РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. Иоффе

На правах рукописи

Левшаков Сергей Анатольевич

НОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА АБСОРБЦИОННЫХ СПЕКТРОВ КВАЗАРОВ

(01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Санкт-Петербург — 2006

Работа выполнена в секторе теоретической астрофизики Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН

Официальные оппоненты:	–	доктор физико-математических наук, профессор В. В. Иванов
	–	доктор физико-математических наук, профессор И. Н. Топтыгин
	–	доктор физико-математических наук, профессор Ю. Н. Гнедин
Ведущая организация:	–	Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

Защита состоится 24 мая 2007 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 по защитам диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук при Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, С.-Петербург, Политехническая ул. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан 12 апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:
канд. физ.-мат. наук А. Л. Орбели.

1 Общая характеристика диссертации

Актуальность работы. Тема диссертации актуальна, поскольку абсорбционные спектры квазаров содержат уникальную информацию о физических свойствах и химическом составе межгалактической среды в разные космологиеские эпохи, что обусловлено следующими их свойсвами:

I. Абсорбционные системы перекрывают широкий диапазон физических параметров: $N_{\mathrm{H\,I}}$ от 10^{11} см$^{-2}$ до 10^{21} см$^{-2}$, металличность Z от нескольких солнечных до $10^{-3}Z_{\odot}$, температуры от 100 K до 10^6 K, диапазон красных смещений от 0 до 7.

II. Квазарные абсорбционные спектры несут информацию о физических условиях, химическом и изотопном составе газа во всем доступном наблюдениям объеме Вселенной, включающем всю барионную массу и гипотетическое темное вещество.

III. Современные телескопы обеспечивают точность определения центров линий поглощения выше 1 mÅ (относительная точность $\delta\lambda/\lambda \sim 10^{-7}$). Сравнение высокоточных относительных положений линий в квазарных абсорбционных системах с их лабораторными значениями открывает возможность проверки фундаментальных физических принципов таких, как постоянство физических констант на космологической временной шкале.

Резкое повышение качества наблюдений квазаров (S/N $\gtrsim 100$, R $\gtrsim 50000$), связанное с вводом в строй телескопов нового поколения (Keck, VLT, SUBARU и др.) требует эффективного и наиболее полного решения обратных задач спектроскопии и развития теоретических моделей процессов формирования различных систем поглощения. Результаты таких моделей и интерпретация наблюдений на их основе являются основным инструментом изучения физических характеристик внегалактических диффузных облаков на различных стадиях их космологической эволюции. Повышение точности решения обратных задач открывает возможности для количественного анализа химической эволюции вещества во Вселенной и исследования происхождения тяжелых элементов в межгалактическом пространстве.

При численном моделировании профилей линий поглощения различных ионов в квазарных абсорбционных системах необходимо принимать во внимание, что крупномасштабные движения газа и его плотность как функции пространственной координаты часто носят случайный характер. Однако стандартные методики, широко используемые при обработке абсорбционных спектров, не делают различия между глобальной вдоль луча зрения и локальной формами коэффициента поглощения в спектральной линии, что приводит в общем случае к некорректным оценкам физических параметров. Поэтому возникла необходимость пересмотра на современном уровне ряда механизмов формирования спектральных линий в стохастических средах и разработки новых алгоритмов для анализа абсорбционных систем, содержащих линии ионов в различных стадиях ионизации.

Цель работы:
(а) разработка моделей формирования профилей спектральных линий в турбулентных средах с коррелированными полями плотности газа и скорости;
(б) на основе рассмотренных моделей — разработка методов решения обратных задач спектроскопии с использованием новейших алгоритмов стохастической оптимизации;
(в) обработка и интерпретация наблюдательных данных по абсорбционным спектрам квазаров, полученных на крупнейших современных телескопах;
(г) изучение химического состава и кинематических свойств межгалактических поглощающих областей с целью выяснения природы квазарных абсорбционных систем и их эволюции в зависимости от красного смещения;
(д) изучение на различных красных смещениях формы спектра ультрафиолетового метагалактического фонового излучения в области энергий от 1 Ryd до 10 Ryd по оптически тонким абсорбционным системам, содержащим линии ионов в последовательных стадиях ионизации;
(е) проведение прецизионных измерений положений линий в спектрах квазаров с целью проверки неизменности фундаментальных физических констант за космологическое время.

Задачи. Для достижения указанных целей были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование зависимости формы профиля абсорбционной линии от оптической толщины, дисперсии флуктуаций и пространственных корреляций поля скорости (условия мезотурбулентности).

2. Измеряемость кинетической температуры по профилям линий металлов, образующихся в стохастических средах.

3. Проведение расчетов методом Монте Карло профилей бленды H I+D I с целью определения относительного содержания дейтерия в ранние космологические эпохи (проверка теории образования легких элементов в первичном нуклеосинтезе, BBN).

4. Обработка и анализ оптически тонких систем поглощения с целью восстановления физических параметров и химического состава газа, а также оценки формы спектра ионизующего фонового излучения (полное решение обратной задачи спектроскопии).

5. Исследование непрозрачности межгалактической среды в линии He II Lyα (эффект Гана-Петерсона) в промежутке красных смещений от $z \sim 1.5$ до $z \sim 3.5$.

6. Проведение высокоточных измерений положений линий Fe II в абсорбционных системах с красными смещениями $z > 1$ с целью проверки неизменности фундаментальных физических констант на космологической временной шкале.

Методы. При решении перечисленных задач использовались методы ряда разделов теоретической астрофизики и математической статистики, среди которых наиболее важными являются перенос излучения в спектральных линиях в стохастических коррелированных средах и нелинейное оценивание параметров физических моделей.

В методе решения обратной задачи спектроскопии использованы новейшие алгоритмы стохастической оптимизации, большая часть которых является собственной разработкой автора.

Численное моделирование ионизации химических элементов в поглощающих облаках проводилось с использованием программы CLOUDY (Ferland 1997).

Научная новизна работы. В диссертации *впервые* проведено систематическое обсуждение процессов формирования абсорбционных линий в стохастических средах с коррелированными флуктуациями поля скорости, а также *впервые* рассмотрено решение полной обратной задачи спектроскопии, включающей восстановление физических параметров среды, измерение концентраций химических элементов и оценку формы спектра ионизующего фонового излучения. Результаты представлены в единой форме, удобной для использования в численных расчетах теоретических спектов поглощения, что необходимо для анализа квазарных абсорбционных систем. Ряд алгоритмов решения обратных задач является оригинальной разработкой автора.

В результате проведенного моделирования оптически тонких межгалактических диффузных облаков предложен единый подход к анализу абсорбционных систем с линиями металлов.

1) Впервые систематически рассмотрено формирование профиля спектральной линии в среде с коррелированными случайными полями. Учтены три основных эффекта: конечная корреляционная длина поля скорости, локальное изменение относительной степени ионизации элементов в зависимости от плотности газа, суперпозиция зон различной степени ионизации при фиксированном значении радиальной скорости внутри профиля спектральной линии, возникающая в результате иррегулярных доплеровских сдвигов локального коэффициента поглощения.

2) Разработан метод оценки физических параметров поглощающего газа по линиям ионов, наблюдаемых в оптически тонких абсорбционных системах — обратный метод Монте Карло (MCI). Проведен детальный анализ многочисленных систем с красными смещениями $1.5 \lesssim z \lesssim 4.2$. Найдена корреляционная зависимость дисперсии радиальных скоростей от размера поглощающего облака, позволяющая заключить, что эти системы являются вириализованными и связанными, с большой вероятностью, с далекими галактиками или их гало. Найдено также, что системы с меньшими размерами имеют систематически бóльшие концентрации металлов. Показано, что некоторые абсорбционные системы обладают характеристиками, типичными для высокоскоростных облаков (HVC), которые наблюдаются в гало нашей Галактики.

3) Обнаружен класс систем с $N(\text{H I}) \sim 10^{17}$ см$^{-2}$ (нижний край LLS, Lyman Limit Systems),

имеющих чрезвычайно низкую металличность, $Z < 0.001 Z_{\odot}$, и размеры вдоль луча зрения порядка сотен кпс. В этих системах отношение [Si/C] не превышает 0.3. Если данные системы являются протогалактическими облаками, обогащенными продуктами звездного нуклеосинтеза ранних звездных популяций, то измеренное значение [Si/C] означает, что начальная функция масс этих звездных популяций имеет верхнюю границу $M_{\rm up} < 25\,M_{\odot}$. Тем самым не подтверждается космологический сценарий, в котором на ранних стадиях эволюции Вселенной ($z > 10$) образовывались звезды с массами $M \gtrsim 100\,M_{\odot}$, при котором ожидаемое отношение [Si/C] > 1.

4) Показано, что содержание металлов в межгалактических абсорберах крайне неоднородно, с вариациями от почти солнечных относительных концентраций до 1/1000 солнечных. При этом высокометалличные системы перемежаются с системами без металлов. Такое поведение позволяет считать выброс вещества из галактик основным источником обогащения межгалактической среды тяжелыми элементами.

5) Для оценки формы спектра ионизирующего излучения разработана специальная процедура, основанная на подходах теории планирования эксперимента. Данная процедура позволяет восстановить форму спектра ионизующего излучения в случаях, когда в системе наблюдается много линий металлов различных стадий ионизации. Спектры, восстановленные по абсорбционным системам с $z_{\rm abs} \sim 3$, демонстрируют значительную депрессию континуума между 3 и 4 Ryd. Такая форма спектра может быть объяснена межгалактическим поглощением в линии He II Lyα (эффект Гана-Петерсона на гелии) и поддерживает гипотезу о присутствии значительного количества He II на $z = 3$ как результата его ‘затянутой’ (delayed) реионизации. При этом основной вклад в ионизующий фон на $1.38 < z < 3.0$ вносят квазары и AGN, вклад звездной составляющей не прослеживается. Оценен также верхний предел на долю УФ фотонов, покидающих галактики и дающих вклад в метагалактический фон ионизующего излучения: $f_{\rm esc} < 0.05$.

6) Для высокоточных измерений возможных флуктуаций постоянной тонкой структуры α разработана специальная методика, основанная на использовании отдельных экспозиций и работающая с различными линиями только одного иона – Fe II. Это позволило избавиться от многих систематических эффектов и значительно повысить точность измерений $\Delta\alpha/\alpha$ на отдельных значениях z. С помощью данной методики получено самое точное на текущий момент ограничение относительного изменения постоянной тонкой структуры $\Delta\alpha/\alpha$ на красном смещении $z = 1.15$, $\langle\Delta\alpha/\alpha\rangle = (-0.07 \pm 0.84) \times 10^{-6}$, а также указание на возможное изменение $\Delta\alpha/\alpha$ между этим значением и $\Delta\alpha/\alpha = (5.4 \pm 2.4) \times 10^{-6}$, обнаруженном на $z = 1.84$.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработка метода высших моментов обобщенного уравнения переноса для расчета распределения вероятности интенсивности излучения $P(I_\lambda)$ внутри профиля линии поглощения в случае конечной корреляционной длины поля скорости крупномасштабных движений газа.
2. Разработка метода решения обратных задач спектроскопии с использованием новейших алгоритмов стохастической оптимизации для общего случая формирования профилей спектральных линий в турбулентных средах с флуктуирующей плотностью газа и случайным полем скоростей. Определение на его основе физических характеристик межгалактических газовых облаков, их линейных размеров и степени обагащения тяжелыми элементами. Измерение содержание дейтерия в ранние космологические эпохи.
3. Разработка алгоритма восстановления формы спектра ионизующего фонового излучения. Изучение на его основе непрозрачности межгалактического газа в линии He II Lyα и динамики вторичной полной ионизации межгалактического гелия в широком диапазоне красных смещений от $z \sim 1.5$ до $z \sim 3$.
4. Разработка методики и проведение прецизионных измерений возможных изменений значений фундаментальных физических констант в разные космологические эпохи.

Научная и практическая значимость. Результаты систематического описания процессов формирования профилей абсорбционных линий в стохастических средах могут применяться при анализе и интерпретации спектров поглощения диффузных облаков, наблюдаемых в межзвездной среде нашей Галактики, ближайших галактик, а также галактик, удаленных на космологические расстояния. Особый интерес представляют разработанные в диссертации методы решения обратных задач спектроскопии, которые уже использовались при работе со спектрами квазаров высокого разрешения в секторе теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, в Европейской Южной Обсерватории (Мюнхен, Германия), в Астрономической обсерватории Гамбурга (Германия), в Астрономической обсерватории Триеста (Италия), в Астрофизическом центре Калифорнийского университета в Сан Диего (США), в Национальной астрономической обсерватории Японии, в Токийском муниципальном университете и в астрофизическом центре университета Осака (Япония).

Методы анализа абсорбционных спектров квазаров, разработанные автором, могут найти быстрое применение и дальнейшее развитие. Это касается прежде всего ультрафиолетовых спектров межзвездного поглощения, которые наблюдаются на орбитальных обсерваториях. Полученные результаты чрезвычайно важны для проверки современных теорий химической эволюции вещества во Вселенной на космологической временной шкале, а также для изучения глобальных динамических процессов, связанных со вторичной ионизацией межгалактичсекого газа. В случае подтверждения вариации постоянной тонкой структуры

α между $z \sim 1$ и $z \sim 2$, дальнейшие аналогичные измерения могут быть использованы для выяснения природы темной энергии и ее уравнения состояния.

Апробация работы и публикации. Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (С.-Петербург), Астрономического института им. В.В. Соболева, С.-Петербургского государственного университета (С.-Петербург), на Общегородских астрономических семинарах в Институте прикладной астрономии РАН (С.-Петербург), на семинарах Института космических исследований РАН (Москва), Специальной астрофизической обсерватории (Н. Архыз), Европейской южной обсерватории (Мюнхен), Гамбургской астрономической обсерватории, Берлинского технического университета, Астрофизической кафедры Франкфуртского университета (Франкфурт/Майн), Гайдельбергской астрономической обсерватории, Парижского института астрономии, Астрономической обсерватории в Триесте, Национальной астрономической обсерватории Японии (Токио), Института космического телескопа (Балтимор), Обсерватории многозеркального телескопа (Тусон), а также представлялись на отечественных и международных конференциях:
'*Precise spectroscopy in astrophysics*' (Aveiro, Portugal, 2006), '*The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes*' (Cape Town, South Africa, 2005), '*From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution*' (Paris, France, 2005), '*Probing Galaxies through Quasar Absorption Lines*' (Shanghai, China, 2005), '*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*' (ИКИ, Москва, 2003), '*Astrophysics, Clocks and Fundamental Conctants*' (Bad Honnef, Germany, 2003), '*Recycling Intergalactic and Interstellar Matter*' (Sydney, Australia, 2003), '*CNO in the Universe*' (St-Luc, Switzerland, 2002), '*New Trends in Theoretical and Observational Cosmology*' (Tokyo, Japan, 2001), '*Chemical Enrichment of Intercluster and Intergalactic Medium*' (Vulcano, Italy, 2001), '*Deep Fields*' (Garching, Germany, 2000), '*The Light Elements and Their Evolution*' (Natal, Brazil, 1999), '*Building galaxies: From the Primordial Universe to the Present*' (Les Arcs, France, 1999), '*Early Universe: Cosmological Problems and Instrumental Technologies*' (С.-Перербург, 1999), '*Toward the First Light of HDS*' (Tokyo, Japan, 1998), '*The Birth of Galaxies*' (Blois, France, 1998), '*19th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*' (Paris, France, 1998), '*Particle Cosmology*' (Tokyo, Japan, 1997), '*Primordial Nuclei and Their Galactic Evolution*' (Bern, Switzerland, 1997), '*Structure and Evolution of the Intergalactic Medium From QSO Absorption Line Systems*' (Paris, France, 1997), '*18th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*' (Chicago, USA, 1996), '*QSO Absorption Lines*' (Garching, Germany, 1994), '*Quantum Physics and the Universe*' (Tokyo, Japan, 1992), '*Астрофизика сегодня*' (Н. Новгород, 1991), '*Plasma Astrophysics*' (Телави, Грузия, 1990). '*Физика звезд и галактик*' (Тыравере, Эстония, 1988), '*Investigation of Galaxies with Ultraviolet Continuum*' (Н. Архыз, 1986).

Основное содержание диссертации опубликовано в 54 статьях, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения (глава **1**), основного содержания (главы **2**–**7**), заключения (глава **8**) и списка цитируемой литературы. Первая глава обзорная. В нее вошли наряду с данными из цитируемой литературы ранние результаты автора (работы [1, 5, 6, 9, 11-17, 20, 22], приведенные в списке публикаций по теме диссертации), результаты, полученнные на 6 м телескопе РАН (работы [2-4, 7, 8, 10]), и более поздние работы, выполненные по архивным спектрам квазаров, наблюдавшимся на 8.2 м телескопе Европейской Южной Обсерватории (работы [34, 36, 38, 42, 43, 47, 52]). Глава **2** основывается на работах [18, 19, 21, 23, 35]; глава **3** — на работах [22, 24, 25, 28]; глава **4** — на работах [26, 27, 29, 30-32]; глава **5** — на работах [33, 37, 39, 45]; глава **6** — на работах [40, 49, 50, 53]; глава **7** — на работах [44, 46, 48, 51, 54].
Полный объем диссертации составляет 307 страниц, включая 90 рисунков. Список литературы насчитывает 264 наименования.

2 Содержание диссертации

Во введении **(глава 1)** обоснована актуальность темы диссертации. В § 1.1 дан краткий обзор основных характеристик оптических спектров квазаров и классификация абсорбционных систем. Рассмотрены основные результаты исследований абсорбционных систем, сопряженные с работами автора. В § 1.2 обсуждается область формирования непрерывного спектра квазара и ассоциированные абсорбционные системы с узкими (FWHM $\lesssim 30$ км с$^{-1}$) линиями поглощения ионов различных металлов. Считается, что эти системы образуются в облаках газа, выброшенных из внутренних областей содержащей квазар галактики. Изучение концентраций элементов в ассоциированных системах является важным методом получения информации о химической эволюции вещества в околоквазарных областях. Многочисленные абсорбционные системы с красными смещениями $z_{\rm abs} < z_{\rm em}$ рассматриваются в § 1.3. Поскольку основной предмет исследований диссертации — межгалактические газовые облака, в этом разделе приводятся физические параметры и химический состав абсорбционных систем с лучевыми концентрациями атомарного водорода $N_{\rm H\,I} \lesssim 10^{17}$ см$^{-2}$, которые образуют так называемый 'Lyα лес'.

В **главе 2** рассматривается обобщение уравнения переноса излучения в частотах спектральной линии на случай, когда длина свободного пробега фотона сравнима с корреляционной длиной ℓ случайного поля скоростей. В астрофизической литературе это условие получило название *мезотурбулентность*, в отличие от *микротурбулентности*, при которой корреляционная длина много меньше длины свободного пробега фотона, и *макротурбулентности* в противоположном случае.

Рассмотрение мезотурбулентного режима формирования профиля линии служит введением к решению общих обратных задач спектроскопии. Поэтому в § 2.1 объясняются условия применимости микро- и мезотурбулентного приближений. Так, если гидродинамическое поле скоростей известно точно, его учет в процессах переноса излучения не составляет проблемы. В этом случае локальный коэффициент поглощения $\kappa_0\Phi(\lambda, v)$ испытывает доплеровское смещение на величину локальной компоненты вектора скорости, параллельной лучу зрения (функция Φ описывает профиль коэффициента поглощения). Однако во многих астрофизических объектах поле скорости имеет более или менее стохастическую природу, и поэтому проблема переноса излучения в частотах спектральных линий становится довольно сложной. Самое простое и широко используемое решение — это пренебречь всеми возможными корреляциями поля скоростей (микротурбулентность). В этом приближении локальный коэффициент поглощения κ_λ заменяется его средним значением $\langle\kappa_\lambda\rangle$, при этом усреднение применяется к функции профиля коэффициента поглощения, а уравнение переноса сохраняет свою форму (см., Спитцер 1981). Показывается, что микротурбулентное приближение оправдано, когда длина свободного пробега фотона много больше корреляционной длины и когда имеется достаточно большое число турбулентных ячеек вдоль каждого луча зрения. Если эти условия не выполняются, то решения стандартного уравнения переноса могут давать неправильные результаты.

Дается краткий обзор основных положений теории переноса излучения в коррелированных случайных средах, развитой Травингом и его сотрудниками (Gail et al. 1974; Gail, Sedelmayer, Traving 1975; 1980). В рамках этой теории скорость крупномасштабных движений v и интенсивность излучения I_λ рассматриваются как две случайные функции пространственной координаты s вдоль луча зрения. Если среда описывается только ее статистическими характеристиками, определение точного значения $I_\lambda(s)$ становится невозможным. Мы можем говорить только о статистических характеристиках интенсивности таких, как, например, среднее значение $\langle I_\lambda\rangle$, которое, согласно определению, есть либо среднее по ансамблю, либо среднее по пространству (или времени).

В § 2.2 дан вывод обобщенного уравнения переноса, которое принимает вид уравнения Фоккера-Планка для вероятности $P(s; v, I_\lambda)\, dv\, dI_\lambda$ нахождения в точке s радиальной компоненты скорости со значением между v и $v + dv$ и интенсивности излучения между I_λ и $I_\lambda + dI_\lambda$ (см. уравнение (1)). Показывается, что при условии $\tau_{\lambda,\ell} \ll 1$ внутри профиля линии (где $\tau_{\lambda,\ell}$ — есть отношение корреляционной длины к средней длине свободного пробега фотона на длине волны λ при $u = v/\sigma_\mathrm{t} = 0$), ни профиль линии, ни ее эквивалентная ширина не зависят от корреляционной длины ℓ (микротурбулентность). Условие $\tau_{\lambda,\ell} \ll 1$ всегда выполняется в крыльях линии. С другой стороны, если в центре линии $\tau_{\lambda,\ell} \gtrsim 1$ и $\sigma_\mathrm{t} \gtrsim v_\mathrm{th}$, тогда профиль линии и ее эквивалентная ширина зависят от ℓ, и мы имеем случай мезотурбулентности. (Здесь σ_t — среднеквадратичная турбулентная скорость, а v_th — тепловая скорость).

Эти эффекты подробно рассматриваются в § 2.3 на примере формирования профилей абсорбционных линий четвертой положительной системы $A\,^1\Pi \leftarrow X\,^1\Sigma^+$ молекулы CO и сравнения результатов их анализа, полученных в общепринятом микротурбулентном приближении, с исходными параметрами мезотурбулентной модели. Этот пример очень наглядный, поскольку полосы CO состоят из оптически сильных и слабых линий, которые должны по разному реагировать на корреляционную длину. Показывается, что влияние корреляционной длины на профиль линии усиливается с увеличением лучевой концентрации CO и при $N(\mathrm{CO}) \sim 10^{15}$ см$^{-2}$ полоса (2,0) не может быть адекватно описана в рамках упрощенной микротурбулентной модели. Необходимо делать дополнительные предположения о более сложной структуре абсорбционного облака (вводить дополнительное число более мелких облаков с различными физическими параметрами в каждом из них) для того, чтобы получить соответствие между микро- и мезотурбулентным профилями. Таким образом на численном примере показывается, как изначально однородная модель может быть неправильно проинтерпретирована и трансформирована в неоднородную.

В § 2.4 мезотурбулентное приближение используется для анализа реальных спектров поглощения, образующихся в межзвездной среде голубой компактной галактики I Zw 18 (Mrk 116). Изучение УФ спектров, полученных на *FUSE* (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) показало, что содержание N, Ar, Si, и Fe в нейтральном газе (Vidal-Madjar et al. 2000) значительно отличается от содержания этих элементов в ионизованном газе (Izotov et al. 2001). Для интерпретации наблюдений Izotov et al. предложили модель, состоящую из двух подсистем со значительным отличием металличности: протозвездное вещество, образованное в реакциях термоядерного синтеза на ранних стадиях расширения горячей Вселенной, и газ в H II зонах, обогащенный продуктами звездного термоядерного синтеза. Обнаружение протозвездного газа могло бы иметь важное значение для космологических моделей. Однако оказалось, что учет корреляционных эффектов дает одинаковую оценку содержания металлов как в нейтральном, так и в ионизованном газе галактики I Zw 18, которая вполне согласуется с предсказаниями теории нуклеосинтеза и измерениями в других компактных голубых галактиках.

В **главе 3** рассмотрено формирование профиля абсорбционной линии при условии, когда число турбулентных ячеек на луче зрения не очень большое, что приводит к неполноте статистической выборки.

В § 3.2 рассчитываются доверительные интервалы для теоретических интенсивностей с целью количественного описания отклонений наблюдаемой интенсивности в профиле линии от средней величины $\langle I_\lambda \rangle$. Для этого необходимо вычислить распределение вероятности величины I_λ. Существует два подхода для решения этой задачи. Один из них заключается в вычислении $P(s; v, I_\lambda)$ непосредственно из обобщенного уравнения переноса

$$\frac{\partial P}{\partial s} = \frac{1}{\ell}\frac{\partial}{\partial v}\left(vP + \sigma_{\mathrm{t}}^2\,\frac{\partial P}{\partial v}\right) + \frac{\partial}{\partial I_\lambda}\left[\kappa_0 \Phi P\ (I_\lambda - S_\lambda)\right]\ , \tag{1}$$

с последующим интегрированием результата по v. Однако этот подход требует больших численных расчетов. Альтернативный подход, разработанный автором, заключается в вычислении высших моментов P относительно I_λ, что можно сделать относительно просто. В нашем случае набор моментов определяет функцию распределения однозначно, поскольку диапазон изменений I_λ конечный: $0 \leq I_\lambda/I_0 \leq 1$. Умножая уравнение (1) на степень I_λ^j и интегрируя по I_λ, получим

$$\frac{\partial Q_{\lambda,j}}{\partial s} = \frac{1}{\ell}\frac{\partial}{\partial v}\left(vQ_{\lambda,j} + \sigma_{\rm t}^2\,\frac{\partial Q_{\lambda,j}}{\partial v}\right) - j\kappa_0\Phi\,\left(Q_{\lambda,j} - S_\lambda Q_{\lambda,j-1}\right)\,, \tag{2}$$

где

$$Q_{\lambda,j} = \int\limits_0^\infty I_\lambda^j\,P(s;v,I_\lambda)\,dI_\lambda\;. \tag{3}$$

Таким образом, мы приходим к системе рекуррентных дифференциальных уравнений (2). Дальнейшее упрощение получается при рассмотрении чистого поглощения, когда функция источников $S_\lambda = 0$. По рассчитанным моментам $\langle I_\lambda^j\rangle$ можно восстановить кумулятивную функцию распределения для I_λ. После этого становится возможным определить интервал интенсивностей вокруг $\langle I_\lambda\rangle$, в котором наблюдаемая интенсивность может находиться с заданной вероятностью.

В § 3.3 подробно описывается процедура восстановления распределения вероятности $P(s;v,x_\lambda)$, где $x_\lambda = I_\lambda/I_0$. Показывается, что в общем случае форма профиля абсорбционной линии вдоль одного луча зрения асимметричная, что является следствием корреляций в поле скоростей при ограниченном числе турбулентных ячеек с характерным размером ℓ.

В § 3.4 вычисляются условные интенсивности $q_\lambda(L,u_0)$ — ожидаемое значение интенсивности после прохождения облака толщиной L при условии, что скорость первой турбулентной ячейки равна u_0. Если рассматривается линия поглощения, образованная вдоль одного луча зрения, мы знаем, что только *одна* реализация случайного поля скоростей определяет ее наблюдаемый профиль, поскольку в течение наблюдений любые крупномасштабные движения газа внутри облака можно рассматривать как 'замороженные' (нет ни временного, ни пространственного усреднения). В любой точке вдоль луча зрения (и, в частности, на краях облака) компонента скорости имеет свое определенное (заранее неизвестное) значение u_0, которое не меняется за время экспозиции. В этом случае более информативно сравнивать с наблюдениями не $\langle I_\lambda\rangle$, а условную интенсивность $q_\lambda(L,u_0)$.

Показывается, что вариации $\sigma_{\rm t}/v_{\rm th}$ для различных ионов внутри одного облака могут приводить к различным смещениям центров тяжести абсорбционных линий и, как результат, к различным радиальным скоростям, поскольку параметры $\sigma_{\rm t}/v_{\rm th}$ индивидуальны для каждого элемента.

В § 3.5 рассматривается относительно простой численный метод, с помощью которого можно промоделировать формирование профиля линии поглощения в турбулентной среде. Стохастическое поле скоростей описываться марковским процессом, вид которого генерируется процедурой Монте Карло. В отличие от процедур усреднения, описанных в предыдущих разделах, с помощью метода Монте Карло мы вычисляем непосредственно профиль линии, соответствующий единственной реализации случайного поля скоростей, что позволяет проводить прямые сравнения с абсорбционными линиями в спектрах источников континуального излучения, которые можно считать точечными. Демонстрируется идентичность результатов метода Монте Карло и решений обобщенного уравнения переноса с расчетом доверительных интервалов. Приводятся численные примеры с профилями линий H I и D I Lyα, которые показывают, что оценка отношения D/H очень чувствительна к модельным предположениям и что применение простого микротурбулентного приближения может приводить к разбросу значений D/H, не имеющих физической причины.

В **главе 4** рассмотрена обратная задача спектроскопии при постоянной плотности газа, когда оценка физических параметров среды производится *одновременно* с восстановлением распределения поля скоростей $v(s)$ крупномасштабных движений. Данный подход применим к анализу профилей линий ионов, имеющих близкие потенциалы ионизации, поскольку они трассируют газ одной плотности.

В § 4.2 дается описание обратного метода Монте Карло (RMC, Reverse Monte Carlo) и пример его применения для анализа профиля бленды H I+D I Lyα. RMC принадлежит к классу алгоритмов стохастической оптимизации, предназначенных для решения задач в конфигурационных пространствах большой размерности. В отличие от стандартных методов Монте Карло, при которых генерируются случайные конфигурации физической системы для определения средних характеристик, RMC использует экспериментальные данные и подбирает набор параметров модели, при котором воспроизводятся данные наблюдений. Стохастическая оптимизация означает, что направление движения в пространстве параметров определяется не условием строгого уменьшения $\chi 2$, как это происходит в градиентных методах, а по вероятности $\exp(-\Delta\chi^2/T) > \xi$, где ξ — случайная величина, равномерно распределенная на отрезке [0,1], $\Delta\chi^2 = \chi^2_{i+1} - \chi^2_i$ и T — управляющий параметр метода. Вероятностный выбор допускает движение не только в направлении $\Delta\chi^2 < 0$, но и в направлении возрастания χ^2, что позволяет объектной функции выбираться из локальных минимумов и гарантирует сходимость к глобальному минимуму (Metropolis et al., 1953).

Алгоритм RMC применялся для измерений содержания дейтерия в межгалактическом газе на больших красных смещениях ($z \sim 3$). Анализ профилей бленды H+D Lyα в абсорбционных спектрах квазаров, полученных на 10 м телескопе Keck, показал, что D/H $\simeq 3 \times 10^{-5}$, что приблизительно в 1.5 раза выше по сравнению со средним значением D/H в межзвездной среде нашей Галактики. Измеренное значение D/H находится в согласии с теориями химической эволюции вещества во Вселенной, согласно которым относительное содержание дейтерия уменьшается с космологическим временем, поскольку дейтерий "выгорает"в процессах звездной эволюции.

В § 4.3 рассматривается процедура измерения кинетической температуры по линиям ионов, имеющих подобные профили и приблизительно равные потенциалы ионизации (например, C II, Si II, Fe II). Обратные задачи подобного рода являются *плохо обусловленными*.

Параметры плохо обусловленных задач чрезвычайно чувствительны к ошибкам в данных, что приводит к большим дисперсиям оценок. Для их решений разработаны специальные методы (Tikhonov, Arsenin 1977; Гончарский, Черепащук, Ягола 1978; Wu 1997). Общим подходом, стабилизирующим решение, является добавление к целевой функции регуляризирующего слагаемого (штрафной функции), которая отслеживает большие ошибки в оценках параметров.

Разработанная автором вычислительная процедура основывается на преобразовании Фурье абсорбционных профилей с последующей минимизацией целевой функции методом энтропийной регуляризации (ERM, entropy-regularized minimization). Вычисления на модельных спектрах показали, что кинетическая температура может быть оценена с точностью 10-15%. Применение процедуры ERM к реальным спекрам — профилям линий C II и Si II в системе $z = 3.572$ в спектре Q1937–1009, привело к оценке температуры $T_{\rm kin} \simeq 14000$ K. Независимо от выбранной методики обработки спектров, оценки температуры по линиям металлов и H I должны совпадать, если поглощающая зона однородная. Именно такие оценки получились для системы $z = 3.572$, обработанной процедурами RMC и ERM.

В **главе 5** обратная задача обобщается на случай переменной плотности. Методы восстановления физических параметров газа, в котором флуктуируют и скорость, и плотность, имеют наиболее широкую применимость при анализе абсорбционных систем с линиями ионов различных стадий ионизации. Показывается, что традиционный микротурбулентный подход, реализуемый в процедуре разложения сложных профилей на фойгтовские компоненты, часто дает весьма искаженные оценки металличности и относительных концентраций элементов. Следует отметить, что эти параметры чрезвычайно выжны для проверки теорий химической эволюции межгалактического газа и выяснения источников происхождения металлов.

Основные уравнения выводятся в § 5.2, где также приводится описание модифицированного обратного метода Монте Карло (MCI). Отличие MCI от метода, описанного в главе 4, заключается в использовании более чувствительного вероятностного критерия при отборе решений (статистика Цаллиса вместо больцмановской) и адаптивной схемы изменения параметра T в зависимости от достигнутого уровня χ^2. Это позволило обеспечить быструю сходимость метода к глобальному минимуму.

Тестирование MCI на численном примере приводится в § 5.3.

В § 5.4 рассматривается принцип минимума скорости изменения энтропии с целью отбора наиболее вероятных конфигураций полей скорости $v(s)$ и плотности $n(s)$, восстанавливаемых процедурой MCI.

В § 5.5 обобщаются результаты, полученные из анализа с помощью MCI многочисленных оптически тонких ($N_{\rm H\,I} < 10^{17}$ см$^{-2}$) абсорбционных систем с линиями металлов, идентифицированных на разных красных смещениях ($1 < z < 4.2$) в спектрах высокого разрешения

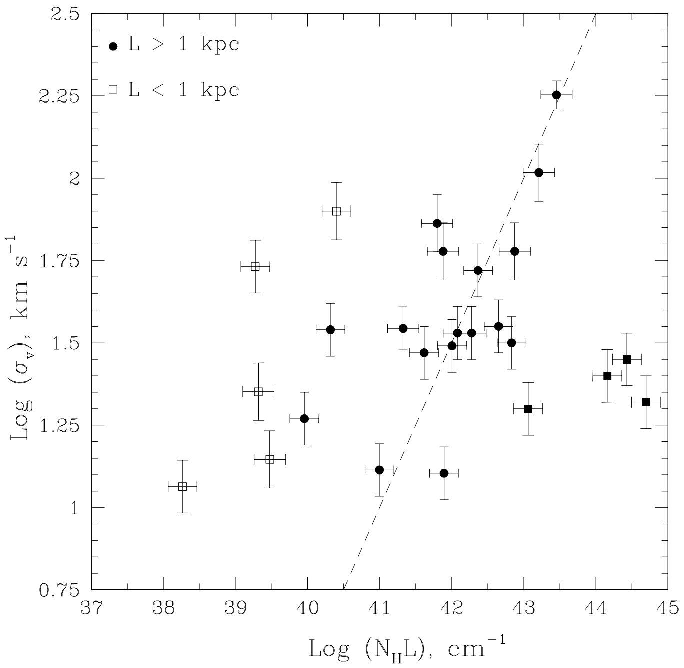

Рис. 1: Измеренные значения дисперсии радиальных скоростей, σ_v, в системах с металлами в зависимости от произведения полной лучевой концентрации газа на линейный размер облака вдоль луча зрения, $N_{\rm H}L$. Корреляция между этими параметрами для вириализованных систем вытекает из соотношения $\sigma_v^2 \sim M/L \sim n_{\rm H}L = N_{\rm H}L$, т.е. $\sigma_v \sim (N_{\rm H}L)^{1/2}$. Большинство систем с линейными размерами $L > 1$ кпс расположены вдоль пунктирной линии, имеющей наклон $\kappa \simeq 0.3$ в логарифмических координатах $\log(\sigma_v)$, $\log(N_{\rm H}L)$, что можно рассматривать как хорошее согласие с ожидаемым соотношением ($\kappa = 0.5$) для вириализованных систем, связанных с галактиками. Системы с меньшими размерами ($L < 1$ кпс) образуются, по-видимому, в высокоскоростных выбросах газа из галактик с активным звездообразованием. Темными квадратами (см. также рис. 3) отмечены системы, имеющие размеры порядка 100 кпс, низкие дисперсии скоростей ($\sigma_v \sim 20$ км с$^{-1}$) и чрезвычайно низкие металличности ($Z \sim 0.001Z_\odot$).

нескольких квазаров. Основные выводы следующие:

1. Дисперсии скоростей крупномасштабных движений газа показывают корреляцию с размерами поглощающих облаков, что позволяет заключить, что эти системы являются вириализованными и связанными, с большой вероятностью, с далекими галактиками или их гало (см. рис. 1). Показано, что некоторые абсорбционные системы обладают характеристиками, типичными для высокоскоростных облаков (HVC), которые наблюдаются в гало нашей Галактики.

2. Содержание металлов в межгалактических абсорберах крайне неоднородно, с вариациями от почти солнечных относительных концентраций до 1/1000 солнечных. При этом высокометалличные системы перемежаются с системами без металлов (см. пример на рис. 2). Такое поведение позволяет считать выброс вещества из галактик основным источ-

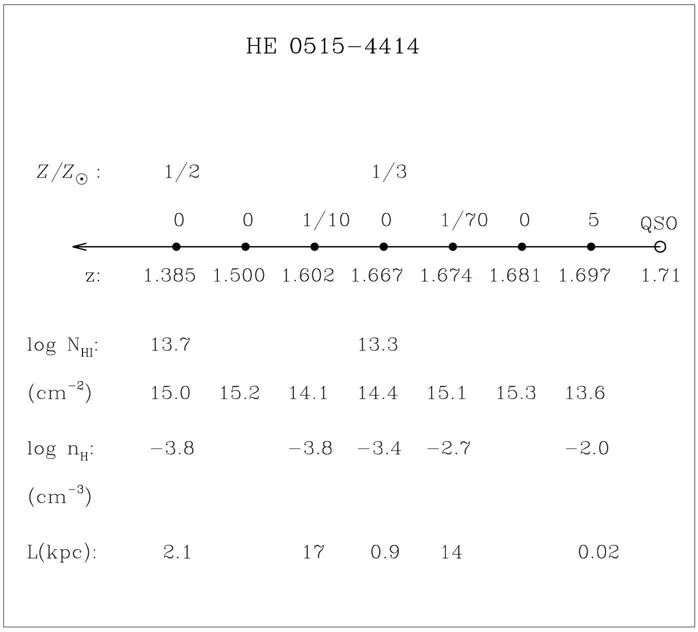

Рис. 2: **Пример распределения абсорбционных систем вдоль одного луча зрения в направлении на квазар HE 0515–4414 (схематично отмечены точками вдоль оси). Красные смещения абсорбционных систем, $z_{\rm abs}$, и самого квазара, $z_{\rm em}$, подписаны под осью, измеренные металличности ($Z/Z_\odot$) — над осью (два значения в одной вертикальной колонке относятся к двум системам, имеющим близкие красные смещения, $|\Delta v| \leq 150$ км с$^{-1}$). Нулевые металличности означают, что кроме водородных линий лаймановской серии в системах не удается обнаружить других линий атомов или ионов в доступном спектральном диапазоне от 3300 Å до 10000 Å. Абсорбер на $z_{\rm abs} = 1.697$ относится к ассоциированным системам. Соответствующие лучевые и объемные концентрации, а также линейные размеры абсорберов расположены в нижней части схемы. Результаты получены в работе Levshakov et al. (2003).**

ником обогащения межгалактической среды металлами. Системы с меньшими размерами имеют систематически бóльшие содержания металлов (см. рис. 3).

3. Обнаружен класс систем, имеющих чрезвычайно низкую металличность, $Z \lesssim 0.001 Z_\odot$, и размеры вдоль луча зрения порядка сотен кпс (отмечены темными квадратами на рис. 1 и 3). В этих системах отношение [Si/C] не превышает 0.3. Если данные системы являются протогалактическими облаками, обогащенными продуктами звездного нуклеосинтеза ранних звездных популяций, тогда измеренное значение [Si/C] указывает на то, что начальная функция масс этих звездных популяций имеет верхнюю границу $M_{\rm up} < 25\, M_\odot$. Тем самым не подтверждается космологический сценарий, в котором на ранних стадиях эволюции Вселенной ($z > 10$) образовывались звезды с массами $M > 100\, M_\odot$, что привело бы к отношениям [Si/C] > 1.

В **главе 6** проводится исследование распределения энергии ионизующего излучения в спектре метагалактического происхождения в области энергий от 1 Ryd до 10 Ryd. Дается опи-

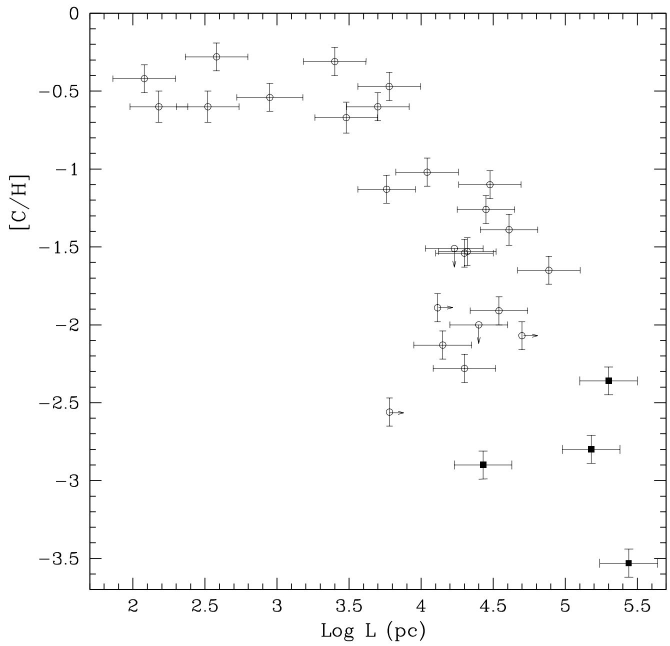

Рис. 3: Измеренные относительные концентрации углерода в системах с разными линейными размерами вдоль луча зрения. Систематически более высокое содержание тяжелых элементов наблюдается в более компактных системах. Темными квадратами (см. также рис. 1) отмечены системы, имеющие размеры порядка 100 кпс, низкие дисперсии скоростей ($\sigma_v \sim 20$ км с$^{-1}$) и чрезвычайно низкие металличности ($Z \sim 0.001 Z_\odot$).

сание алгоритма, позволяющего восстанавливать спектральную форму метагалактического излучения в этом диапазоне энергий из анализа оптически тонких абсорбционных систем с линиями ионов в последовательных стадиях ионизации (Si II–Si IV, C II–C IV, N III, N V, O VI).

В § 6.1 обсуждается современное состояние проблемы и формулируется задача. Согласно общепринятой точке зрения, фоновое ионизующее излучение обусловлено суммарным вкладом от квазаров, активных галактических ядер и звездного населения молодых галактик, а его спектральная форма определяется процессами поглощения в межгалактической среде. Поэтому УФ фон должен эволюционировать за космологическое время из-за различных парциальных вкладов от квазаров и галактик, а также из-за меняющейся непрозрачности межгалактической среды, вызванной вторичной ионизацией водорода и гелия.

В частности, в последнее время широко дискутируется вопрос о влиянии радиации, покидающей (escaping) галактики, на переменность спектра фонового излучения, обнаруженную по спутниковым наблюдениям леса He II Lyα. Однако этот гипотетический вклад от галактик оказал бы непосредственное влияние на спектральную форму ионизующего излучения, делая ее более мягкой в диапазоне $\lambda < 912$ Å по сравнению с чисто квазарными спектрами (Giroux, Shull 1997; Leitherer et al. 1999). Таким образом, восстановление спектральной формы метагалактического излучения дает возможность оценить относительный вклад галактик и квазаров в УФ фон на различных красных смещениях.

В § 6.2 рассматривается процедура восстановления спектральной формы ионизующего фонового излучения, MCISS (MCI+Spectral Shape). Процедура основана на методике функции отклика из теории планирования эксперимента (Налимов, Чернова 1965; Налимов 1971; Адлер, Маркова, Грановский 1971; Box, Hunter, Hunter 1978). Проверка метода на модельных спектрах показывает, что MCISS успешно справляется с восстановлением спектральной формы ионизующего излучения по оптически тонким абсорбционным системам.

Практическое применение MCISS к анализу наблюдаемых систем изложено в § 6.3. Часть из этих систем имеют красные смещения вблизи $z \sim 3$. Этот диапазон красных смещений представляет особый интерес, поскольку он соответствует космологической эпохе, когда He II еще не был полностью ионизован (Reimers et al. 1997). Присутствие в межгалактической среде заметного количества He II влияет на форму спектра фонового ионизующего излучения в диапазоне энергий $E > 1$ Ryd (см. рис. 4) из-за рекомбинационного излучения линии He II Lyα (эмиссионная деталь на 3 Ryd), двухфотонного излучения (протяженная эмиссия в области E $<$ 3 Ryd) и поглощения в континууме He II при E $>$ 4 Ryd (Haardt, Madau 1996; Fardal et al. 1998). Общепринятая на сегодняшний день форма спектра в эпоху $z = 3$, полученная из модельных расчетов Haardt, Madau (1996), показана на рис. 4 непрерывной кривой. В то же время спектры, восстановленные нами по абсорбционным системам с $z \sim 2.4 - 3$, демонстрируют резкое понижение интенсивности в диапазоне $E \geq 3$ Ryd (рис. 4). Мы интерпретируем это понижение как поглощение в линии He II Lyα в Lyα облаках и в диффузном газе, непрерывно заполняющем межгалактическое пространство (обобщенный эффект Гана-Петерсона).

По величине депрессии интенсивности при $E \geq 3$ Ryd можно оценить эффективную оптическую толщину непрерывно распределенного межгалактического газа в линии He II Lyα, $\tau_{\rm GP}^{\rm He\,II}$, и проследить за ее изменением в зависимости от z. На рис. 5 показана такая зависимость $\tau_{\rm GP}^{\rm He\,II}$ от красного смещения (темные символы) наряду с непосредственно измеренными непрозрачностями межгалактической среды (светлые символы), оцененными по наблюдениям на орбитальной обсерватории FUSE. Соответствие между прямыми измерениями и вычисленными по восстановленным спектрам можно считать удовлетворительным, хотя наши значения получились систематически выше на 20–40% ($\sim 1 - 2\sigma$). Эта разница может быть объяснена следующими причинами. Во-первых, мы использовали приближение формы депрессии континуального излучения между 3 и 4 Ryd простой ступенькой, которое не учитывает возможной более сложной формы полосы поглощения Гана-Петерсона. Во-вторых, глубина депрессии определяется в основном относительными интенсивностями линий C II, C III и C IV. Однако потенциал ионизации C III (3.52 Ryd) близок к началу леса He II Lyβ (3.56 Ryd). Поэтому дополнительный эффект Гана-Петерсона на этой гелиевой линии может влиять на измеряемую долю иона C III и следующего за ним C IV. Эти неопре-

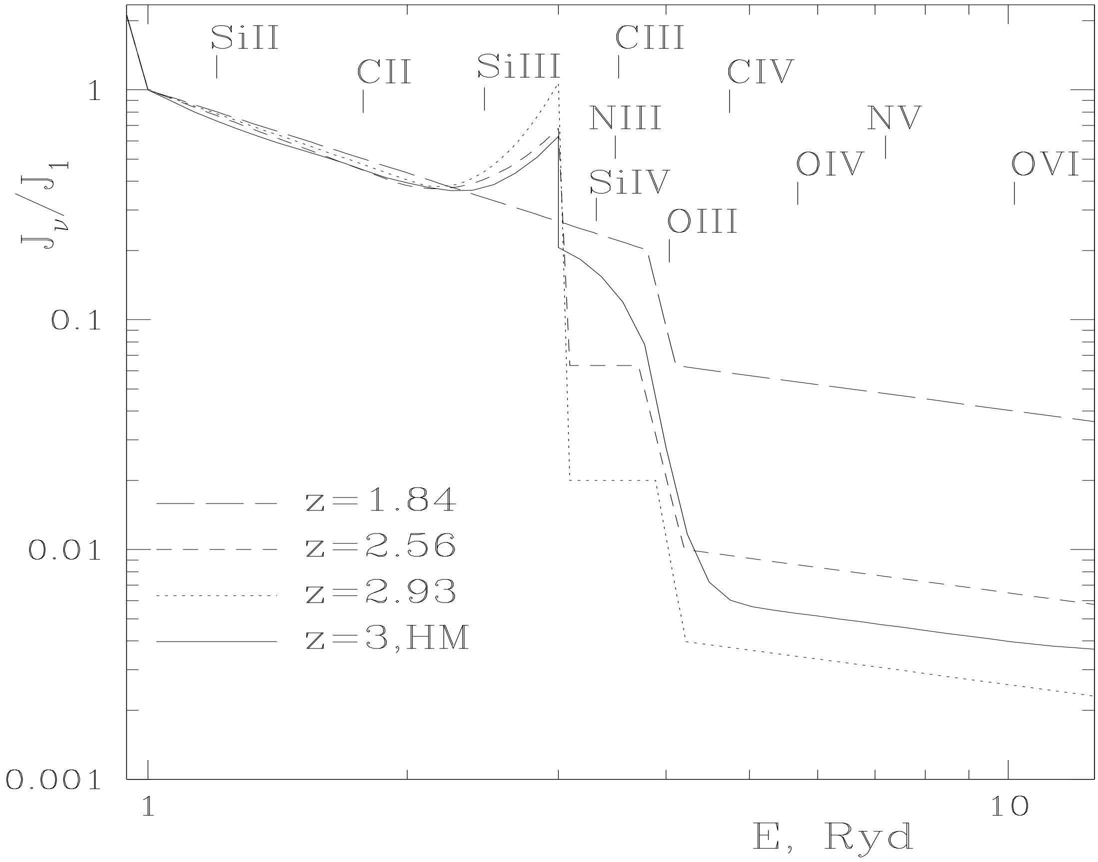

Рис. 4: Пример модельного спектра фонового метагалактического ионизующего излучения на $z = 3$ (непрерывная линия), вычисленного в работе Haardt & Madau (1996), и спектров, восстановленных процедурой MCISS (штриховые и пунктирные линии) по абсорбционным системам с линиями металлов.

деленности могут приводить к переоценке расчетной величины $\tau_{\rm GP}^{\rm He\,II}$ на 0.1–0.2. С другой стороны, измерения $\tau_{\rm GP}^{\rm He\,II}$ по данным с FUSE могут давать заниженные значения из-за проблем, связанных с вычитанием фона и установлением нуль-пункта в коротковолновой части спектра, соответствующей $z < 2.555$ (Fechner et al. 2006).

Восстановленные спектры в диапазоне $2.4 < z < 3$ показывают заметные флуктуации формы, в частности жесткости при $E > 4$ Ryd. Однако эти флуктуации однозначно связаны с процессами переработки квазарного излучения межгалактической средой, а не вкладом звездных источников. Звездная составляющая привела бы к очень крутому наклону спектра в области энергий $E > 1$ Ryd (показатель степенного спектра $\alpha < -2.0$ при 1 Ryd $< E <$ 3 Ryd) и понижению интенсивности на 3 Ryd, тогда как рассмотренные системы требуют относительно жестких спектров ($\alpha > -1.6$) и заметного эмиссионного пика на 3 Ryd в сочетании со значительным ослаблением излучения при $E > 4$ Ryd — т.е. деталей, которые однозначно указывают на процессы поглощения в лаймановском континууме He II

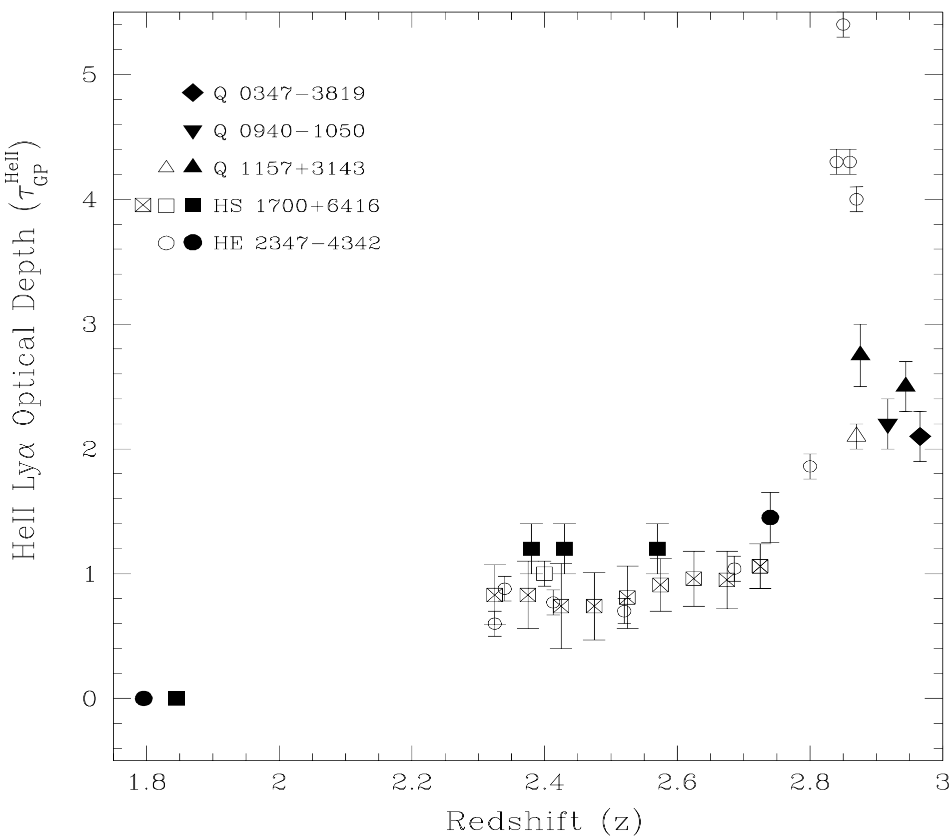

Рис. 5: Эволюционная зависимость непрозрачности в линии He II Lyα межгалактического газа, $\tau_{\rm GP}^{\rm He\,II}(z)$. Светлыми символами отмечены прямые измерения по УФ спектрам HE 2347–4342 (Zheng et al. 2004), HS 1700+6416 (квадратики — Davidsen et al. 1996, перечеркнутые квадратики — Fechner et al. 2006) и Q 1157+3143 (Reimers et al. 2005b). Темными символами показаны измерения по восстановленным спектрам фонового ионизующего излучения: ромбики и перевернутые треугольники — Agafonova et al. (2005); треугольники, квадратики и окружности — Agafonova et al. (2006). Отмеченные вертикальными отрезками ошибки соответствуют уровню значимости 1σ.

с последующим рекомбинационным переизлучением в линиях гелия.

Формы восстановленных УФ спектров при $z < 2$ (см. рис. 6) оказались более жесткими в диапазоне $E > 3$ Ryd по сравнению с модельными спектрами из работы Haardt, Madau (1996). Одна из причин такого расхождения заключается в том, что эти авторы использовали искаженную статистику облаков Lyα леса при $z \lesssim 1.8$, в которой относительное содержание сильных H I абсорберов было завышено, что привело к недооценке интенсивности УФ излучения в области $E > 4$ Ryd.

Величина понижения интенсивности УФ континуума на 4 Ryd использовалась для оценки эффективной лучевой концентрации He II. Найденный разброс значений N(He II) не превышал 40% вокруг медианы 1.2×10^{18} см$^{-2}$. Кроме этого, восстановленные спектры пока-

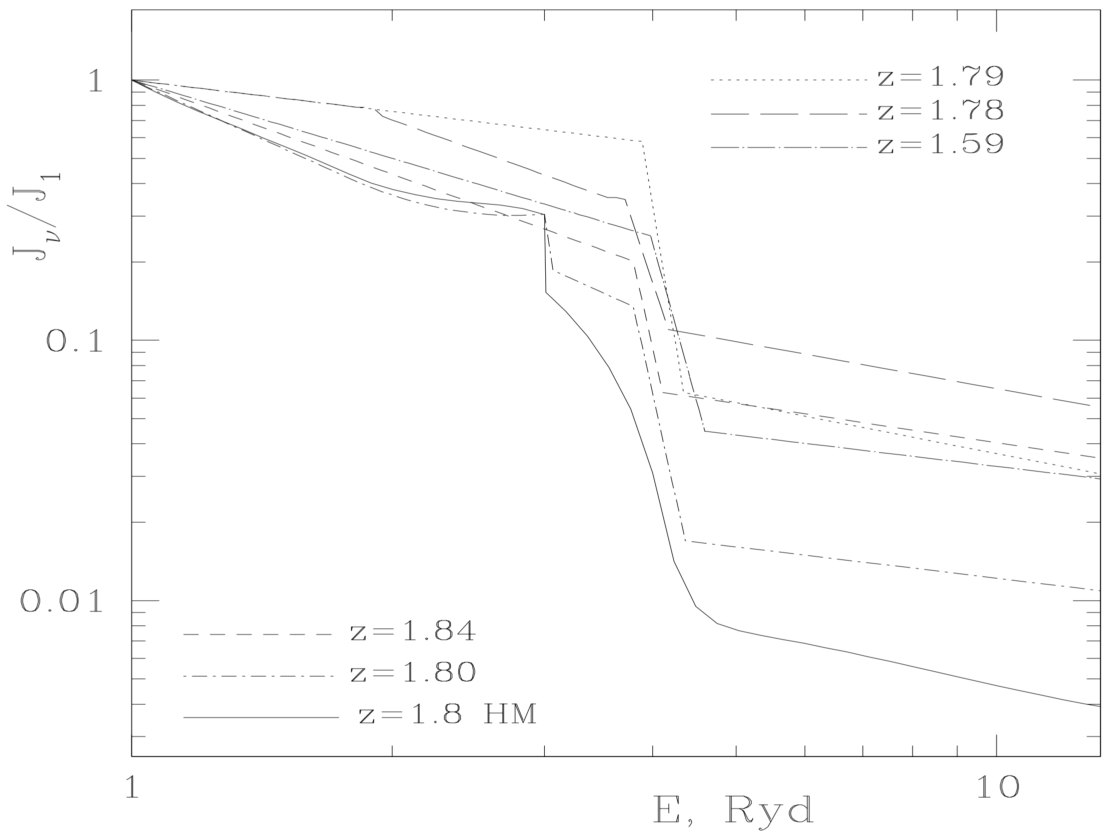

Рис. 6: Пример модельного спектра фонового метагалактического ионизующего излучения на $z = 1.8$ (непрерывная линия), вычисленного в работе Haardt & Madau (1996), и спектров, восстановленных процедурой MCISS (штриховые и пунктирные линии) по абсорбционным системам с линиями металлов.

зывают разнообразие форм с тенденцией к большим спектральным индексам в диапазоне $1 < E < 4$ Ryd ($\alpha > -1.4$, медианное значение $\alpha_{\rm med} = -1.0$). Эти спектры являются, по-видимому, внутренними спектрами квазаров, т.е. их форма не искажена поглощением в межгалактической среде.

В поддержку этого вывода приводятся следующие наблюдательные факты. Используя несколько рентгеновских обзоров, в работе Ueda et al. (2003) исследовалась космологическая эволюция функции светимости AGN. Было найдено, что сопутствующая пространственная плотность наиболее ярких AGN (квазаров) имеет пик на $z \simeq 2$ и после этого быстро уменьшается. Однако пространственная плотность менее ярких, но на порядки более многочисленных AGN продолжает возрастать вплоть до $z \lesssim 1$. С другой стороны, результаты обзора активных галактических ядер на FUSE при $z < 1$ (Scott et al. 2004) показали, что менее яркие AGN обладают более жесткими спектрами ($\alpha_{\rm med} = -0.6$) в диапазоне 650–1000 Å (0.9–1.4 Ryd).

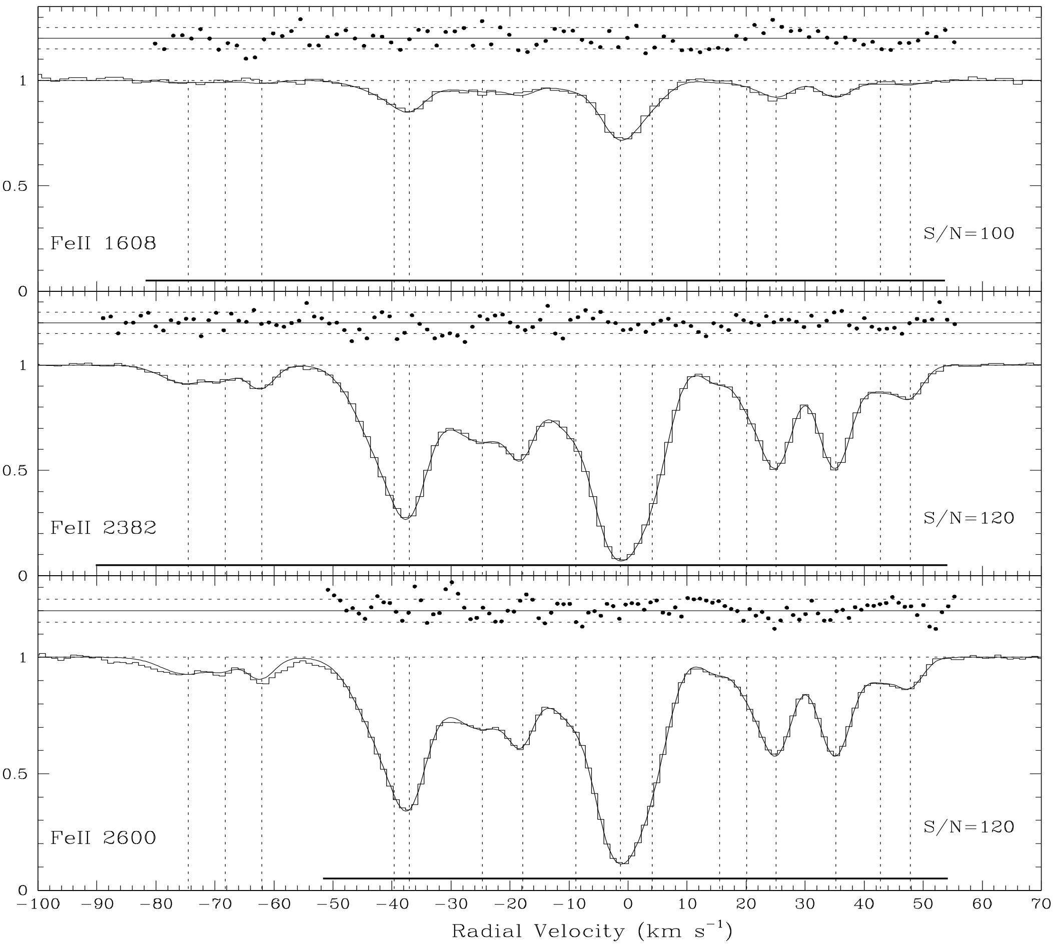

Рис. 7: Средневзвешенные спектры поглощения Fe II, отождествленные в системе $z = 1.84$ в квазаре Q 1101–264 (нормированные интенсивности показаны гистограммами). Нулевое значение радиальной скорости соответствует $z_{\rm abs} = 1.838911$. Непрерывные кривые — модельные спектры, вычисленные из совместного анализа линий Fe II. Вертикальные пунктирные линии отмечают положения компонент комплекса Fe II. Нормированные остатки, $(\mathcal{F}_i^{cal} - \mathcal{F}_i^{obs})/\sigma_i$, показаны точками (горизонтальные пунктирные линии ограничивают интервал $\pm 1\sigma$. Толстые горизонтальные отрезки отмечают участки профилей, включенные в процедуру оптимизации. Диапазоны $v < -50$ км с$^{-1}$ и $v \simeq -30$ км с$^{-1}$ в профиле линии Fe II блендированы слабыми теллурическими линиями.

Таким образом мы приходим к важным выводам, что изменение жесткости спектра метагалактического УФ излучения произошло между космологическими эпохами $z \sim 2.4$ и $z \sim 1.8$, и что метагалактическая среда становится полностью прозрачной в линии He II Lyα при $z \lesssim 1.8$, т.е. в эту эпоху закончился процесс реионизации межгалактического гелия.

В **главе 7** излагается наиболее последовательная методика, которая разработана для высокоточных дифференциальных измерений постоянной тонкой структуры α ($\equiv e^2/\hbar c$) по абсорбционным спектрам квазаров. Описываемые методы позволяют получить индивиду-

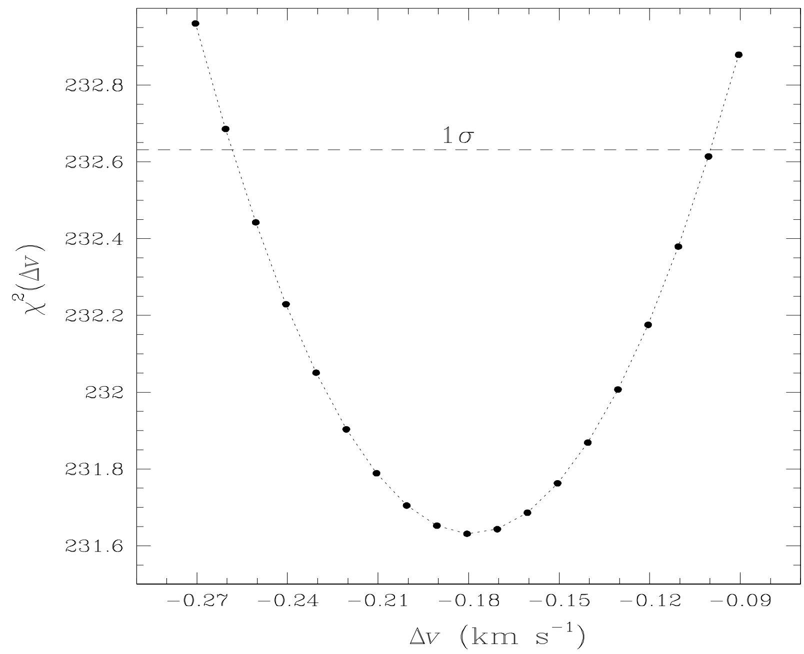

Рис. 8: χ^2 **как функция разности радиальных скоростей** Δv **между линиями Fe** II $\lambda 1608$ **и** $\lambda\lambda 2382, 2600$ **Å (число степеней свободы** $\nu = 305$**). Вершина параболы** $\chi^2(\Delta v)$ **при** $\Delta v = -0.18$ **км с**$^{-1}$ **дает наиболее вероятное значение** $\Delta\alpha/\alpha = $ **5.4 ppm. Уровень значимости** 1σ **определяется условием** $\Delta\chi^2 = 1$ **(штриховая линия), что приводит к** $\sigma_{\Delta v} = 0.08$ **км с**$^{-1}$**, или** $\sigma_{\Delta\alpha/\alpha} = 2.4$ **ppm.**

альную оценку $\Delta\alpha/\alpha = (\alpha_z - \alpha)/\alpha$, сравнимую по точности с величиной $\langle\Delta\alpha/\alpha\rangle$, усредненной по большому количеству систем с различными z. Следует сказать, что при исследовании гипотетических вариаций α на космологической временной шкале такие усреднения нежелательны, поскольку они не позволяют отследить систематические ошибки, приводят к фиктивно завышенной точности и потере информации о возможных изменениях α внутри интервала усреднения.

Результаты современных астрономических измерений удобно выражать в единицах 10^{-6} (1 ppm, parts per million). Соответственно, точности, о которых идет речь, составляют несколько единиц ppm. По 143 системам (данные с 10 м телескопа Keck), усредненным в диапазоне $0.2 < z < 4.2$, было получено $\langle\Delta\alpha/\alpha\rangle = -5.7 \pm 1.1$ ppm (Murphy et al. 2003), т.е. согласно этим оценкам значение α было меньше в ранние космологические эпохи. Однако результаты с 10 м телескопа не были подтверждены независимыми измерениями на телескопе VLT, в которых анализировались 23 системы из диапазона $0.4 < z < 2.3$: $\langle\Delta\alpha/\alpha\rangle = -0.6 \pm 0.6$ ppm (Chand et al. 2004).

Поскольку в этих измерениях сравнивались длины волн различных ионов, возможны систематические ошибки, связанные в первую очередь с неоднородностью ионизационной структуры поглощающего облака. Следует также отметить, что профили разных линий ионов могут испытывать дополнительные искажения, вызванные эффектами конечной корреляционной длины поля скоростей, которые чувствительны к отношению тепловой ширины линии к среднеквадратичной турбулентной скорости.

Эти чисто методические трудности можно обойти, используя линии только одного иона, например, Fe II. Нами был развит соответствующий метод, для краткости названный SIDAM (Single Ion Differential α Measurement). С помощью этого метода удается достичь точности порядка 1 ppm для индивидуальных значений $\Delta\alpha/\alpha\,(z)$.

В § 7.2 представлен анализ системы линий Fe II, отождествленных на $z_{\rm abs} = 1.15$ в спектре квазара HE 0515–4414 ($z_{\rm em} = 1.73$, $V = 14.9$). Благодаря высокой яркости этого квазара оценка $\Delta\alpha/\alpha$ на $z = 1.15$ имеет наивысшую на сегодняшний день точность: $\Delta\alpha/\alpha = -0.07 \pm 0.84$ ppm (Levshakov et al. 2006).

В § 7.3 описаны наблюдения и анализ другого яркого квазара Q 1101–264 ($z_{\rm em} = 2.15$, $V = 16.0$), в котором система линий Fe II отождествлена на $z = 1.84$. Наблюдения этого квазара были проведены на VLT в феврале 2006 года по программе ESO 076.A-0463. Результирующее спектральное разрешение составляло 3.95 км с$^{-1}$ (FWHM) в голубой части спектра ($\lambda \sim 4500$ Å) и 3.75 км с$^{-1}$ в красном диапазоне ($\lambda \sim 7000$ Å). Таким образом новые данные были получены с наивысшим на сегодняшний день спектральным разрешением, доступным в исследованиях абсорбционных спектров квазаров на больших телескопах (для сравнения, рабочее разрешение на 10 м телескопе 6-7 км с$^{-1}$, на VLT – от 5.5 до 7 км с$^{-1}$). Второй важной особенностью новых спектров является более точная калибровка отдельных экспозиций, поскольку лампы сравнения не разносились во времени на несколько часов после экспозиции спектра квазара, а снимались сразу же после нее.

Результирующие профили линий Fe II показаны на рис. 7. В суммарном спектре отношение S/N = 100 на $\lambda \sim 4566$ Å и S/N = 120 на $\lambda \sim 6765$ и 7382 Å. Две независимые процедуры редукции данных (1D и 2D) привели к практически одинаковым средневзвешенным спектрам Fe II. Оптимальное решение, показанное непрерывными кривыми на рис. 7, было найдено для 16-компонентной модели. Положения компонент отмечены вертикальными пунктирными линиями.

Анализ относительных радиальных скоростей линий Fe II λ1608 и λ2382/2600 приводит к величине $\Delta\alpha/\alpha = 5.4 \pm 2.4$ (рис. 8).

Сравнение $\Delta\alpha/\alpha = 5.4 \pm 2.4$ ppm на $z = 1.84$ с $\Delta\alpha/\alpha = -0.07 \pm 0.84$ ppm на $z = 1.15$ указывает на возможное изменение $\Delta\alpha/\alpha$ между эпохами $z \sim 1$ и $z \sim 1.8$. Положительное значение $\Delta\alpha/\alpha$ в эпоху $z \sim 1.8$ показывают также данные Chand et al. (2004): $\Delta\alpha/\alpha = 2.4 \pm 1.2$ ppm, усредненные по 8 системам из интервала $1.5 < z < 2.0$. С другой стороны, результаты Murphy et al. (2003), усредненные по этому же интервалу красных смещений (16 систем) дают $\Delta\alpha/\alpha = -5.4 \pm 4.5$ ppm. Если результаты Chand et al. и наши измерения согласуются на уровне 1σ, значение Murphy et al. существенно отличается и, что весьма существенно, имеет противоположный знак. Можно надеяться, что дальнейшие исследования с высоким спектральным разрешением прояснят этот вопрос.

3 Основные результаты и выводы

1. Исследовано влияние конечной корреляционной длины случайного поля скоростей на формирование профилей линий поглощения (мезотурбулентное приближение). Показано, что разногласие в относительных содержаниях металлов в зонах H I и H II в межзвездной среде голубой компактной галактики I Zw 18 снимается, если профили линий поглощения Ar, Si и Fe анализируются с учетом эффектов конечной корреляционной длины. Поскольку сопоставление данных о химическом составе газа в разных галактических комплексах с теорией звездообразования и теорией химической эволюции вещества во Вселенной играет первостепенное значение в современных исследованиях, мезотурбулентный подход имеет важное практическое значение.

2. Разработан метод высших моментов обобщенного уравнения переноса для расчета распределения вероятности интенсивности излучения I_λ внутри профиля линии поглощения при неполном статистическом ансамбле. Показано, что в общем случае лучевая концентрация внутри профиля линии, N_v, может быть найдена в определенном доверительном интервале, величина которого зависит от турбулентных характеристик поглощающего газа. Полученные результаты проверены и подтверждены методом Монте Карло.

3. Разработаны методы решения обратных задач спектроскопии на основе алгоритмов стохастической оптимизации (приближение постоянной плотности газа). Практическое использование обратного метода Монте Карло показано на примере измерения относительного содержания дейтерия в межгалактических диффузных облаках с низкой металличностью. Показано, что первичное содержание дейтерия близко к величине D/H $\simeq 3.0\times10^{-5}$, что приблизительно в 1.5 раз выше, чем в межзвездном газе в нашей Галактике.

4. Для вычислений кинетической температуры газа по линиям металлов, имеющих подобные профили, разработана вычислительная процедура, основанная на преобразовании Фурье абсорбционных профилей с последующей минимизацией целевой функции методом энтропийной регуляризации. Рассчитаны примеры с линиями C II, Si II и Fe II. Показано, что кинетическая температура восстанавливается с точностью 10-15% по спектрам с высоким отношением сигнала к шуму (S/N $\sim$ 100).

5. Детально рассмотрено формирование профилей спектральных линий в турбулентных средах с флуктуирующими плотностью газа и случайным полем скоростей. Проведен анализ эффектов, связанных с неоднородной по лучу зрения степенью ионизации различных химических элементов. Разработан алгоритм решения полной обратной задачи с восстановлением статистических характеристик полей плотности и скорости и одновременной оценкой физических параметров поглощающего облака.

6. Обнаружено, что дисперсии скоростей крупномасштабных движений газа коррелируют с размерами поглощающих облаков. Из этого следует, что такие абсорбционные системы являются вириализованными и связанными, с большой вероятностью, с далекими галактиками или их гало. Показано, что некоторые абсорбционные системы обладают характеристиками, типичными для высокоскоростных газовых облаков, которые наблюдаются в гало нашей Галактики.

7. Найдено, что содержание металлов в межгалактических абсорберах крайне неоднородно, с вариациями от почти солнечных до концентраций в 1000 раз ниже солнечных. При этом высокометалличные системы перемежаются с системами без металлов. Кроме того, такое поведение позволяет считать выброс вещества из галактик основным источником обогащения межгалактической среды металлами. Показано, что системы с меньшими размерами имеют систематически бо́льшие концентрации металлов.

8. Обнаружен класс систем, имеющих чрезвычайно низкую металличность, $Z < 0.001 Z_\odot$, и размеры вдоль луча зрения порядка сотен кпс. В этих системах отношение [Si/C] не превышает 0.3 dex. Если данные системы являются протогалактическими облаками, обогащенными продуктами звездного нуклеосинтеза ранних звездных популяций, то измеренное значение [Si/C] указывает на то, что начальная функция масс этих звездных популяций имеет верхнюю границу $M_{\rm up} < 25\,M_\odot$. Тем самым не подтверждается космологический сценарий, в котором на ранних стадиях эволюции Вселенной ($z > 10$) образовывались звезды с массами $M > 100\,M_\odot$, что привело бы к отношениям [Si/C] > 1.

9. Разработан алгоритм восстановления формы спектра ионизующего метагалактического излучения в диапазоне энергий от 1 Ryd до 10 Ryd по оптически тонким абсорбционным системам, содержащим линии ионов в последовательных стадиях ионизации. Исследованы системы с линиями металлов в интервалах красных смещений $1.5 \lesssim z \lesssim 1.9$ и $2.4 \lesssim z \lesssim 3.0$. Обнаружены флуктуации формы спектра ионизующего излучения. Показано, что эти флуктуации вызываются разными причинами на больших и малых z. В интервале $2.4 \lesssim z \lesssim 3.0$ изменения формы спектра вызываются в основном процессами переноса континуального излучения квазаров в межгалактической среде с переменной плотностью газа. При меньших красных смещениях, когда межгалактический газ становится полностью прозрачным в лаймановском континууме He II, флуктуации формы спектра ультрафиолетового фона связаны с внутренними характеристиками излучения самих квазаров и влиянием ближайшего к поглощающей области соседа.

10. Изучена непрозрачность межгалактического диффузного газа в линии He II Lyα. Определена эволюционная зависимость этой непрозрачности в диапазоне красных смещений $1.8 \lesssim z \lesssim 3$. Показано, что после $z = 2$ вторичная ионизация гелия практически полностью заканчивается.

11. В восстановленных формах спектров фонового излучения в области энергий $E > 4$ Ryd

не обнаружено никаких признаков мягкой компоненты, которые можно было бы ожидать от звездного населения молодых галактик с активными процессами звездообразования. Таким образом, метагалактический фон ионизующего излучения на $z \sim 3$ и $z \sim 2$ формируется в основном излучением квазаров и активных галактических ядер.

12. На двух красных смещениях $z = 1.15$ и $z = 1.84$ проведены прецизионные измерения возможных вариаций постоянной тонкой структуры, превышающие по своей точности почти на порядок предыдущие результаты. Найденные величины $\Delta\alpha/\alpha = -0.07 \pm 0.84$ ppm ($z = 1.15$) и $\Delta\alpha/\alpha = 5.4 \pm 2.4$ ppm ($z = 1.84$) указывают на возможное изменение α между эпохами $z \sim 1$ и $z \sim 1.8$.

Заключение

Детальное теоретическое рассмотрение процессов формирования профилей абсорбционных линий в условиях, близких к реальным, и спектральные исследования с разрешением, приближающимся к тепловым ширинам линий металлов, а также разработанные методы решения обратных задач спектроскопии с использованием новейших достижений в области многомерной оптимизации дают основания рассматривать данную работу как важный вклад в развитие нового направления исследований в наблюдательной космологии — определение с высокой точностью физических параметров и химического состава межгалактических газовых облаков в широком диапазоне красных смещений и изучение на базе этих параметров эволюционных процессов в межгалактическом газе на космологической временной шкале.

Публикации по теме диссертации

1. Levshakov S.A., Varshalovich D.A. *Molecular hydrogen in the z = 2.81 absorbing material toward the quasar PKS 0528–250.* MNRAS **212**, 517–521, 1985.

2. Левшаков С.А., Варшалович Д.А., Назаров Е.А. *Спектральные исследования квазаров Второго Бюраканского обзора северного неба. I. Квазары SBS 0953+549, SBS 1116+603 и SBS 1138+584.* Астрофизика **25**, 495–506, 1986.

3. Варшалович Д.А., Левшаков С.А., Назаров Е.А., Спиридонова О.И., Фоменко А.Ф. *Спектральные исследования квазара S5 0014+81. I. Анализ эмиссионного спектра.* Астрон. ж. **64**, 262–270, 1987.

4. Левшаков С.А., Варшалович Д.А., Назаров Е.А., Фоменко А.Ф. *Спектральные исследования квазара S5 0014+81. II. Анализ абсорбционного спектра.* Астрон. ж. **64**, 929–938, 1987.

5. Левшаков С.А., Фольтц К.Б. *Абсорбционная область z = 2.81 в направлении на квазар PKS 0528–250.* Письма в Астрон. ж. **14**, 1093–1100, 1988.

6. Левшаков С.А. *Абсорбционные спектры квазаров.* Астрофизика **29**, 408–430, 1988.

7. Левшаков С.А. *Абсорбционные системы с линиями металлов в спектрах квазаров.* Сообщения САО **61**, 43–53, 1989.

8. Левшаков С.А., Вернер Д.А., Яковлев Д.Г., Варшалович Д.А. *Квазар 4C 24.61: наблюдения и анализ абсорбционной системы с* $z_a > z_e$. Сообщения САО **61**, 66–69, 1989.

9. Levshakov S.A., Foltz C.B., Chaffee Jr. F.H., Black J.H. *Molecules at high redshift. V. Improved limits on the column density of CO in two damped Lyman alpha absorption systems.* Astron. J. **98**, 2052–2055, 1989.

10. Афанасьев В.Л., Лоренц Х., Вальтц И.Е., Левшаков С.А. *Спектральные исследования квазара ТВ 0933+733.* Письма в Астрон. ж. **16**, 483–489, 1990.

11. Levshakov S.A. *Time variation of the fine-structure constant: bounds available from high-resolution spectroscopy of QSOs.* In: *High Resolution Spectroscopy with the VLT*, ed. M.-H. Ulrich (Springer: Berlin), 139–142, 1992.

12. Levshakov S.A., Chaffee F.H., Foltz C.B., Black J.H. *Molecules at early epochs. VI. A search for molecular hydrogen in the z =3.391 damped Lyman alpha system toward Q 0000–263.* Astron. Astrophys. **262**, 385–394, 1992.

13. Варшалович Д.А., Левшаков С.А. *К вопросу о зависимости физических констант от времени.* Письма в ЖЭТФ **58**, 231–235, 1993.

14. Варшалович Д.А., Левшаков С.А., Потехин А.Ю. *Проверка неизменности фундаментальных констант за космологическое время.* Успехи Физ. Наук **163**, 111–113, 1993.

15. Levshakov S.A. *On cosmic time variability of the fine-structure constant.* Vistas in Astronomy **37**, 535–538, 1993.

16. Левшаков С.А. *Дифференциальные измерения фундаментальных физических постоянных в спектрах квазаров.* Астрон. ж. **71**, 181–188, 1994.

17. Levshakov S.A. *Differential measurements of the fine-structure constant from quasar spectra: a test of Kaluza-Klein cosmologies.* MNRAS **269**, 339–348, 1994.

18. Levshakov S.A., Kegel W.H. *The formation of carbon monoxide UV-absorption bands in media with stochastic velocity fields.* MNRAS **271**, 161–174, 1994.

19. Levshakov S.A. *A spectroscopic method for measuring turbulence in QSO Lyα forest clouds.* Space Sci. Rev. **74**, 285–288, 1995.

20. Levshakov S.A., D'Odorico S. *Fine-structure doublets in QSO spectra and variability of the fine-structure constant* α. In: *QSO Absorption Lines*, ed. G. Meylan (Springer: Berlin), 203–204, 1995.

21. Levshakov S.A., Kegel W.H. *Uncertainties in the interpretation of the Lyman alpha forest lines.* MNRAS **278**, 497–505, 1996.

22. Левшаков С.А., Такахара Ф. *Об отождествлении линий дейтерия в квазарных абсорбционных системах.* Письма в Астрон. ж. **22**, 491–496, 1996.

23. Levshakov S.A., Takahara F. *Effect of spatial correlations of chaotic velocity field on the D/H measurements from QSO absorption spectra.* MNRAS **279**, 651–660, 1996.

24. Levshakov S.A., Kegel W.H. *New aspects of absorption line formation in intervening turbulent clouds – I. General principles.* MNRAS **288**, 787–801, 1997.

25. Levshakov S.A., Kegel W.H., Mazetz I.E. *New aspects of absorption line formation in intervening turbulent clouds – II. Monte-Carlo simulation of interstellar H+D Ly*α *absorption profiles.* MNRAS **288**, 802–816, 1997.

26. Levshakov S.A., Kegel W.H., Takahara F. *The D/H ratio at* $z = 3.57$ *toward Q 1937–1009.* Astrophys. J. Lett. **499**, L1–L4, 1998.

27. Levshakov S.A., Kegel W.H., Takahara F. *The D/H ratio at* $z = 0.7$ *toward Q 1718 + 4807.* Astron. Astrophys. **336**, L29–L32, 1998.

28. Levshakov S.A., Kegel W.H. *The Gunn-Peterson effect and the Lyman alpha forest.* MNRAS **301**, 323–327, 1998.

29. Levshakov S.A., Kegel W.H., Takahara F. *New aspects of absorption line formation in intervening turbulent clouds – III. The inverse problem in the study of H+D profiles.* MNRAS **302**, 707–713, 1999.

30. Levshakov S.A., Takahara F., Agafonova I.I. *Measurability of kinetic temperature from metal absorption-line spectra formed in chaotic media.* Astrophys. J. **517**, 609–621, 1999.

31. Levshakov S.A., Agafonova I.I., Kegel W.H. *On the deuterium abundance at* $z_a = 3.514$ *towards APM 08279+5255.* Astron. Astrophys. **355**, L1–L4, 2000.

32. Левшаков С.А., Тайтлер Д., Бюрлс С., *Deuterium to hydrogen towards QSO 1009+2956 from a mesoturbulent model.* Astron. Astrophys. Trans. **19**, 385–396, 2000.

33. Levshakov S.A., Agafonova I.I., Kegel W.H. *Monte Carlo inversion of hydrogen and metal lines from QSO absorption spectra.* Astron. Astrophys. **360**, 833–845, 2000.

34. Molaro P., Levshakov S.A., D'Odorico S., Bonifacio P., Centurión M. *UVES observations of QSO 0000–2620: Argon and phosphorus abundances in the dust-free damped Lyα system at* $z_{\rm abs} = 3.3901$. Astrophys. J. **549**, 90–99, 2001.

35. Levshakov S.A., Kegel W.H., Agafonova I.I. *Argon and Silicon abundances in the damped Lyα system I Zw 18.* Astron. Astrophys. **373**, 836–842, 2001.

36. Levshakov S.A., Dessauges-Zavadsky M., D'Odorico S., Molaro P. *Molecular hydrogen, deuterium and metal abundances in the damped Lyα system at* $z_{\rm abs} = 3.025$ *toward QSO 0347–3819.* Astrophys. J. **565**, 696–719, 2002.

37. Levshakov S.A., Agafonova I.I., Centurión M., Mazets I.E. *Metal abundances and kinematics of quasar absorbers.– I. Absorption systems toward J2233-606.* Astron. Astrophys. **383**, 813–822, 2002.

38. Levshakov S.A., Dessauges-Zavadsky M., D'Odorico S., Molaro P. *A new constraint on cosmological variability of the proton-to-electron mass ratio.* MNRAS **333**, 373–377, 2002.

39. Levshakov S.A., Agafonova I.I., D'Odorico S., Wolfe A.M., Dessauges-Zavadsky M. *Metal abundances and kinematics of quasar absorbers. – II. Absorption systems toward Q0347–3819 and APM BR J0307–4945.* Astrophys. J. **582**, 596–614, 2003.

40. Levshakov S.A., Agafonova I.I., Centurión M., Molaro P. *Extremely metal-poor Lyman limit system at* $z_{\rm abs} = 2.917$ *toward the quasar HE 0940–1050.* Astron. Astrophys. **397**, 851–857, 2003.

41. Levshakov S.A., Agafonova I.I., Reimers D., Baade R. *Photoionized OVI absorbers toward the bright QSO HE 0515–4414.* Astron. Astrophys. **404**, 449–463, 2003.

42. Reimers D., Baade R., Quast R., Levshakov S.A. *Detection of molecular hydrogen at* $z = 1.15$ *toward HE 0515–4414.* Astron. Astrophys. **410**, 785–793, 2003.

43. Левшаков С.А. *Спектр ультрафиолетового фона и химический состав межгалактической среды на больших красных смещениях.* В: *Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*, ротапринт ИКИ РАН, 17, 2003

44. Levshakov S.A. *Astrophysical constraints on hypothetical variability of fundamental constants.* In: *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants*, eds. S.G. Karshenboim, E. Peik (Springer: Berlin), 151–166, 2004.

45. Levshakov S.A., D'Odorico S., Agafonova I.I., Dessauges-Zavadsky M. *The broad OVI absorber at* $z = 3.02$ *toward CTQ 325.* Astron. Astrophys. **413**, 827–831, 2004.

46. Quast R., Reimers D., Levshakov S.A. *Probing the variability of the fine-structure constant with the VLT UVES.* Astron. Astrophys. **415**, L7–L11, 2004.

47. Reimers D., Janknecht E., Fechner C., Agafonova I.I., Levshakov S.A., Lopez S. *HE 0141–3932: a bright QSO with an unusual emission line spectrum and associated absorption.* Astron. Astrophys. **435**, 17–27, 2005.

48. Levshakov S.A., Centurión M., Molaro P., D'Odorico S. *VLT/UVES constraints on the cosmological variability of the fine-structure constant.* Astron. Astrophys. **434**, 827–838, 2005.

49. Agafonova I.I., Centurión M., Levshakov S.A., Molaro P. *Spectral energy distribution of the metagalactic ionizing radiation field from QSO absorption spectra.* Astron. Astrophys. **441**, 9–21, 2005.

50. Reimers D., Agafonova I.I., Levshakov S.A., Hagen H.-J., Fechner C., Tytler D., Kirkman D., Lopez S. *Spectral shape of the UV ionizing background and OVI absorbers at* $z \sim 1.5$ *towards HS 0747+4259.* Astron. Astrophys. **449**, 9–22, 2006.

51. Levshakov S.A., Centurión M., Molaro P., D'Odorico S., Reimers D., Quast R., Pollmann M. *Most precise single redshift bound to* $\Delta\alpha/\alpha$. Astron. Astrophys. **449**, 879–889, 2006.

52. Vladilo G., Centurión M., Levshakov S.A., Péroux C., Khare P., Kulkarni V.P., York D.G. *Extinction and metal column density of HI regions up to redshift* $z = 2$. Astron. Astrophys. **454**, 151–164, 2006.

53. Agafonova I.I., Levshakov S.A., Reimers D., Fechner C., Tytler D., Simcoe R.A., Songaila A. *Spectral shape of the UV ionizing background and HeII absorption at redshifts* $1.8 < z < 2.9$. Astron. Astrophys. in press, 2006.

54. Levshakov S.A., Molaro P., Lopez S., D'Odorico S., Centurión M., Bonifacio P., Agafonova I.I., Reimers D. *High-precision measurements of* $\Delta\alpha/\alpha$ *from QSO absorption spectra.* In: *Precision Spectroscopy in Astrophysics*, eds. L. Pasquini, M. Romaniello and N. C. Santos (Springer-Verlag: Berlin), 2007, in press (astro-ph/0611803).

Цитированная литература

Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В., 1971, *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий* (М.: Наука).

Гончарский А.В., Черепащук А.М., Ягола А.Г., 1978, *Численные методы решения обратных задач астрофизики* (М.: Наука).

Налимов В.В., 1971, *Теория эксперимента* (М.: Наука).

Налимов В.В., Чернова Н.А., 1965, *Статистические методы планирования экстремальных экспериментов* (М.: Наука).
Спитцер Л., 1981, *Физические процессы в межзвездной среде* (М.: Мир).
Agafonova I.I., Levshakov S.A., Reimers D., Fechner C., Tytler D., Simcoe R.A., Songaila A., 2006, A&A, in press
Agafonova I.I., Centurión M., Levshakov S.A., Molaro P., 2005, A&A, **441**, 9.
Box G.E.P., Hunter W.G., Hunter J.S., 1978, *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building* (Wiley & Sons: N.Y.).
Chand H., Srianand R., Petitjean P., Aracil, B., 2004, A&A, **417**, 853.
Davidsen A.F., Kriss G.A., & Zheng W., 1996, Nature, **380**, 47.
Fardal M.A., Giroux M.L., Shull M., 1998, AJ, **115**, 2206.
Fechner C., Reimers D., Kriss G. A. et al., 2006, A&A, in press (astro-ph/0605150).
Ferland G.J., 1997, *A Brief Introduction to Cloudy* (Internal Rep., Lexington: Univ. Kentucky).
Gail H.-P., Hundt E., Kegel W.H., Schmid-Burgk J., Traving G., 1974, A&A, **32**, 65.
Gail H.-P., Sedelmayer T., Traving G., 1975, A&A, **44**, 421.
Gail H.-P., Sedelmayer T., Traving G., 1980, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **23**, 267.
Giroux M.L., Shull J.M., 1997, AJ, **113**, 1505.
Haardt F., Madau P., 1996, ApJ, **461**, 20.
Izotov Yu.I., Schaerer D., Charbonnel C., 2001, ApJ, **549**, 878.
Leitherer C., Schaerer D., Goldader J.D. et al., 1999, ApJS, **123**, 3.
Levshakov S.A., Centurión M., Molaro P., et al., 2006, A&A, 449, 879.
Levshakov S.A., Agafonova I.I., Reimers D., Baade R., 2003, A&A, **404**, 449.
Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E., 1953, J. Chem. Phys., **21**, 1087.
Murphy M.T., Webb J.K., Flambaum V.V., 2003, MNRAS, **345**, 609.
Reimers D., Fechner C., Hagen H.-J., Jakobsen P., Tytler D., Kirkman D., 2005, A&A, **442**, 63.
Reimers D., Köhler S., Wisotzki L., Groote D., Rodriguez-Pascual P., Wamsteker W., 1997, A&A, **327**, 890.
Tikhonov A.N., Arsenin V.A., 1977, *Solutions of Ill-Posed Problems* (Winston & Sons: Washington, DC).
Scott J.E., Kriss G.A., Brotherton M., Green R.F., Hutchings J., Shull J.M., Zheng W., 2004, ApJ, **615**, 135.
Ueda M., Akiyama M., Ohta K., Miyaji T., 2003, ApJ, **598**, 886.
Vidal-Madjar A., Kunth D., Lecavelier des Etangs A., et al., 2000, ApJ, **538**, L77.
Wu N., 1997, *The Maximum Entropy Method* (Springer-Verlag: Heidelberg).
Zheng W., Kriss G.A., Deharveng J.-M., et al., 2004, ApJ, **605**, 631.