмотрены геометрические статистики: статистики ближайших соседей; статистики n -точечных корреляционных функций; статистика нестандартного парного счета объектов; перколяционная статистика и статистика функции заполнения. Основное внимание в разделе уделено корреляционным функциям. Показано, что для получения их несмещенных оценок требуется значительный объем вычислений. Для анализа структуры потока событий предложена новая оценка двухточечной корреляционной функции,

которая позволяет сократить необходимые вычисления:

$$\xi_i(r) = \frac{\sum_{i=1}^N DD_i(r)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\ell_{1_i}}{\Delta r} \cdot X^*(x_i + r) + \frac{\ell_{2_i}}{\Delta r} \cdot X^*(x_i - r) \right)} - 1, \quad (2)$$

где $DD_i(r)$ – количество событий анализируемого потока, попадающих в один из двух интервалов $[x_i + r - \Delta r/2, x_i + r + \Delta r/2]$ и $[x_i - r - \Delta r/2, x_i - r + \Delta r/2]$ с шириной Δr ; ℓ_{1_i} и ℓ_{2_i} – длины отрезков ($\leq \Delta r$), соответствующих пересечениям первого и второго интервалов с анализируемым интервалом событий L (множители $\ell_{1_i}/\Delta r$, $\ell_{2_i}/\Delta r < \Delta r$ учитывают краевые эффекты интервала L ; если нет пересечения интервалов, то ℓ_{1_i} , $\ell_{2_i} = 0$); x_i – момент i -го события анализируемого потока; $X^*(x) = X_T(x) + \varepsilon(x)$, $X_T(x)$ – тренд анализируемого потока, $\varepsilon(x)$ – случайная величина с математическим ожиданием $M[\varepsilon] = 0$ и дисперсией $D[\varepsilon] = X_T(x)$. В числителе и знаменателе дроби в правой части (2) суммируются все точки потока, что эквивалентно подсчету пар, разнесенных на расстояние r . Основным отличием оценки (2) от существующих оценок двухточечной корреляционной функции является замена моделированного потока событий с заданными свойствами функцией $X^*(x)$, что значительно упрощает вычисления. Показано, что оценка (2) находится в хорошем соответствии с существующими оценками корреляционных функций [1].

В разделе 2.3.5 перечислены топологические статистики. В разделе 2.3.6 рассмотрены спектральные статистики: биновые и точечные. В рамках биновых спектральных статистик показано, что использование Фурье-преобразования двухточечной корреляционной функции позволяет надежно различать простейший поток событий и поток с периодическим изменением интенсивности даже при малых значениях отношения сигнал-шум ($<S/N>$).

Точечная спектральная статистика была введена в работе [2]. Ее функция преобразования определяется следующим выражением

$$S(k) = \frac{1}{N} \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^N \left[\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{L} \cdot x_i\right) \right] \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \left[\sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k}{L} \cdot x_i\right) \right] \right)^2 \right], \quad (3)$$

где x_i – момент i -го события потока, который содержит N событий в анализируемом интервале L ; k – гармоническое число, соответствующее целому числу периодов, расположенных в интервале L . Для простейшего потока событий $S(k)$ является случайной величиной с показательным распределением, математическое ожидание и дисперсия которого равны 1 (для целочисленных k).

В разделе 2.3.7 рассмотрены вейвлет-статистики: биновые и точечные. Основное внимание в разделе уделено точечной вейвлет-статистике, введенной в статьях [3, 4]. Предложен новый подход к оценке значимости коэффициентов вейвлет-преобразования, учету граничных эффектов и критерию фильтрации. В этом подходе рассматривается поток, моменты событий которого расположены в интервале $[-\infty, +\infty]$. Вводится случайная величина $W(y, k_w)$, значение которой определяется следующим выражением

$$W(y, k_w) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \frac{\varphi((x_i - y) \cdot k_w)}{\sqrt{\lambda}}, \quad (4)$$

где $\varphi((x - y) \cdot k_w)$ – вейвлет, x_i – моменты событий рассматриваемого потока, $\bar{\lambda}$ – его средняя интенсивность. Если выбирается нормированный вейвлет

$\int |\varphi((x-y) \cdot k_w)|^2 dx = 1$ и рассматриваемый поток является простейшим,

то, согласно закону больших чисел, случайная величина $W(y, k_w)$ будет иметь нормальное распределение с математическим ожиданием равным 0 и дисперсией равной 1. На практике рассматриваются потоки наблюдаемых событий, принадлежащих некоторому конечному интервалу. В этих случаях можно разместить n_1 вейвлетов таким образом, чтобы их центры y_j ($1 \leq j \leq n_1$) равномерно покрывали весь данный интервал. Для каждого значения y_j можно найти $W(y_j, k_w)$, используя модификацию формулы (4), в которой за пределами рассматриваемого интервала суммы заменяются интегралами (учет краевых эффектов). Если выбирается, например, n_2 значений вейвлет-коэффициентов k_w , то получается матрица вейвлет-коэффициентов размерностью $n_1 \times n_2$. В качестве функции преобразования, необходимой для статистического анализа, предлагается использовать спектр энергии

$$E_w(k_w) = \sum_{j=1}^{n_1} (W(y_j, k_w))^2 \cdot \quad (5)$$

Для определения границы критической области основной гипотезы можно выбрать соответствующее табличное значение квантиля χ^2 – распределения. Если значения $E_w(k_w)$ попадают в критическую область, то анализируемый поток событий не является простейшим, т.е. может содержать некоторую степень упорядоченности.

В работе использовался вейвлет следующего вида (т.н. “Мексиканская шляпа”)

$$\varphi(x) = A \cdot \left[1 - (x-y)^2 \cdot k_w^2 \right] \cdot e^{-\frac{1}{2}(x-y)^2 \cdot k_w^2}, \quad (6)$$

который является второй производной функции Гаусса. Величина A получается из условия нормировки и равна $A = \sqrt{\frac{4 \cdot k_w}{3 \cdot \sqrt{\pi}}}$. Для этого вейвлета предложено ввести функцию

$$X_w(y_j) = \frac{\sum_{k_w=k_w1}^{k_w2} \left[W(y_j, k_w) \cdot \frac{\sqrt{k_w}}{A} \right]}{k_w2 - k_w1 + 1}, \quad (7)$$

где $k_w1 \leq k_w \leq k_w2$, k_w – пробегает дискретный ряд значений между k_w1 и k_w2 . Функция (7) является аналогом обратного бинового вейвлет-преобразования и представляет собой сглаживающую функцию рассматриваемого потока событий, отфильтрованную от низкочастотных ($k_w < k_w1$) изменений интенсивности потока (например, тренда) и от высокочастотных ($k_w > k_w2$) вариаций (например, шума). Функция (7) используется для перехода от потока событий к непрерывному случайному процессу, который рассматривается уже с использованием биновых статистик.

В разделе 2.4 сформулированы основные результаты главы 2 и сделаны выводы:

- Наиболее универсальной из всех рассмотренных статистик является точечная вейвлет-статистика. Ее использование позволяет даже при малых значениях $\langle S/N \rangle$ обнаружить в анализируемом потоке событий область (или области), в которых вариации интенсивности потока значимо отличаются от среднего уровня; оценить значимость этих вариаций; определить их координаты.
- При исследовании структуры потока событий, интенсивность которого является периодической функцией, наиболее эффективным является применение спектральных статистик.

Глава 3 посвящена исследованию характера распределения абсорбционных систем. В разделе 3.1 дано краткое определение квазаров и абсорбционных систем, наблюдаемых в их спектрах. В разделе 3.2 описан новый каталог абсорбционных систем [5]. Он содержит информацию о 20837 абсорбционных линиях, зарегистрированных в спектрах 784 квазаров.

В разделе 3.3 проведен статистический анализ распределения абсорбционных систем в спектрах квазаров в интервале красных смещений $z_{\text{abs}} = 0 - 3.7$. Совокупность абсорбционных систем рассматривается как поток событий, структура которого изучается при помощи статистики отклонения от среднего и точечной вейвлет-статистики. Показано, что распределение абсорбционных систем содержит значимую неоднородную компоненту, представляющую собой последовательность чередующихся областей с повышенной (пики) и пониженной (провалы) плотностью событий относительно среднего уровня (см. Рис.1). При увеличении объема выборки абсорбционных систем большинство пиков и провалов сохраняют свои положения, а их значимость возрастает. Было установлено, что в рассматриваемом интервале красных смещений значимости амплитуд пиков и провалов монотонно не меняются; средний уровень значимости амплитуд на Рис.1 составляет $(1.9 \pm 0.6) \cdot \sigma$. Показано, что распределение абсорбционных систем может быть представлено нормальным процессом, математическое ожидание которого описывается квазипериодической функцией, период которой немонотонно меняется с z .

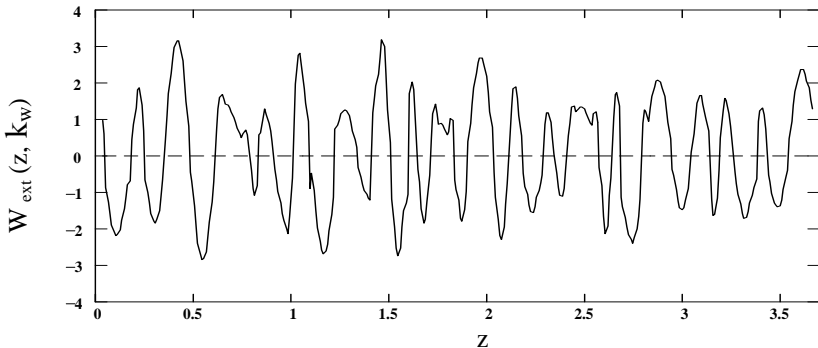


Рис.1: Распределение максимальных по модулю значений вейвлет-коэффициентов в диапазоне значений $15 \leq k_w \leq 28$; величины $W_{\text{ext}}(z, k_w)$ отложены в единицах стандартных отклонений σ .

В разделе 3.4 проведено сравнение распределений абсорбционных систем,

построенных в секторах с различными углами раскрытия относительно главных осей экваториальной и галактической систем координат. Показано, что распределения абсорбционных систем в полусферах сохраняют ту же последовательность пиков и провалов. При вращении полусфер такие последовательности, построенные для различных углов поворота относительно главной оси, образуют вертикальные полосы (см. Рис. 2). Большинство этих полос непрерывны, и их положение не меняется при переходе от экваториальной к галактической системе координат, что свидетельствует в пользу изотропного (или близкого к изотропному) характера исследуемого распределения. Аналогичная картина наблюдается и для 90° секторов. Однако в этом случае полосы более фрагментарны. Дальнейшее уменьшение угла раскрытия сектора ведет к увеличению фрагментарности полос.

В разделе 3.5 рассмотрено распределение абсорбционных систем относительно масштабирующей функции следующего вида

$$\tau(z) = \operatorname{arsh}[(\eta(z) - a_1) \cdot a_2], \quad (8)$$

$$\text{где } \eta(z) = \int_0^z \frac{dx}{\sqrt{\Omega_m \cdot (1+x)^3 + \Omega_\Lambda}}; \quad \Omega_m = 0.3 \text{ и } \Omega_\Lambda = 0.7. \quad (9)$$

Функция $\eta(z)$ представляет собой безразмерное расстояние (вдоль луча зрения) в сопутствующей системе координат для плоской модели Вселенной. Анализ распределений абсорбционных систем относительно функции (8) показал, что при $a_1 = 1.26$ и $a_2 = 3.37$ в спектре мощности (функция преобразования (3)) при $k = 16$ имеется пик, достоверная вероятность которого $> 4\sigma$ при различных значениях интервала лучевых скоростей δv , соответствующего объединению нескольких абсорбционных систем в одну. Величина δv менялась в диапазоне от 10 км/с до 10000 км/с (см. Рис. 3). Период следования пиков (провалов) по шкале функции (8) определяется как $\Delta\tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{16} = 0.199 \pm 0.006$.

С использованием выражения (2) были построены двухточечные корреляционные функции распределений абсорбционных систем относительно функции (8) при разных значениях δv и Δv , где Δv – интервал отступа от квазара в пространстве лучевых скоростей; абсорбционные системы внутри этого интервала исключались из рассмотрения. Показано, что периодичность следования пиков (провалов) по шкале функции (8) сохраняет свою значимость (на уровне $> 5\sigma$) в широком диапазоне значений δv от 50 км/с до 10000 км/с и Δv от 0 км/с до 10000 км/с (см. Рис. 4). Период следования пиков (провалов) двухточечных корреляционных функций равен $\Delta\tau = 0.199 \pm 0.011$, т.е. совпадает с периодом, приведенным выше.

В разделе 3.6 исследовано влияния селекционных эффектов на полученные результаты. Рассмотрены: а) группирование абсорбционных систем вдоль и поперек луча зрения; б) возможная связь с распределением самих квазаров; в) наблюдательная селекция (окна прозрачности в атмосфере Земли, селективные свойства регистрирующей аппаратуры и т.д.). Показано, что рассмотренные селекционные эффекты не оказывают заметного влияния на полученные результаты.

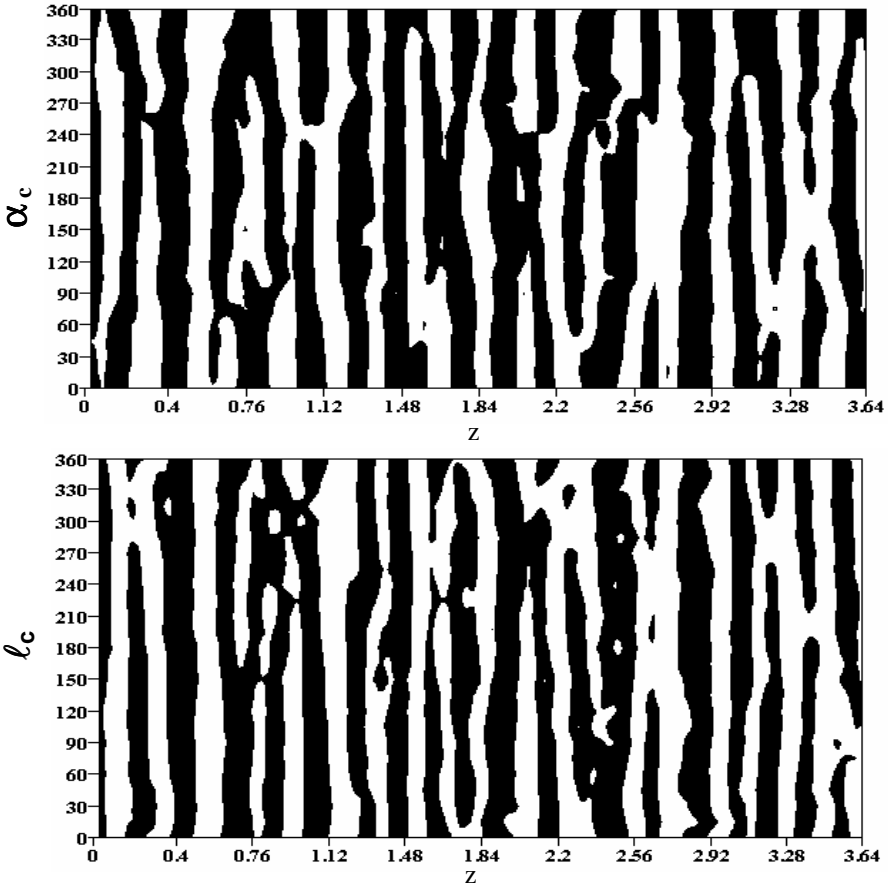


Рис. 2: Распределение абсорбционных систем в виде функции $X_w(z)$ (7) в 24 полусферах. Верхний рисунок: экваториальная система координат; по вертикальной оси отложены значения α_c – прямого восхождения центров полусфер в градусах; полусферы получены последовательным поворотом меридианальной плоскости в экваториальной системе координат вокруг мировой оси ($\delta = \pm 90^\circ$, где δ – склонение) с шагом $\Delta\alpha = 15^\circ$ (1^h). Нижний рисунок: галактическая система координат; по вертикальной оси отложены значения l_c – галактической долготы центров полусфер в градусах; полусферы получены последовательным поворотом плоскости, разделяющей небесную сферу на две равные части, вокруг оси, проходящей через северный и южный галактические полюса с шагом $\Delta l = 15^\circ$. На обоих рисунках по горизонтальной оси отложены значения красного смещения. Черные области соответствуют повышенной концентрации абсорбционных систем (пики), белые – пониженной концентрации (провалы).

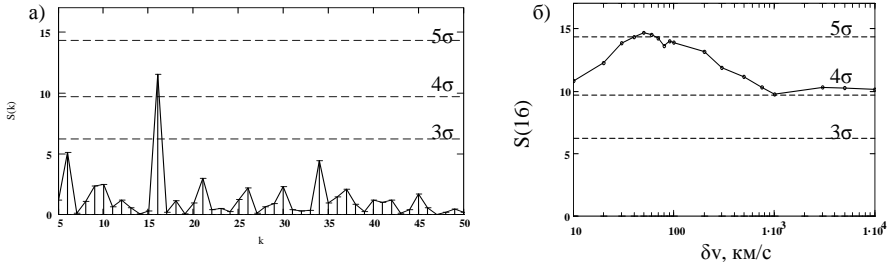


Рис. 3: а) Спектр мощности распределения абсорбционных систем при $\delta v = 500$ км/с по шкале функции (8) при $a1 = 1.26$ и $a2 = 3.37$. Вертикальные линии – значения спектра мощности при целочисленных значениях k , для наглядности также показана их огибающая. Штриховыми линиями показаны границы критической области при разных уровнях доверительной вероятности. б) Амплитуда пика спектра мощности для $k = 16$ при различных значениях δv .

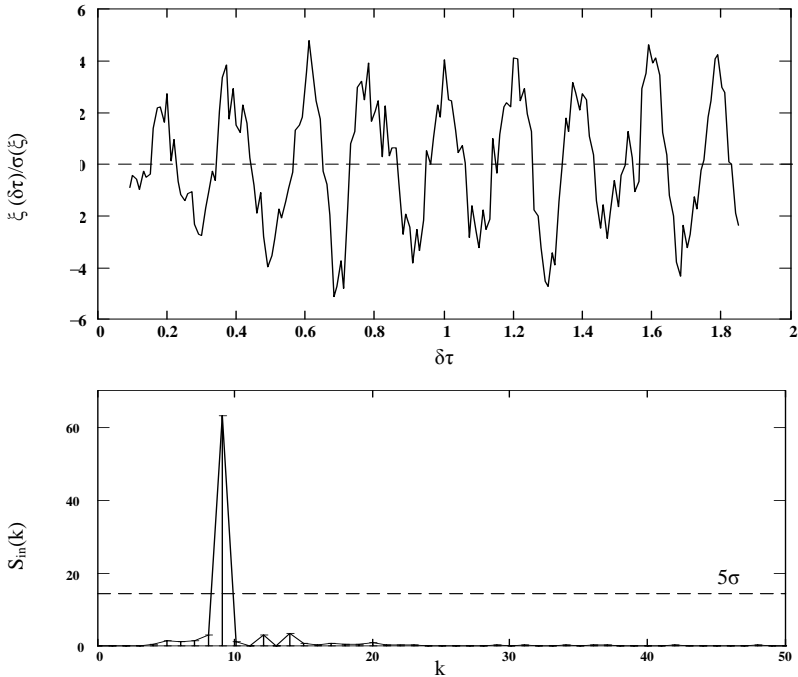


Рис. 4: Верхний график: двухточечная корреляционная функция (2), полученная при анализе распределения 2003 абсорбционных систем, красные смещения которых соответствуют моментам событий, вычисленных по формуле (8) при $\delta v = 500$ км/с и $\Delta v = 0$ км/с. Нижний график: спектр мощности этой корреляционной функции, построенный с помощью биновой спектральной статистики.

В разделе 3.7 сформулированы основные результаты главы 3. Анализируемое распределение абсорбционных систем представляет собой систему концентрических (относительно наблюдателя) сферических слоев, в которых наблюдается чередование повышенной и пониженной концентрации абсорбционных систем. При этом предполагается, что распределение с такими же свойствами может регистрировать любой наблюдатель во Вселенной, т.е. выполняется Космологический принцип (все точки пространства эквивалентны, а Вселенная в среднем однородна и изотропна). Показано, что полученные особенности распределения абсорбционных систем могут трактоваться в рамках временной интерпретации. В литературе временную интерпретацию связывают с изменением глобальных космологических параметров, например, с осцилляциями функции Хаббла по шкале космологического времени.

В главе 4 представлена альтернативная пространственная интерпретация особенностей распределения абсорбционных систем. В начале главы обсуждаются работы [6 – 11], в которых с помощью моделирования исследовалась возможность получения периодических зависимостей в распределении различных пространственных структур крупномасштабного распределения вещества во Вселенной. Отмечена необходимость такого моделирования для пространственного распределения абсорбционных систем.

В разделе 4.1 рассмотрены радиальные распределения узлов простой кубической решетки. Показано, что при произвольно выбранном положении центра концентрических шаровых слоев радиальное распределение узлов простой кубической решетки, расположенных в этих слоях, является периодическим с максимальным пространственным периодом, равным шагу решетки.

В разделе 4.2 выполнено моделирование ряда частично упорядоченных решеток, построенных на базе простой кубической решетки, и проведен статистический анализ их характеристик. В разделе 4.2.1 рассмотрены случайные решетки, образованные точками (x_s, y_s, z_s) , где $x_s = x + x_n$, $y_s = y + y_n$ и $z_s = z + z_n$; x , y и z – целые числа; x_n , y_n и z_n – случайные числа, имеющие нормальное распределение с математическим ожиданием, равным 0, и дисперсией, равной D . В разделе 4.2.2 рассмотрены т.н. “облачные” решетки, когда каждый узел решетки заменяется на несколько ($m > 1$) узлов случайной решетки. В разделе 4.2.3 рассмотрены решетки на фоне простейшего поля событий. Степень упорядоченности данных решеток характеризуется значением параметра e ($e \geq 1$), равного числу точек простейшего поля событий, приходящихся на один узел первоначальной решетки. В разделе 4.2.4 рассмотрены т.н. “редующие” решетки, представляющие собой простые кубические решетки, у которых случайным образом удалено определенное количество ее узлов. Степень упорядоченности данных решеток характеризуется значением параметра u ($u \leq 1$), который равен отношению числа оставшихся узлов к первоначальному числу узлов решетки.

Показано, что радиальное распределение узлов всех рассмотренных типов решеток содержит осциллирующие компоненты в широком диапазоне параметров, определяющих степень случайности этих распределений. Для случайных решеток это справедливо при $\sqrt{D} < 0.4$; для простой кубической решетки на фоне простейшего поля событий – при значениях $e \leq 100$; для ре-

деющей простой кубической решетки – при $u \geq 0.01$. Периоды колебаний соответствуют различным масштабам, максимальный из которых равен шагу решетки. Амплитуда колебаний растет с увеличением параметров m и u и уменьшается с ростом параметра e .

В разделе 4.2.5 показано, что полученные выше результаты справедливы также для объемно-центрированной и гранецентрированной кубических решеток. Максимальный пространственный период в распределении узлов этих решеток равен $\sqrt{2}/2$ и $\sqrt{3}/2$ шага решетки, соответственно.

В разделе 4.3 рассмотрены пространственные двухточечные корреляционные функции для распределения узлов различных решеток, созданных на базе простой кубической решетки. Показано, что эти функции содержат осциллирующие компоненты, периоды которых совпадают с периодами осцилляции радиального распределения узлов этих решеток.

В разделе 4.4 для различных типов решеток рассмотрены распределения их узлов, попадающих в заданные угловые сектора, аналогичные распределениям абсорбционных систем, полученным в разделе 3.4. Показано, что при вращении полусфер и 90° -х секторов вокруг произвольно выбранной оси получаются полосы с повышенной и пониженной концентрацией узлов, причем позиции полос соответствуют позициям пиков и провалов суммарного по всем направлениям распределения этих узлов. Полученное таким образом распределение аналогично системе полос, представленной на Рис. 2. При дальнейшем уменьшении угла раскрытия секторов исходное (суммарное по всем направлениям) распределение узлов решетки разрушается, и полосы становятся все более фрагментарными, как и в случае распределения абсорбционных систем.

В разделе 4.5 на примере простой кубической решетки рассмотрен результат прокалывания решетки, т.е. многократного ее просвечивания лучами зрения, исходящими из одного центра в случайных направлениях и имитирующими направления на квазары. Показано, что при случайном прокалывании решетки получается поток событий, свойства которого аналогичны свойствам потока радиального распределения узлов этой решетки. Проведен анализ потоков событий, полученных при случайном прокалывании решетки, с использованием статистики отклонения от среднего, точечной вейвлет-статистики, а также дополнительных статистических тестов. Показано, что при сравнимом числе событий в потоках абсорбционных систем и потоках, полученных в результате прокалывания решетки, два этих типа распределений имеют общие свойства.

В разделе 4.6 с использованием расширенной версии каталога [5] показано, что распределение абсорбционных систем в сопутствующей системе координат является значимо периодичным ($> 3 \cdot \sigma$) на интервале $\eta = 0 - 1.80$ ($z = 0 - 3.88$) для модели плоской Вселенной при $\Omega_m = 0.23 \pm 0.01$. Отмечено, что для малых значений величины $\eta < 1$ плотность абсорбционных систем оказывается значительно меньше, чем для больших значений $\eta > 1$. Поэтому на интервале $\eta = 1.14 - 1.80$ ($z = 1.64 - 3.88$) эта периодичность в распределении абсорбционных систем регистрируется на уровне значимости $> 4 \cdot \sigma$. Сделан вывод о том, что характер анализируемого распределения абсорбционных систем может

быть следствием существования во Вселенной частично упорядоченных структур, упрощенные примеры которых рассматривались в данной главе.

В разделе 4.7 рассмотрены астрофизические приложения полученных в главе 4 результатов. Для плоской модели Вселенной найденная периодичность в распределении абсорбционных систем при $\Omega_m = 0.23 \pm 0.01$ соответствует пространственному $(109 \pm 6) \cdot h^{-1}$ Мпк и временному $(356 \pm 20) \cdot h^{-1} 10^6$ лет периодам. Полученное значение пространственного периода находится в хорошем соответствии с оценками масштабов, полученных другими исследователями при анализе распределений галактик и их скоплений для относительно небольших значений космологического красного смещения ($z \leq 0.5$). Приведены примеры, показывающие, что частично упорядоченные структуры во Вселенной могут объяснить не только результаты данной диссертации, но и результаты ряда других исследований распределений галактик и их скоплений при $z < 0.5$ [12-14].

В разделе 4.8 сформулированы основные результаты главы 4.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации и приведен список работ, опубликованных по теме диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для анализа распределений абсорбционных систем использован единый подход теории потоков событий. В рамках этого подхода предложен ряд новых статистических процедур, в том числе оценка значимости коэффициентов вейвлет-преобразования, примененного к точечной статистике, и анализ их свойств, а также методика построения двухточечной корреляционной функции и оценки ее спектральных особенностей.
2. Проведено математическое моделирование потоков событий с различными заданными свойствами и предложена классификация статистических процедур (статистик), используемых при исследовании крупномасштабной структуры распределения вещества во Вселенной. Показано, что использование точечной вейвлет-статистики позволяет даже при малых значениях $\langle S/N \rangle$ обнаружить в анализируемом распределении заданные вариации плотности. Кроме того, точечная вейвлет-статистика позволяет перейти от потока событий к непрерывному случайному процессу, который обеспечивает большую значимость вариаций плотности, выделенных на фоне шума.
3. Составлен наиболее полный на данный момент каталог абсорбционных систем, содержащий информацию о 20 837 линиях различных элементов, зарегистрированных в спектрах 784 квазаров. Электронная версия каталога выставлена на сайте европейской астрофизической базы данных в Страсбурге (cdsweb.u-strasbg.fr/cgi-bin/qcat?J/A+A/412/707) и на сайте сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (www.ioffe.ru/astro/QC).
4. Проведен статистический анализ распределения абсорбционных систем в интервале космологических красных смещений $0 \leq z \leq 3.88$. Показано, что распределение абсорбционных систем по z содержит регулярную (квази-

периодичную) последовательность максимумов (пиков) и минимумов (провалов). При анализе распределений, построенных в угловых секторах с углом раскрытия не менее 90° , обнаружено, что такая последовательность не зависит от ориентации секторов, т.е. относительно наблюдателя представляет собой систему концентрических сферических слоев с повышенной и пониженной концентрацией абсорбционных систем.

5. Установлено, что в сопутствующей системе координат при $\Omega_m = 0.23 \pm 0.01$ последовательность пиков и провалов становится строго периодичной на интервале $\eta = 0 - 1.80$ ($z = 0 - 3.88$) при уровне значимости $> 3\sigma$. На интервале $\eta = 1.14 - 1.80$ ($z = 1.64 - 3.88$) эта периодичность регистрируется на уровне значимости $> 4\sigma$. Интервал следования пиков и провалов соответствует следующему значению пространственного $(109 \pm 6) \cdot h^{-1}$ Мпк и временного $(356 \pm 20) \cdot h^{-1} 10^6$ лет периодов для Λ CDM космологической модели. Найденное значение пространственного периода находится в хорошем соответствии с оценками масштабов, полученных другими исследователями при анализе распределений галактик и их скоплений для относительно небольших значений космологического красного смещения ($z \leq 0.5$).
6. Показано, что радиальное распределение узлов частично упорядоченных решеток содержит осциллирующие компоненты в широком диапазоне параметров, определяющих долю случайности рассматриваемых структур. Показано, что случайные просвечивания (прокальвания) таких решеток лучами зрения образуют распределение результатов их пересечений с узлами решетки, свойства которого аналогичны свойствам радиального распределения узлов.
7. В рамках пространственной интерпретации показано, что обнаруженная периодичность в распределении абсорбционных систем является результатом случайного прокальвания частично упорядоченных структур множеством лучей зрения.
8. Сделан вывод о возможности существования частично упорядоченных структур в крупномасштабном распределении вещества во Вселенной. Приведены примеры, показывающие, что частично упорядоченные структуры могут объяснить не только результаты, полученные в данной диссертации, но и аналогичные результаты ряда статистических исследований распределения галактик.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Рябинков А.И., Варшалович Д.А., Каминкер А.Д. Пространственно-временное распределение вещества в интервале красных смещений $z = 1.2-3.2$. // Письма в *Астрономический Журнал* – 1998. – Т. 24. – С. 488-497.
2. Ryabinkov A.I., Kaminker A.D., Varshalovich D.A. The space-time distribution of absorbing matter in the redshift interval $z = 0.2-3.2$. // *Gravitation and Cosmology* – 1999. – V. 5. – P. 72-76.

3. Kaminker A. D., Ryabinkov A. I., Varshalovich D. A. Space-time distributions of QSO absorption systems. // *Astronomy and Astrophysics* – 2000. – V.358. – P.1-12.
4. Рябинков А.И., Каминкер А.Д., Варшалович Д.А. Космологические вариации пространственно-временного распределения абсорбционных систем в спектрах квазаров. // *Письма в Астрономический Журнал* – 2001. – Т. 27. – С. 643-652.
5. Варшалович Д.А., Рябинков А.И., Каминкер А.Д. Распределение абсорбционных систем в спектрах квазаров в интервале красных смещений $z = 0.2-3.2$. // *Астрофизика на рубеже веков* (Ред. Н.С. Кардашев, Р.Д. Дагесаманский, Ю.А. Ковалев) – М: Изд-во “ЯНУС-К”, ISBN 5-8037-0063-0, 2001. – С. 351-355.
6. Ryabinkov A.I., Kaminker A.D., Varshalovich, D.A. A catalogue of absorption-line systems in QSO spectra. // *Astronomy and Astrophysics* – 2003. – V. 412. – P. 707-709.
7. Ryabinkov A. I., Kaminker A. D., Varshalovich, D. A. The redshift distribution of absorption-line systems in QSO spectra. // *MNRAS* – 2007. – V. 376. – P. 1838-1848.

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1] Kerscher M., Szapudi I., Szalay A.S. // *Astrophys. J.* – 2000. – V. **535**. – P. L13-L16.
- [2] Burbidge G.R., O’Dell S.L. // *Astrophys. J.* – 1972. – V. **178**. – P. 583–605.
- [3] Slezak E., de Lapparent V., Buaovi A. // *Astrophys. J.* – 1993. – V. **409**. – P. 517–529.
- [4] Slezak E., Durrent F., Gerbal D. // *Astron. J.* – 1994. – V. **108**. – P. 1996–2008.
- [5] Ryabinkov A.I., Kaminker A.D., Varshalovich, D.A. // *Astron. Astrorhys.* – 2003. – V. 412. – P. 707-709.
- [6] Kaiser N., Peacock J.A. // *Astrophys. J.* – 1991. – V. **379**. – P. 482–506.
- [7] Kurki-Suonio H., Mathews G.J., Fuller G.M. // *Astrophys. J.* – 1990. – V. **356**. – P. L5–L7.
- [8] SubbaRao M.U., Szalay A.S. // *Astrophys. J.* – 1992. – V. **391**. – P. 483–493.
- [9] Einasto J., Einasto M., Frisch P., Gottlober S., Muller V., Saar V., Starobinsky A.A., Tucker D. // *MNRAS*. – 1997. – V. **289**. – P. 813–823.
- [10] Gonzalez J.A., Quevedo H., Salgado M., Sudarsky D. // *Astron. Astrorhys.* – 2000. – V. **362**. – P. 835–839.
- [11] Yoshida N., Colberg J., White S.D.M., Evrard A.E., MacFarland T.J., Couchman H.M.P., Jenkins A., Frenk C.S., Pearce F.R., Efstathiou G., Peacock J.A., Thomas P.A. // *MNRAS*. – 2001. – V. **325**. – P. 803–816.
- [12] Broadhurst T.J., Ellis R.S., Koo D.C., Szalay A.S. // *Nature*. – 1990. – V. **343**. – P. 726-728.
- [13] Einasto J., Einasto M., Frisch P., Gottlober S., Muller V., Saar V., Starobinsky A.A., Tago E., Tucker D., Andernach H. // *MNRAS*. – 1997. – V. **289**. – P. 801–812.
- [14] Hartnett J.G. // e-print. – 2007. – arXiv:0711.4885.