

На правах рукописи

Теликова Ксения Николаевна

**Изучение теплового состояния ранней
Вселенной методами абсорбционной
спектроскопии квазаров**

Специальность 1.3.1 — Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: Балашев Сергей Александрович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: Васильев Евгений Олегович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Астрокосмического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева

Моисеев Алексей Валерьевич,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Специальной астрофизической обсерватории РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт астрономии РАН

Защита состоится г. в часов на заседании диссертационного
совета 34.01.04 на базе Федерального государственного бюджетного учрежде-
ния науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской акаде-
мии наук по адресу:
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе и
на веб-сайте ФТИ www.ioffe.ru.

Автореферат разослан 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н.

П. С. Штернин

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Работа посвящена изучению теплового состояния газа в ранней Вселенной на красных смещениях $z \sim 2 - 4$. Несмотря на значительный прогресс в области внегалактической астрофизики и космологии, современное понимание тепловой эволюции Вселенной остаётся неполным. Эпоха реионизации — одна из важнейших вех в истории Вселенной. Так как самыми распространенными элементами во Вселенной являются водород и гелий, процесс реионизации вещества условно можно разделить на две основные стадии. Первая стадия — это реионизация водорода H I , инициируемая фоновым излучением первых звёзд и галактик [1]. Считается, что тогда же произошла и реионизация гелия He I . Совокупность наблюдательных данных, в числе которых отсутствие сильного эффекта Ганна-Петерсона в спектрах квазаров — сильного поглощения H I на длинах волн меньше эмиссионной линии $\text{Ly}\alpha$ — на красных смещениях $z \lesssim 5$, указывает на то, что к этому моменту Вселенная была практически полностью реионизирована и остается такой до сих пор [2]. Реионизация $\text{He II} \rightarrow \text{He III}$ произошла на более поздних этапах эволюции Вселенной более жёстким излучением от квазаров в эпоху их наибольшей активности. Поглощение $\text{He II Ly}\alpha$ в спектрах квазаров, наблюдаемое в ультрафиолетовом диапазоне, указывает на то, что реионизация He II произошла на $z \sim 3$ (см., например, [3, 4, 5]). Однако точные красные смещения, динамика и длительность процессов реионизации Вселенной всё ещё недостаточно изучены и остаются предметом активных дебатов.

Не меньше открытых вопросов и в сценариях формирования галактик. Определяющую роль в формировании галактик играет аккреция вещества из межгалактической среды и галактических гало, а также выметание вещества из областей звездообразования звёздными и галактическими ветрами [6]. Аккреция и выметание газа входят в совокупность процессов барионного цикла и охватывают пространственные масштабы от долей парсек до сотен килопарсек, от молекулярных облаков в межзвёздном веществе до филаментарной структуры межгалактического вещества, поэтому их самосогласованный учёт в моделировании формирования галактик крайне сложен. Как следствие современные модели ограничены с точки зрения их предсказательной силы (см., например, [7]). Для того, чтобы пролить свет на механизмы барионного цикла, необходимы наблюдательные ограничения на физические свойства газа на различных масштабах, дополняющие космологические симуляции.

Спектроскопия квазаров на крупных оптических телескопах при помощи инструментов высокого разрешения предоставляет уникальную возможность исследовать тепловую эволюцию как межгалактического (МГС), так и окологалактического (ОГС) и межзвёздного (МЗС) газа на больших красных смещениях. Появление в последнее десятилетие заметного количества спектров квазаров высокого качества (разрешение $R \gtrsim 50\,000$ и отношение сигнала к шуму $S/N > 30$) делает чрезвычайно актуальными такие исследования.

Цели и задачи работы

Целью работы является определение теплового состояния газа на больших красных смещениях, $z = 2 - 4$, и различных пространственных масштабах, от межзвёздных облаков до межгалактических филаментов.

Нейтральный газ из МГС, ОГС и МЗС можно наблюдать в спектрах квазаров по характерным линиям поглощения лаймановской серии H I, сдвинутым на красное смещение, соответствующее эпохе, в которую образовались эти линии. Помимо линий H I в спектрах идентифицируются также линии металлов (см., например, [8, 9]), то есть элементов тяжелее гелия, различной степени ионизации и, иногда, молекул [10, 11, 12]. Совокупность линий поглощения H I и ассоциированных с ними линий других элементов и соединений принято называть абсорбционными системами. В зависимости от лучевой концентрации H I абсорбционные системы оказываются связаны с разным окружением. МГС детектируется в спектрах квазаров в виде частотола в основном ненасыщенных линий H I Ly α , $N(\text{H I}) \lesssim 10^{17} \text{ см}^{-2}$), называемого Ly α лесом. ОГС и МЗС проявляется в спектрах в виде суб-насыщенных Ly α систем (от английского термина sub-damped Ly α systems, sub-DLAs, с лучевой концентрацией нейтрального водорода $N(\text{H I}) = 10^{19} - 10^{20.3} \text{ см}^{-2}$), насыщенных Ly α систем (damped Ly α systems, DLAs, $N(\text{H I}) \gtrsim 10^{20.3} \text{ см}^{-2}$), а также дублетов линий поглощения Mg II и C IV. Такие абсорбционные системы зачастую связаны с газом на больших галактоцентрических расстояниях ($\lesssim 30$ кпк). Среди насыщенных Ly α систем также выделяют подкласс экстремально насыщенных Ly α систем (extremely strong damped Ly α systems, ESDLAs, $N(\text{H I}) \gtrsim 10^{21.7} \text{ см}^{-2}$), трассирующих газ на малых (менее 3 кпк) галактоцентрических расстояниях.

В представленной диссертации для определения теплового состояния в МГС, ОГС и МЗС посредством спектроскопии квазаров решался ряд задач:

- Разработка автоматической процедуры анализа линий Ly α леса в спектрах квазаров высокого разрешения с учётом возможного блендирования линий.
- Разработка статистического метода анализа ансамбля индивидуальных линий Ly α леса с целью оценки физических условий в МГС.
- Исследование теплового состояния МГС в эпоху реионизации He II, а именно зависимости температуры газа от его плотности. Получение ограничений на скорость фотоионизации водорода. Исследование механизма уширения спектральных линий Ly α леса за счёт космологического расширения филаментов МГС, а также оценка характерного размера филаментов МГС на красных смещениях $z = 2 - 4$.
- Измерение кинетической температуры тёплой фазы нейтральной среды в суб-насыщенной Ly α системе на красном смещении $z \approx 2.2$ в направлении на квазар HE 0001–2340. Сравнение полученных результатов с имеющимися данными по насыщенным Ly α системам на больших красных смещениях.
- Оценка темпа охлаждения межзвёздного газа в линии [C II] $\lambda 158$ мкм для экстремально насыщенных Ly α систем, ассоциированных с газом на

малых галактоцентрических расстояниях. Анализ бимодального характера распределения темпов охлаждения газа в линии [C II] $\lambda 158$ мкм для насыщенных Ly α систем.

Научная новизна

Результаты диссертации являются новыми и оригинальными. Разработана автоматическая процедура поиска и анализа одиночных линий Ly α леса в спектрах квазаров. Разработан оригинальный статистический метод анализа распределения абсорбционных систем Ly α леса, позволяющий оценивать тепловое состояние МГС. Проведён детальный анализ новых наблюдений суб-насыщенной Ly α системы на $z \approx 2.2$, полученных на спектрографе ESPRESSO/VLT [13] с чрезвычайно высоким разрешением $R = 140\,000$, а также новых наблюдений экстремально насыщенных Ly α систем, полученных на спектрографе X-Shooter/VLT [14].

Следующие результаты, описанные в диссертации, получены впервые:

- На основе анализа наблюдательных данных количественно показано, что учёт дополнительного механизма уширения спектральных линий МГС, связанного с конечным размером самих филаментов, влияет на определяемые тепловые параметры МГС.
- На основе анализа спектра с чрезвычайно высоким разрешением $R \approx 140\,000$ получена оценка на температуру тёплой нейтральной фазы окологалактического газа. Показано наличие антикорреляции между температурой и полной лучевой концентрацией нейтрального водорода H I для абсорбционных систем в диапазоне $N(\text{H I}) = 10^{17.4} - 10^{20.8} \text{ см}^{-2}$ на красном смещении $z > 2$.
- Показано, что темпы охлаждения газа в линии [C II] $\lambda 158$ мкм для экстремально насыщенных Ly α систем, трассирующих газ на малых галактоцентрических расстояниях, согласуются с темпами охлаждения для общей популяции насыщенных Ly α систем. Бимодальность темпов охлаждения газа в линии [C II] $\lambda 158$ мкм для насыщенных Ly α систем отражает бимодальность в пространстве параметров C II*/C II – металличность¹. При этом отношение C II*/C II растёт с уменьшением металличности.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обосновывается использованием современных методов математической статистики, а также современных методов анализа оптических спектров квазаров высокого и среднего разрешения. Кроме того, по возможности, результаты, описанные в диссертации, сравнивались с результатами других авторов и/или с предсказаниями численного моделирования.

Научная и практическая значимость

Представленный в диссертации статистический метод аппроксимации наблюдаемого распределения абсорбционных систем Ly α леса модельной функцией распределения позволяет надёжно определить нижнюю границу

¹Здесь и далее верхний индекс * означает первый возбуждённый уровень тонкой структуры.

распределения в пространстве параметров лучевых концентраций и доплеровских уширений (N , b). Преимущество разработанного метода заключается в том, что он позволяет включать в анализ наблюдаемое распределение систем $\text{Lu}\alpha$ леса, а не только системы, находящиеся вблизи нижней границы.

Оценка содержания C II^* , а также анализ темпов охлаждения газа в линии $[\text{C II}] \lambda 158$ мкм для экстремально насыщенных $\text{Lu}\alpha$ систем, то есть газа на малых галактоцентрических расстояниях, наблюдаемого в поглощении, важны для интерпретации излучения в линии $[\text{C II}] \lambda 158$ мкм от галактик на больших красных смещениях по данным текущих (ALPINE-ALMA, CRISTAL-ALMA) и будущих (CCAT-p) обзоров.

Полученные оценки на химический состав и физические условия, в частности температуру и темп охлаждения, для абсорбционных систем, ассоциированных с ОГС и МЗС, необходимы для понимания теплового состояния газа на больших красных смещениях и служат наблюдательными ограничениями для численного моделирования формирования галактик.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный статистический метод аппроксимации наблюдаемого распределения абсорбционных систем $\text{Lu}\alpha$ леса в пространстве параметров лучевых концентраций и доплеровских уширений (N , b) модельной функцией распределения позволяет определить нижнюю границу распределения (N , b), необходимую для расчёта тепловых параметров МГС и их эволюции.
2. Дополнительный механизм уширения, связанный с наличием пространственной структуры филаментов МГС, значительно влияет на определяемые из наблюдений параметры теплового состояния МГС. При этом пространственная неоднородность реионизации накладывает дополнительные ограничения на методы определения теплового состояния МГС. Характерный размер филаментов МГС средней плотности на $z \approx 2.4 - 4.3$ составляет $1 - 1.6$ Мпк.
3. Кинетическая температура тёплой фазы нейтральной среды в субнасыщенной $\text{Lu}\alpha$ системе на красном смещении $z \approx 2.2$ в направлении на квазар HE 0001–2340 для большинства отдельных скоростных компонент системы систематически превышает каноническое значение, получаемое в стандартных моделях теплового баланса. При этом средневзвешенная температура системы, измеренная как по спектру ESPRESSO/VLT, так и по спектру UVES/VLT, равна $T = 16\,000$ К.
4. Существует значимая антикорреляция между температурой тёплой нейтральной фазы и полной лучевой концентрацией H I для абсорбционных систем в диапазоне $N(\text{H I}) = 10^{17.4} - 10^{20.8} \text{ см}^{-2}$.
5. Темпы охлаждения в линии $[\text{C II}] \lambda 158$ мкм, измеряемые в экстремально насыщенных $\text{Lu}\alpha$ системах, ассоциированных с газом на малых галактоцентрических расстояниях ($\lesssim 3$ кпк), согласуются с результатами для насыщенных $\text{Lu}\alpha$ систем из общей популяции, трассирующих преимущественно окологалактический газ ($\lesssim 30$ кпк). Бимодальный характер

распределения темпов охлаждения газа в линии [C II] $\lambda 158$ мкм для насыщенных Ly α систем отражает бимодальность в пространстве параметров C II*/C II – металличность. При этом отношение C II*/C II растёт с уменьшением металличности.

Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 9 статьях в рецензируемых журналах и доложены на объединённых астрофизических семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на всероссийских и международных конференциях: “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” НЕА-2016, 2017, 2018, 2019, 2021 (Москва), “The first joint international conference on astrophysics for young scientists” (Бюракан, Армения, 2017), “ФизикА.СПб” 2018, 2019, 2020, 2021 (Санкт-Петербург), “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (Пушино, 2018, 2019), “Intergalactic interconnections” (Марсель, Франция, 2018), “ВАК-2021: Астрономия в эпоху многоканальных исследований” (Москва, 2021), “Joint Observatories Kavli Science Forum in Chile” (Сантьяго, Чили, 2022) и “iid2022: Statistical methods for event data” (Хантсвилл, США, 2022).

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объём диссертации 183 страницы, включая 71 рисунок, 14 таблиц. Библиография включает 197 наименований на 17 страницах.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, описываются цели и задачи работы, научная новизна, достоверность и научная и практическая значимость полученных результатов, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 является обзорной и посвящена описанию открытия и первых наблюдений квазаров, возможностей и методов абсорбционной спектроскопии на современных инструментах, а также некоторых основных результатов таких исследований. Последующие главы диссертации являются оригинальными.

Глава 2 посвящена тепловому состоянию МГС, а именно зависимости температуры МГС от её плотности, на $z = 2 - 4$. Задача об оценке теплового состояния МГС может решаться при помощи анализа свойств Ly α леса в спектрах квазаров. В разделе 2.1 описывается степенной вид зависимости температуры от плотности в МГС, $T = T_0 \Delta^{\gamma-1}$, после эпохи реионизации водорода, то есть на красных смещениях $z \lesssim 5$ (здесь Δ – плотность газа, выраженная в единицах средней плотности барионов, а $T_0 \equiv T(\Delta = 1)^2$). Приводятся оценки параметров зависимости температура-плотность как в равновесном случае, в отсутствие неравновесных процессов фотоионизации газа, так и в эпоху реионизации He II \rightarrow He III. В разделе 2.2 описывается вид

²Так как в слабонелинейном режиме возмущений пространственная эволюция плотности барионного вещества описывается так же, как и эволюция плотности тёмной материи, $\Delta \equiv \rho_b/\bar{\rho}_b = \rho_{DM}/\bar{\rho}_{DM}$, где индексы b и DM относятся, соответственно, к барионной и тёмной материи [15].

распределения систем $\text{Ly}\alpha$ леса по лучевым концентрациям N и доплеровским параметрам b , а также связь нижней границы этого распределения с тепловыми параметрами МГС. Вводится стандартный аналитический формализм, в котором принимается, что минимальное уширение линий МГС имеет исключительно тепловую природу (см., например, [16]). В разделе 2.3 описывается предложенный нами метод оценки комбинации температуры для средней плотности T_0 и скорости фотоионизации водорода Γ . Этот метод основан на использовании измерений эффективной оптической толщины $\text{Ly}\alpha$ леса совместно с модельной функцией распределения плотности МГС. Раздел 2.4 посвящён описанию данных наблюдений, используемых в работе. Для анализа из базы данных KODIAQ [17] эшелле-спектрографа HIRES/Keck [18] были отобраны и проанализированы 47 оптических спектров квазаров с высокими разрешением ($R \sim 36\,000 - 72\,000$) и отношением сигнала к шуму ($S/N \sim 20 - 100$). В разделе 2.5 детально описывается спектральный анализ отобранных данных. Подраздел 2.5.1 посвящён описанию оригинальной автоматической процедуры поиска и анализа линий $\text{Ly}\alpha$ леса в спектрах квазаров. В подразделе 2.5.1 описана процедура прополки полученной выборки от линий металлов, ложно-отождествлённых с H I в процессе работы автоматического алгоритма. Раздел 2.6 посвящён описанию анализа распределения (N, b) при помощи оригинального статистического метода, основанного на аппроксимации наблюдаемой выборки двумерной модельной плотностью распределения. В разделе 2.7 представлены основные результаты главы 2, которые были опубликованы в работах [A6–A8].

На рис. 1 показан результат статистического анализа распределения (N, b) в 6 диапазонах по красному смещению. Мы учитывали, что финальная выборка (N, b) может также содержать статистические выбросы, которые могут являться как неотожествлёнными линиями металлов, так и системами $\text{Ly}\alpha$ леса с пекулярными физическими условиями. Параметры распределений линий $\text{Ly}\alpha$ и статистических выбросов определялись в рамках байесовского подхода с помощью метода Монте-Карло по схеме марковских цепей. Цветовым градиентом показана плотность функции распределения $\text{Ly}\alpha$ систем в относительных единицах в каждом диапазоне по красному смещению, посчитанная по точечным оценкам параметров аппроксимации. Точечные оценки рассчитывались как медианы апостериорных распределений плотности вероятности параметров. Видно, что распределение систем $\text{Ly}\alpha$ леса эволюционирует с красным смещением. В частности, изменяется положение нижней границы распределения, зависящее от параметров зависимости температура-плотность в МГС. В разделе 2.8 анализируются возможные источники систематических неопределённостей наших оценок, такие как выбранная параметрическая модель распределения систем $\text{Ly}\alpha$ леса, модель распределения плотности газа, а также предположение о равенстве характерного размера облака джинсовской длине. Последнее детально рассмотрено в главе 3. Раздел 2.9 является заключением к главе 2.

Глава 3 посвящена рассмотрению джинсовского уширения линий МГС, обусловленного космологическим расширением межгалактических филаментов. Оказывается, наличие пространственной структуры филаментов приводит к тому, что минимальное уширение спектральных линий МГС может быть больше уширения, обусловленного тепловым движением атомов среды [19]. При этом такое дополнительное уширение пропорционально размеру фи-

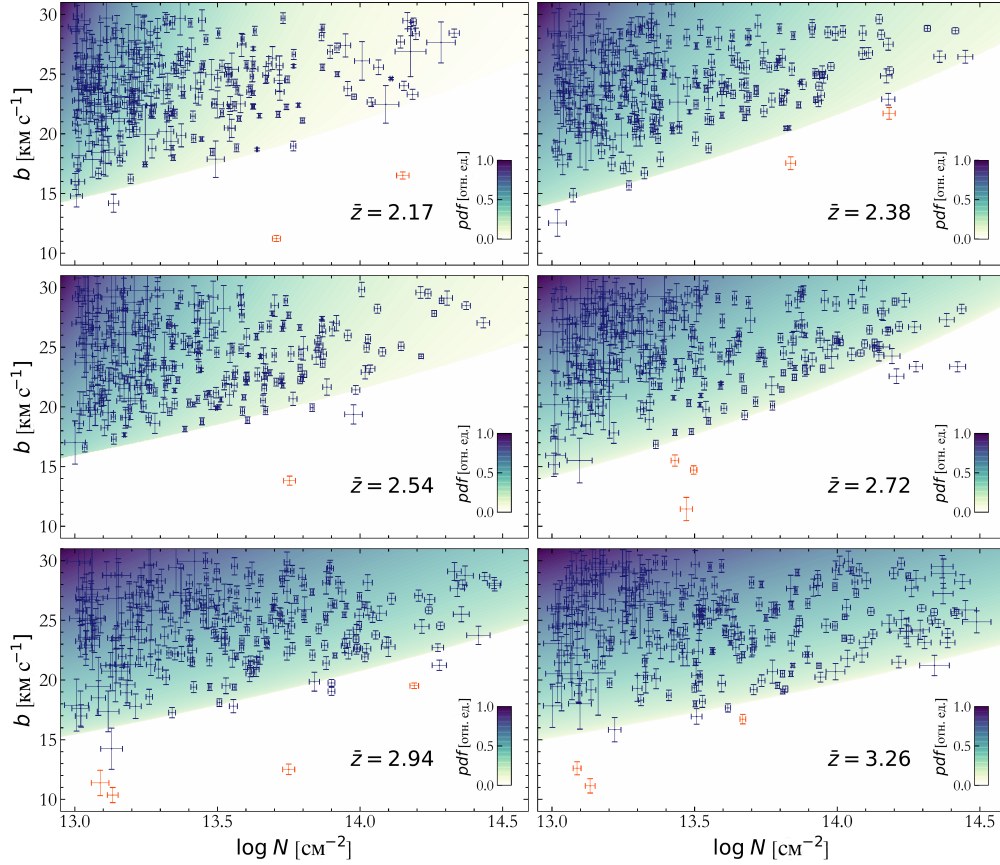


Рис. 1: Распределения линий Ly α леса после прополки от линий металлов в 6 диапазонах по красному смещению. Линии Ly α леса показаны синими точками, вероятные статистические выбросы показаны красными точками. Цветовым градиентом показана плотность функции распределения линий Ly α леса в относительных единицах, см. подробности в тексте.

ламента, определяющегося джинсовской длиной [20]. Раздел 3.1 представляет собой введение к главе 3. В разделе 3.2 вводится аналитический формализм для описания джинсовского уширения линий МГС, а также приводится вид нижней границы распределения (N, b) с учётом пространственной структуры филаментов МГС (см., например, [19]). Раздел 3.3 посвящён описанию наблюдательных данных, используемых в работе. К выборке из 47 спектров, описанной в главе 2, был добавлен и проанализирован 51 спектр квазара с высокими разрешением ($R \sim 45\,000$) и отношением сигнала к шуму ($S/N \sim 30 - 250$) из базы данных SQUAD [21] эшелле-спектрографа UVES/VLT [22]. Раздел 3.4 посвящён описанию спектрального и статистического анализа совместной выборки из 98 спектров квазаров. В разделе 3.5 описаны результаты главы 3, опубликованные в работе [A3]. Впервые на основе анализа данных наблюдений нами показано, что дополнительный механизм уширения, связанный с пространственной структурой филаментов МГС, значительно влияет на определяемые тепловые параметры МГС. На рис. 2 показаны измеренные значения T_0 , $\gamma - 1$, $\Gamma_{-12} \equiv \Gamma/10^{-12} \text{ s}^{-1}$ и масштабного коэффициента f_J , связывающего характерный размер филаментов МГС с джинсовской длиной³. Наши оценки T_0 и γ , показанные чёрными символами, согласуются с отсут-

³Структура филамента предполагается гауссовой.

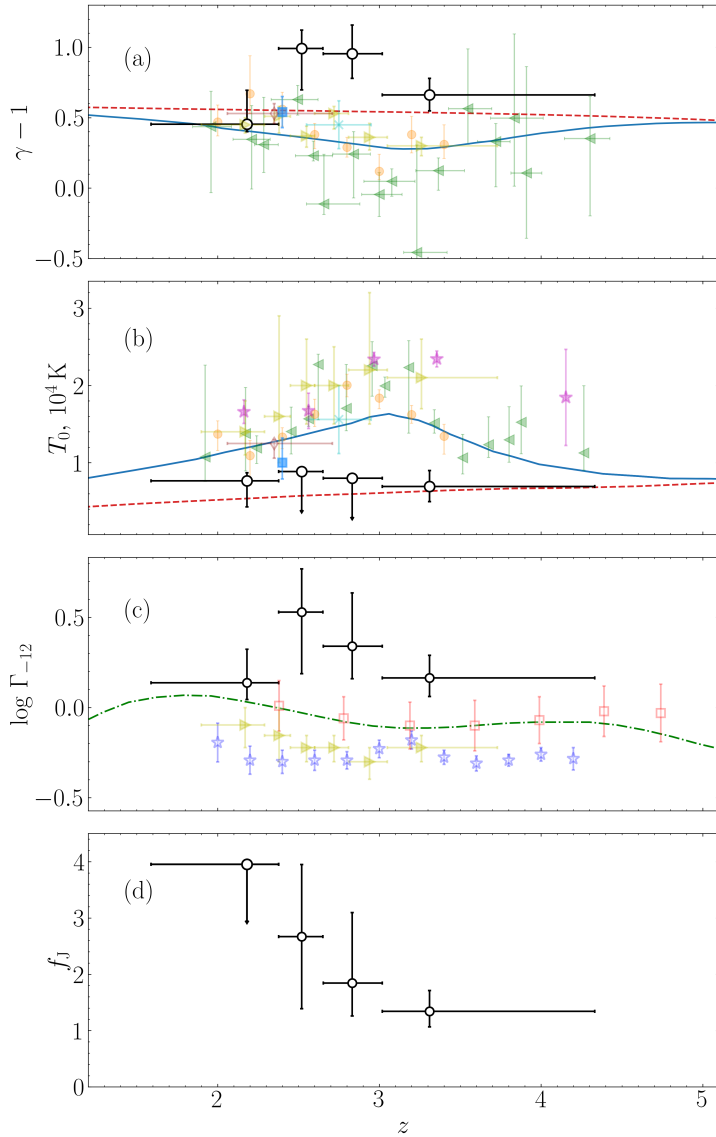


Рис. 2: Параметры $\gamma - 1$ (a), T_0 (b), Γ_{-12} (c) и f_J (d) в зависимости от красного смещения. Чёрными символами показаны результаты главы 3. Точечные оценки и верхние пределы соответствуют 0.5 и 0.95 квантилям апостериорных распределений плотности вероятности параметров. Неопределённости измерений посчитаны по 0.16 и 0.84 квантилям распределений. Синие сплошные и красные штриховые кривые соответствуют модельным расчётам в двух различных сценариях реионизации из работы [23]: с учётом и без учёта реионизации He II. Остальными символами показаны измерения T_0 из работ [24, 25, 26, 27, 28, 29] и Γ_{-12} из [30, 31]. Модель УФ фона из работы [32] показана зелёной штрихпунктирной кривой. Результаты главы 2 показаны жёлтыми треугольниками.

ствием реионизации He II в диапазоне исследуемых красных смещений (полуаналитическая модель, показанная красной штриховой кривой на первых двух панелях). Такой результат может объясняться неоднородным характером реионизации He II, который приводит к более сложной картине, когда зависимость температуры от плотности в разных областях пространства не описывается единым степенным законом с общими параметрами T_0 и γ [33]. При этом методы, основанные на анализе минимального уширения линий МГС, чувствительны к тепловому состоянию областей МГС, ещё не затронутых реионизацией. Использование формализма, в котором минимальное уширение линий МГС определяется как тепловым движением атомов, так и космологическим расширением самих филаментов, позволил нам оценить характерный размер филаментов МГС средней плотности на $z \approx 2.4 - 4.3$; он оказался равен $1 - 1.6 \text{ Мпк}^4$. Раздел 3.7 является заключением к главе 3.

Глава 4 посвящена оценке температуры тёплой фазы нейтрального окологалактического газа на $z \sim 2$. Раздел 4.1 является введением к главе 4, в котором обсуждаются барионный цикл и его значимость для эволюции галактик, тепловое состояние нейтрального газа, а также методы измерения

⁴В сопутствующей системе координат, в которой расстояние между двумя фиксированными точками не изменяется вследствие космологического расширения Вселенной.

температуры нейтрального газа в различных фазах как для локальной Вселенной, так и на больших красных смещениях. В диссертации развивается метод оценки температуры тёплой нейтральной фазы газа из анализа уширения линий металлов низкой степени ионизации, ассоциированных с этим газом. Раздел 4.2 посвящён описанию спектральных наблюдательных данных, используемых в работе. Измерение температуры тёплой фазы ОГС проводилось при помощи анализа суб-насыщенной $\text{Ly}\alpha$ системы на $z \approx 2.2$ в спектре яркого квазара HE 0001–2340, полученном на эшелле-спектрографе очень высокого разрешения ($R \sim 140\,000$) ESPRESSO/VLT. Данный спектр был снят по наблюдательной заявке соавторов диссертанта. Помимо спектра, полученного при помощи ESPRESSO/VLT, в работе диссертантом также анализируется спектр той же суб-насыщенной $\text{Ly}\alpha$ системы из архива SQUAD, полученный при более низком разрешении ($R \sim 50\,000$) при помощи спектрографа UVES/VLT. В разделе 4.3 описывается спектральный анализ исследуемой суб-насыщенной $\text{Ly}\alpha$ системы. В разделе 4.4 приводится результат оценки температуры для всех отождествлённых скоростных компонент суб-насыщенной $\text{Ly}\alpha$ системы (см. рис. 3).

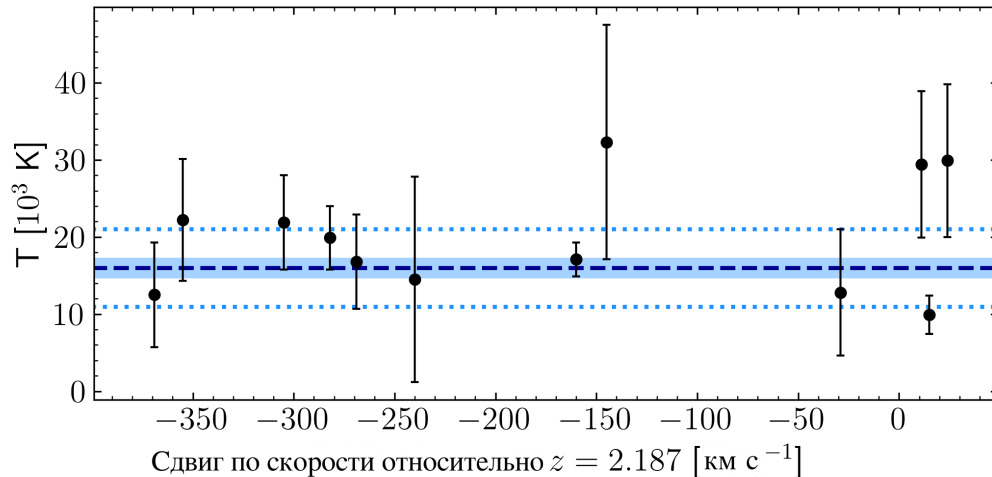


Рис. 3: Кинетическая температура отдельных компонент суб-насыщенной $\text{Ly}\alpha$ системы на $z = 2.187$. По оси абсцисс отложен сдвиг компонент по скорости относительно $z = 2.187$. Средневзвешенная температура и соответствующая ошибка на среднее $T = 16\,000 \pm 1300 \text{ K}$ показаны голубой штриховой линией и голубой закрашенной областью. Взвешенная дисперсия температуры компонент показана пунктирными линиями.

Температура для большинства компонент суб-насыщенной $\text{Ly}\alpha$ системы систематически превышает значение ≈ 8000 , обычно получаемое для тёплой фазы нейтральной диффузной МЗС в моделях теплового баланса [34]. Раздел 4.5 посвящён сравнению полученных нами результатов с имеющимися оценками для $z > 2$ из литературы. На рис. 4 приведена зависимость температуры тёплой фазы нейтральной среды T от полной лучевой концентрации нейтрального водорода $N(\text{H I})$. Мы обнаружили антикорреляцию между T и $N(\text{H I})$. В разделе 4.6 обсуждаются возможные причины наблюдаемой зависимости. В частности, в силу антикорреляции между $N(\text{H I})$ и галактоцентрическим расстоянием для насыщенных $\text{Ly}\alpha$ систем, антикорреляция между T и $N(\text{H I})$ может указывать на увеличение средней температуры тёплой нейтральной фазы от центра к периферии галактик. Раздел 4.7 посвящён

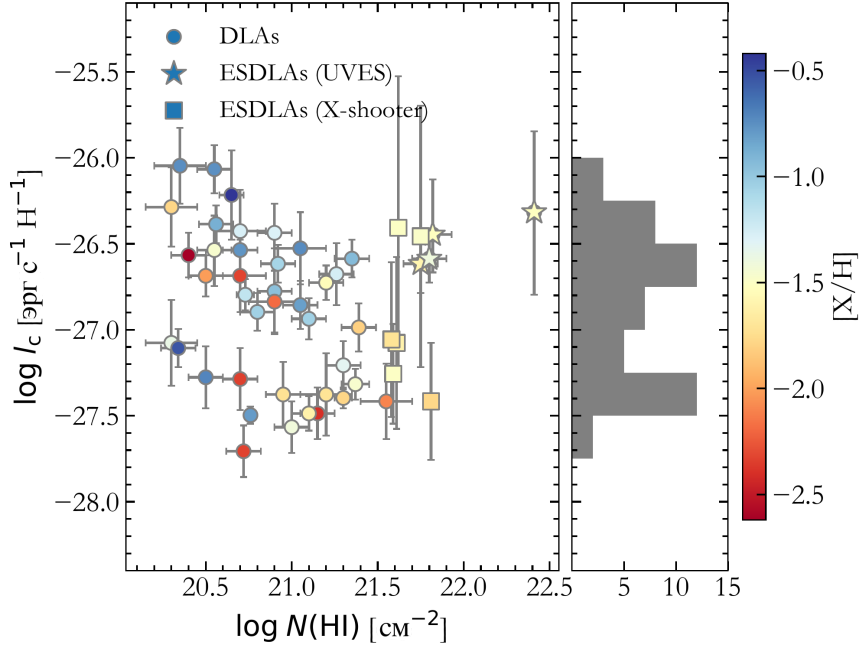


Рис. 5: Темп охлаждения газа в линии [C II] в зависимости от лучевой концентрации H I. Круглыми символами показаны насыщенные Ly α системы из работ [35, 36]. Наши измерения для экстремально насыщенных Ly α систем показаны звёздами (из анализа спектров, полученных при помощи UVES) и квадратами (X-Shooter). Цветовым градиентом показана металличность по отношению к солнечной. Гистограммой показано распределение темпов охлаждения, маргинализованное по лучевым концентрациям H I.

ESDLA систем (подраздел 5.3.4). Подраздел 5.3.5 посвящён оценке поглощения на пыли от ESDLA систем на луче зрения. В разделе 5.4 оценивается концентрация электронов в газе, ассоциированном с одной из ESDLA систем, в которой нами было обнаружено поглощение в линиях Si II*. В разделе 5.5 обсуждается сравнение результатов спектрального анализа ESDLA систем с данными из литературы. В частности, обсуждается содержание H₂ в ESDLA системах, а также зависимость лучевой концентрации H₂ от количества железа в пылевой фазе. Раздел 5.6 посвящён охлаждению газа в линии [C II] λ 158 мкм. На рис. 5 приведено сравнение темпов охлаждения в линии [C II] λ 158 мкм, измеренных для ESDLA систем, с темпами охлаждения для DLA систем, взятыми из литературы. Наши измерения для ESDLA систем согласуются с измерениями для DLA систем и не противоречат ранее обнаруженной бимодальности распределения темпов охлаждения. Раздел 5.7 посвящён физической интерпретации бимодальности. В подразделе 5.7.1 мы показали, что она, в действительности, отражает бимодальность в пространстве параметров C II*/C II – металличность. Подраздел 5.7.2 посвящён описанию механизмов накачки C II* и зависимости отношения C II*/C II от параметров среды. Подраздел 5.7.3 посвящён расчёту фазовой диаграммы нейтрального газа в зависимости от металличности в предположении теплового баланса. В качестве механизмов нагрева газа мы учитывали нагрев космическими лучами (ключевая роль при низких металличностях), фотоэлектронами с пыли и нагрев вследствие диссипации турбулентности. В качестве механизмов охлаждения мы учитывали охлаждение за счёт Ly α (ключевая роль в охлаждении тёплой нейтральной фазы газа), а также охлаждение посредством

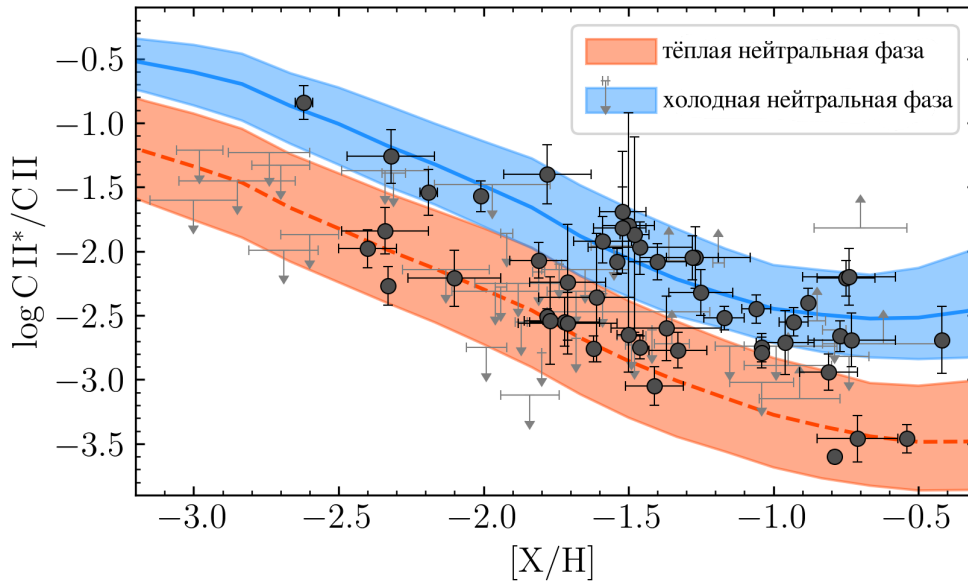


Рис. 6: Отношение $C II^*/C II$ в зависимости от металличности. Чёрными символами показаны наблюдаемые значения отношения $C II^*/C II$ для насыщенных $Ly\alpha$ систем (те же, что и на рис. 5), в то время как серыми символами показаны верхние и нижние пределы из работ [35, 36]. Красной и голубой областями показаны 68% диапазоны для распределений отношения $C II^*/C II$, рассчитанных для, соответственно, тёплой и холодной нейтральной среды.

излучения в линиях $[C II]$ и $[O I]$ (ключевая роль в охлаждении холодной нейтральной фазы газа). В подразделе 5.7.3 на основе розыгрыша характеристических давлений из рассчитанных фазовых диаграмм нейтрального газа мы оценили диапазоны значений отношения $C II^*/C II$ для тёплой и холодной нейтральной фазы МЗС. На рис. 6 приведено сравнение результатов нашего расчёта с наблюдательными данными. Стоит отметить, что DLA системы с низкими темпами охлаждения согласуются с расчётом $C II^*/C II$ для тёплой нейтральной среды (красная область), а DLA системы с высокими темпами охлаждения — с холодной нейтральной средой (синяя область). Таким образом, мы показали, что бимодальность темпов охлаждения газа в линии $[C II]$ естественным образом объясняется наличием двух фаз нейтральной среды — тёплой и холодной, а не различными режимами звездообразования, как это считалось ранее. В подразделе 5.7.5 обсуждается возможный вклад ионизированной среды в наблюдаемое отношение $C II^*/C II$. Основные результаты, представленные в этой главе, опубликованы в работах [A1], [A2] и [A5]. Раздел 5.8 является заключением к главе 5.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Разработанный статистический метод аппроксимации наблюдаемого распределения абсорбционных систем $Ly\alpha$ леса в пространстве параметров лучевых концентраций и доплеровских уширений (N , b) модельной функцией распределения позволяет надёжно определить нижнюю границу распределения (N , b), необходимую для расчета тепловых параметров МГС и их эволюции.

2. Используя аналитический формализм, в котором минимальное уширение линий МГС определяется как тепловым движением атомов, так и космологическим расширением самих филаментов, оценён характерный размер филаментов МГС на $z \approx 2.4 - 4.3$, который для средней плотности составляет $1 - 1.6$ Мпк.
3. Впервые на основе анализа наблюдательных данных показано, что дополнительный механизм уширения, связанный с наличием пространственной структуры филаментов МГС, значительно влияет на определяемые параметры теплового состояния МГС. Ранее в литературе этот вопрос рассматривался только на основе анализа синтетических данных.
4. При помощи анализа наблюдательных данных поставлены дополнительные ограничения на методы определения теплового состояния МГС, связанные с пространственной неоднородностью протекания процессов реионизации.
5. Кинетическая температура тёплой фазы нейтральной среды в субнасыщенной Ly α системе на красном смещении $z \approx 2.2$ в направлении на квазар HE 0001–2340 для большинства отдельных компонент систематически превышает каноническое значение для тёплой фазы диффузной МЗС. При этом средневзвешенная температура системы, измеренная как по спектру ESPRESSO, так и по спектру UVES, равна $T = 16\,000$ К.
6. Обнаружена антикорреляция между температурой тёплой фазы и полной лучевой концентрацией HI для абсорбционных систем в диапазоне $N(\text{HI}) = 10^{17.4} - 10^{20.8}$ см $^{-2}$. Это может указывать на увеличение средней температуры тёплой фазы нейтрального газа от центра к периферии галактик.
7. Наши результаты по измерению температуры тёплой нейтральной фазы, полученные из анализа спектра более низкого разрешения из архива UVES, согласуются с результатами, полученными по данным ESPRESSO. Более того, измерения температуры по данным UVES имеют меньшие статистические ошибки за счёт более высокого отношения сигнала к шуму данных UVES. Это демонстрирует перспективность использования архивных спектров UVES для систематического измерения температуры тёплой нейтральной фазы околוגалактического газа на больших красных смещениях.
8. Темпы охлаждения газа в линии [C II] $\lambda 158$ мкм, измеряемые в экстремально насыщенных Ly α системах, ассоциированных с газом на малых галактоцентрических расстояниях ($\lesssim 3$ кпк), согласуются с результатами для насыщенных Ly α систем из общей популяции, трассирующих преимущественно околוגалактический газ ($\lesssim 30$ кпк).
9. Бимодальный характер распределения темпов охлаждения газа в линии [C II] $\lambda 158$ мкм для насыщенных Ly α систем отражает бимодальность в пространстве параметров C II*/C II – металличность. При этом отношение C II*/C II растёт с уменьшением металличности.

10. Бимодальность темпов охлаждения газа в линии [C II] $\lambda 158$ мкм для насыщенных Ly α систем объясняется наличием двух фаз нейтрального газа – тёплой и холодной, и не связана с различием в темпах звездообразования в родительских галактиках, как это предполагалось ранее.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В публикациях, где соискатель является первым автором, вклад диссертанта в работу определяющий. Для публикаций, где соискатель не является первым автором, в скобках указан личный вклад диссертанта.

- [A1] Telikova K. N., Balashev S.A., Noterdaeme, P., Krogager, J. -K., Ranjan A., “Extremely strong DLAs at high redshift: gas cooling and H₂ formation”, *MNRAS*, 2022, **510**, 5974
- [A2] Balashev S. A., Telikova K.N., Noterdaeme, P., “CII*/CII ratio in high-redshift DLAs: ISM phase separation drives the observed bimodality of [CII] cooling rates”, *MNRAS*, 2022, **509**, L26 (*Спектроскопический и статистический анализ наблюдательных данных. Участие в обсуждении результатов и подготовке текста публикации.*)
- [A3] Telikova K. N., Shternin P. S., Balashev S. A., “Constraints on the temperature-density relation of the intergalactic medium with non-negligible absorber spatial structure”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, **2103**, id 012028
- [A4] Noterdaeme P., Balashev S., Ledoux C., Duchoquet G., Lopez S., Telikova K., Boisse P., Krogager J.-K., De Cia A., Bergeron J., “Sharpening quasar absorption lines with ESPRESSO. Temperature of warm gas at $z \sim 2$, constraints on the Mg isotopic ratio, and structure of cold gas at $z \sim 0.5$ ”, *A&A*, 2021, **651**, A78 (*Спектральный анализ суб-DLA системы на $z \sim 2$, включая оценку температуры газа. Независимый статистический анализ полученных результатов и сравнение с данными из литературы. Участие в обсуждении работы и подготовке текста публикации.*)
- [A5] Telikova K. N., Balashev S. A., Noterdaeme P., Krogager J.-K., Ranjan A., “Extremely strong damped Ly α systems at high redshifts”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, **1697**, id 012034
- [A6] Telikova K. N., Shternin P. S., Balashev S. A., “Thermal state of the intergalactic medium at $z \sim 2 - 4$ ”, *ApJ*, 2019, **887**, id 205
- [A7] Telikova K. N., Balashev S. A., Shternin P. S., “Estimation of the temperature-density relation in the intergalactic medium at $z \sim 2 - 4$ via Ly α forest”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, **1135**, id 012010
- [A8] Telikova K. N., Balashev S. A., Shternin P. S., “Equation of state of the intergalactic medium in the early Universe”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, **1038**, id 012015
- [A9] Balashev S. A., Zavarygin E. O., Ivanchik A. V., Telikova K. N., Varshalovich D. A., “The primordial deuterium abundance: sub-DLA system at $z_{abs} = 2.437$ towards the QSO J1444+2919”, *MNRAS*, 2016, **458**, 2188 (*Редукция*

и первичная обработка наблюдательных данных исследуемого спектра квазара. Участие в обсуждении результатов работы.)

Литература, цитируемая в автореферате

1. Robertson B. E., Ellis R. S., Furlanetto S. R., Dunlop J. S. Cosmic Reionization and Early Star-forming Galaxies: A Joint Analysis of New Constraints from Planck and the Hubble Space Telescope // *Astroph. J. Lett.* — 2015. — Vol. 802. — P. L19.
2. Fan Xiaohui, Carilli C. L., Keating B. Observational Constraints on Cosmic Reionization // *Ann. Rev. Astron. Astroph.* — 2006. — Vol. 44. — P. 415–462.
3. Jakobsen P., Boksenberg A., Deharveng J. M. et al. Detection of intergalactic ionized helium absorption in a high-redshift quasar // *Nature*. — 1994. — Vol. 370. — P. 35–39.
4. Anderson Scott F., Hogan Craig J., Williams Benjamin F., Carswell Robert F. Mapping Low-Density Intergalactic Gas: A Third Helium Ly α Forest // *Astron. J.* — 1999. — Vol. 117. — P. 56–62.
5. Shull J. Michael, Tumlinson Jason, Giroux Mark L. et al. The Fluctuating Intergalactic Radiation Field at Redshifts $z = 2.3$ - 2.9 from He II and H I Absorption toward HE 2347-4342 // *Astroph. J.* — 2004. — Vol. 600. — P. 570–579.
6. Péroux Céline, Howk J. Christopher. The Cosmic Baryon and Metal Cycles // *Ann. Rev. Astron. Astroph.* — 2020. — Vol. 58. — P. 363–406.
7. Naab Thorsten, Ostriker Jeremiah P. Theoretical Challenges in Galaxy Formation // *Ann. Rev. Astron. Astroph.* — 2017. — Vol. 55. — P. 59–109.
8. Wolfe Arthur M., Gawiser Eric, Prochaska Jason X. Damped Ly α Systems // *Ann. Rev. Astron. Astroph.* — 2005. — Vol. 43. — P. 861–918.
9. Tumlinson Jason, Peebles Molly S., Werk Jessica K. The Circumgalactic Medium // *Ann. Rev. Astron. Astroph.* — 2017. — Vol. 55. — P. 389–432.
10. Levshakov S. A., Varshalovich D. A. Molecular hydrogen in the $z=2.811$ absorbing material toward the quasar PKS 0528-250. // *MNRAS*. — 1985. — Vol. 212. — P. 517–521.
11. Varshalovich D. A., Ivanchik A. V., Petitjean P. et al. HD Molecular Lines in an Absorption System at Redshift $z=2.3377$ // *Astronomy Letters*. — 2001. — Vol. 27. — P. 683–685.
12. Srianand R., Noterdaeme P., Ledoux C., Petitjean P. First detection of CO in a high-redshift damped Lyman- α system // *Astron. Astroph.* — 2008. — Vol. 482. — P. L39–L42.
13. Pepe F., Cristiani S., Rebolo R. et al. ESPRESSO at VLT. On-sky performance and first results // *Astron. Astroph.* — 2021. — Vol. 645. — P. A96.
14. Vernet J., Dekker H., D’Odorico S. et al. X-shooter, the new wide band intermediate resolution spectrograph at the ESO Very Large Telescope // *Astron. Astroph.* — 2011. — Vol. 536. — P. A105.
15. Hui L., Gnedin N. Y., Zhang Y. The Statistics of Density Peaks and the Column Density Distribution of the Ly α Forest // *Astroph. J.* — 1997. — Vol. 486. — P. 599–622.
16. Schaye J., Theuns T., Leonard A., Efstathiou G. Measuring the equation of state of the intergalactic medium // *MNRAS*. — 1999. — Vol. 310. — P. 57–70.
17. O’Meara J. M., Lehner N., Howk J. C. et al. The Second Data Release of the KODIAQ Survey // *Astron. J.* — 2017. — Vol. 154. — P. 114.
18. Vogt S. S., Allen S. L., Bigelow B. C. et al. HIRES: the high-resolution echelle spectrometer on the Keck 10-m Telescope // *Instrumentation in Astronomy VIII* / Ed. by David L. Crawford, Eric R. Craine. — Vol. 2198 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 1994. — P. 362.

19. Garzilli A., Theuns T., Schaye J. The broadening of Lyman- α forest absorption lines // MNRAS. — 2015. — Vol. 450. — P. 1465–76.
20. Schaye J. Model-independent Insights into the Nature of the Ly α Forest and the Distribution of Matter in the Universe // *Astroph. J.* — 2001. — Vol. 559. — P. 507–15.
21. Murphy Michael T., Kacprzak Glenn G., Savorgnan Giulia A. D., Carswell Robert F. The UVES Spectral Quasar Absorption Database (SQUAD) data release 1: the first 10 million seconds // MNRAS. — 2019. — Vol. 482. — P. 3458–3479.
22. Dekker Hans, D’Odorico Sandro, Kaufer Andreas et al. Design, construction, and performance of UVES, the echelle spectrograph for the UT2 Kueyen Telescope at the ESO Paranal Observatory // *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors* / Ed. by Masanori Iye, Alan F. Moorwood. — Vol. 4008 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2000. — P. 534–545.
23. Upton Sanderbeck P. R., D’Aloisio A., McQuinn M. J. Models of the thermal evolution of the intergalactic medium after reionization // MNRAS. — 2016. — Vol. 460. — P. 1885–1897.
24. Schaye J., Theuns T., Rauch M. et al. The thermal history of the intergalactic medium // MNRAS. — 2000. — Vol. 318. — P. 817–26.
25. Bolton J. S., Becker G. D., Haehnelt M. G., Viel M. A consistent determination of the temperature of the intergalactic medium at redshift $z = 2.4$ // MNRAS. — 2014. — Vol. 438. — P. 2499–507.
26. Hiss Hector, Walther Michael, Hennawi Joseph F. et al. A New Measurement of the Temperature-density Relation of the IGM from Voigt Profile Fitting // *Astroph. J.* — 2018. — Sep. — Vol. 865. — P. 42.
27. Rorai A., Carswell R. F., Haehnelt M. G. et al. A new measurement of the intergalactic temperature at $z \sim 2.55 - 2.95$ // MNRAS. — 2018. — Vol. 474. — P. 2871–83.
28. Telikova K. N., Balashev S. A., Shternin P. S. Equation of state of the intergalactic medium in the early Universe // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2018. — Jun. — Vol. 1038. — P. 012015.
29. Lidz A., Faucher-Giguère C.-A., Dall’Aglio A. et al. A Measurement of Small-scale Structure in the $2.2 \leq z \leq 4.2$ Ly α Forest // *Astroph. J.* — 2010. — Vol. 718. — P. 199–230.
30. Faucher-Giguère C.-A., Lidz A., Hernquist L., Zaldarriaga M. Evolution of the Intergalactic Opacity: Implications for the Ionizing Background, Cosmic Star Formation, and Quasar Activity // *Astroph. J.* — 2008. — Vol. 688. — P. 85–107.
31. Becker G. D., Bolton J. S. New measurements of the ionizing ultraviolet background over $2 < z < 5$ and implications for hydrogen reionization // MNRAS. — 2013. — Vol. 436. — P. 1023–1039.
32. Khaire Vikram, Srianand Raghunathan. New synthesis models of consistent extragalactic background light over cosmic time // MNRAS. — 2019. — Apr. — Vol. 484. — P. 4174–99.
33. Upton Sanderbeck Phoebe, Bird Simeon. Inhomogeneous He II reionization in hydrodynamic simulations // MNRAS. — 2020. — Vol. 496. — P. 4372–4382.
34. Wolfire M. G., Hollenbach D., McKee C. F. et al. The Neutral Atomic Phases of the Interstellar Medium // *Astroph. J.* — 1995. — Vol. 443. — P. 152.
35. Wolfe Arthur M., Prochaska Jason X., Jorgenson Regina A., Rafelski Marc. Bimodality in Damped Ly α Systems // *Astroph. J.* — 2008. — Vol. 681. — P. 881–896.
36. Dutta R., Srianand R., Rahmani H. et al. A study of low-metallicity DLAs at high redshift and C II* as a probe of their physical conditions // MNRAS. — 2014. — Vol. 440. — P. 307–326.