

На правах рукописи

КЛИМЕНКО ВЯЧЕСЛАВ ВИТАЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
В ОБЛАКАХ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА
С БОЛЬШИМИ КРАСНЫМИ СМЕЩЕНИЯМИ**

Специальность: 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена на кафедре “Космические исследования” института физики нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
акад. ВАРШАЛОВИЧ Дмитрий Александрович
зав. кафедры “Космические исследования”
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ДУБРОВИЧ Виктор Константинович
зав. лаб. галактических и внегалактических
исследований Санкт-Петербургского
филиала САО РАН

доктор физико-математических наук,
ЛАРИОНОВ Валерий Михайлович
проф. кафедры астрофизики
Санкт-Петербургского государственного
университета

Ведущая организация: Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория РАН

Защита диссертации состоится “___” ___ 2016 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу:
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая ул., д. 26.

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

Автореферат разослан “___” ___ 2016 года.

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

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Межзвездная среда (МС) заполняет пространство между звездами и содержит значительно количество массы вещества в галактиках. Структура МС состоит из нескольких фаз: это горячая ионизованная среда с $T \sim 10^6$ К, горячая нейтральная среда с $T \sim 10^4$ К, холодная нейтральная среда с $T \lesssim 100$ К. Также значительная часть газа содержится в диффузных, полупрозрачных и плотных молекулярных облаках. Известно, что фазы МС взаимодействуют друг с другом, а объемное и массовое отношение этих фаз определяет структуру и эволюцию галактик.

Физические условия в МС зависят от ряда параметров: это интенсивность фона ультрафиолетового излучения, интенсивность фона космических лучей, относительное содержание тяжелых элементов в среде (Be, Li, C, N, O, Fe и др.), содержание межзвездной пыли, частота взрывов сверхновых и др. [1, 2]. Значения этих параметров определяются, главным образом, тем, как происходит процесс звездообразования в галактиках. Наблюдения показывают, что в ходе развития Вселенной темп звездообразования менялся и достигал максимального значения при $z \sim 2$ [3]. Известно, что звезды образуются в ядрах плотных молекулярных облаков (с $T \sim 10 - 20$ К), где достигается условие гравитационного коллапса [4]. Исследование МС на больших красных смещениях и, в частности, определение физических условий в диффузных молекулярных облаках в галактиках важно для понимания того, как происходило формирование звезд в ранней Вселенной.

Один из методов анализа различных фаз МС в галактиках с большими красными смещениями – это спектральный анализ УФ линий поглощения атомов, ионов и молекул. Такие линии, ассоциированные с облаками, находящимися на больших красных смещениях $z > 1.7$ попадают в оптический диапазон спектров квазаров и послесвечения гамма-всплесков. Метод имеет ряд преимуществ за счет высокого спектрального разрешения ($R = \lambda/\Delta\lambda \approx 50\,000 - 100\,000$ или $\delta v \approx 3 - 6$ км/с), которое достигается в наблюдениях на крупнейших современных оптических телескопах Very Large Telescope и Keck. Это позволяет в деталях исследовать скоростную структуру, ионизационную структуру и физические условия в компонентах абсорбционных систем. Этот метод существенно отличается от метода исследования галактик с большими красными смещениями с помощью анализа эмиссионных линий CO, C II и др., с помощью которого можно определять интегральные характеристики системы в целом. Абсорбционные системы с лучевой концентрацией $N_{\text{HI}} > 2 \times 10^{20}$ см⁻² называются демпфированными Лайман-альфа системами атомарного водорода (DLAs, [5]). Считается, что DLA системы представляют собой попавшие на луч зрения диски или гало галактик с радиусом несколько десятков тысяч свет. лет [6]. Одним из подтверждений, что вещество в DLA системах относится к МС, является детектирование ассоциированных линий поглощения молекул [7]. Анализ большинства DLA систем позволяет изучать горячую нейтральную фазу МС [8]. Холодная и плотная фаза может быть изучена с помощью анализа абсорбционных линий молекул H₂, HD, CO и атомов C I [9].

Цель исследования заключается в изучении физических условий и химического состава вещества в холодной фазе нейтральной межзвездной

среды в галактиках с большими красными смещениями. В работе решаются следующие задачи:

1. Поиск абсорбционных систем молекулярного водорода с большими красными смещениями $z = 2 - 5$ в спектрах квазаров обзора Sloan Digital Sky Survey (SDSS).
2. Спектроскопический анализ абсорбционных систем молекулярного водорода в спектрах квазаров, полученных с высоким разрешением на крупнейших оптических телескопах VLT и Keck. Определение лучевых концентраций и распространенностей элементов в абсорбционных системах молекулярного водорода с большими красными смещениями.
3. Определение физических условий в абсорбционных системах молекулярного водорода с большими красными смещениями. Моделирование структуры облаков молекулярного водорода.

Научная новизна

1. Разработан метод поиска абсорбционных систем молекулярного водорода с большими красными смещениями $z = 2-5$ в спектрах квазаров обзора SDSS.
2. Впервые выполнено детектирование неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком молекулярного водорода с большим красным смещением.
3. Идентифицирована абсорбционная система H_2 с $z = 3.09$ в спектре квазара J 2100–0641 и ассоциированные с этой системой линии поглощения молекул HD.
4. Определены физические условия в абсорбционной системе H_2 с $z = 2.06$ в спектре квазара J 2123–0050.
5. Выполнен систематический поиск абсорбционных линий нейтрального хлора (Cl I), ассоциированных с абсорбционными системами H_2 с большими красными смещениями. Показано, что отношение Cl I/ H_2 в системах с большими красными смещениями такое же, что и в диффузных атомарных облаках Галактики

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов обеспечена использованием современных методов обработки и анализа оптических спектров квазаров. Часть результатов получена с помощью широко признанных в международном научном сообществе пакетов программ других авторов – для расчета равновесных фотоионизационных моделей структуры облаков молекулярного водорода использованы пакеты программ CLOUDY [10] и Meudon PDR [11]. Также, где это возможно, результаты анализа спектров квазаров сравнены с результатами известных работ, а результаты численных расчётов сопоставлялись с аналитическими приближениями и предельными случаями.

Научная и практическая значимость работы

В диссертации представлен новый метод поиска абсорбционных систем молекулярного водорода с большими красными смещениями в спектрах квазаров обзора SDSS. Предложенный метод является эффективной заменой слепого метода поиска абсорбционных систем H_2 в спектрах квазаров высокого разрешения. Это позволит значительно сократить ценное наблюдательное время крупнейших телескопов для поиска таких систем. Метод

был применен к каталогам спектров квазаров SDSS-II Data Release 7 (DR 7) и SDSS-III DR 9, и были отобраны 23 кандидата в абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями. В случае подтверждения присутствия абсорбционных систем H_2 в спектрах кандидатов, число известных абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями увеличится почти в два раза.

Полученные независимые оценки относительной распространенности молекул HD в абсорбционных системах H_2 с большими красными смещениями в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 2123–0050 и J 2100–0641 важны для понимания эволюции химического состава вещества и физических условий в галактиках, существовавших в ранней Вселенной.

Показано, что в облаках молекулярного водорода с большими красными смещениями детектируется линейная зависимость между содержанием нейтрального хлора и молекулярного водорода. Абсорбционные линии Cl I можно использовать для определения скоростной структуры абсорбционной системы H_2 .

Основные положения выносимые на защиту:

1. Разработка метода поиска абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями в спектрах квазаров обзора SDSS. Обнаружение 23 кандидатов в абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями.
2. Независимый детальный анализ абсорбционной системы с $z = 2.81$ в спектре квазара Q 0528–2508. Обнаружение остаточного потока в центре насыщенных линий H_2 , образовавшегося в результате неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком молекулярного водорода. Определение распространенности молекул HD и H_2 в этой системе, с учетом коррекции спектра на фактор неполного покрытия.
3. Идентификация абсорбционных линий молекул H_2 и HD с красным смещением $z = 3.09$ в спектре квазара J 2100–0641.
4. Детальный анализ абсорбционной системы H_2 с $z = 2.06$ в спектре квазара J 2123–0050. Определение скоростной структуры системы, распространенностей молекул HD, H_2 , атомов Cl I и физических условий в компонентах системы. Построение модели структуры абсорбционной системы H_2 .
5. Идентификация линий поглощения нейтрального хлора, ассоциированных с системами молекулярного водорода с большими красными смещениями, в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 0643–5041, Q 1331+170, J 2123–0050, J 2140–0053. Обнаружение линейной зависимости между лучевыми концентрациями H_2 и Cl I. Установление универсальности отношения Cl I/ H_2 в облаках H_2 с большими красными смещениями и в диффузных атомарных облаках Галактики.

Апробация работы

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе, четырех международных и семи всероссийских конференциях и совещаниях: “Workshop on Precision Physics and Fundamental Physical Constants - FFK2013” (Пулково, 2013), “Zeldovich 100 Cosmology and Relativistic

Astrophysics” (Москва, 2014), “The role of hydrogen in the evolution of galaxies” (Кучинг, Малайзия, 2014), “International Youth Conference PhysicA.SPb/2014” (Санкт-Петербург, 2014), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2011” НЕА 2011 (Москва, 2011), НЕА 2012 (Москва, 2012), НЕА 2013 (Москва, 2013), НЕА 2014 (Москва, 2014), “V Пулковская молодежная астрономическая конференция” (Пулково, 2014), XXXII конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (Пушино, 2015), НЕА 2015 (Москва, 2015).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 7 печатных работах в изданиях, входящих в перечень ВАК. Список работ представлен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 188 страниц текста, включая 47 рисунков и 19 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 204 наименования.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена методу поиска абсорбционных систем молекулярного водорода с большими красными смещениями $z = 2-5$ в спектрах квазаров обзора SDSS. Содержание этой главы опубликовано в работе [A1].

В параграфе 1.1 представлен обзор исследований абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями. Указаны основные задачи наблюдения облаков H_2 в ранней Вселенной. На сегодняшний день известны 32 абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями $z > 1.7$ [12, 13]. Для идентификации абсорбционной системы H_2 необходимо высокое качество спектра квазара (спектральное разрешение $R = \lambda/\Delta\lambda > 10\,000$ и отношение сигнала к шуму $S/N > 10$). На данный момент получение таких спектров является предельной задачей даже для крупнейших оптических телескопов – VLT, Кеок. Большинство абсорбционных систем H_2 были обнаружены случайным образом в исследованиях демпфированных Лайман- α (DLA) систем – систем атомарного водорода с высокой лучевой концентрацией $\log N(HI) > 20.3$ (здесь и далее лучевые концентрации в единицах см^{-2}). При этом оказалось, что вероятность идентификации абсорбционной системы H_2 слепым методом в спектрах квазаров, содержащих DLA системы, не превышает 10% [14].

В параграфе 1.2 представлено описание спектров квазаров обзора SDSS, которые были использованы в анализе. Основными сложностями для идентификации систем H_2 является низкое качество спектров SDSS (спектральное разрешение $R \approx 2000$ и отношение сигнала к шуму, в среднем, $S/N \approx 5$) и присутствие многочисленных абсорбционных линий Лайман- α леса (линий лаймановского перехода атома водорода, сдвинутых на фактор красного смещения; системы Лайман- α леса ассоциируются с межгалактическим

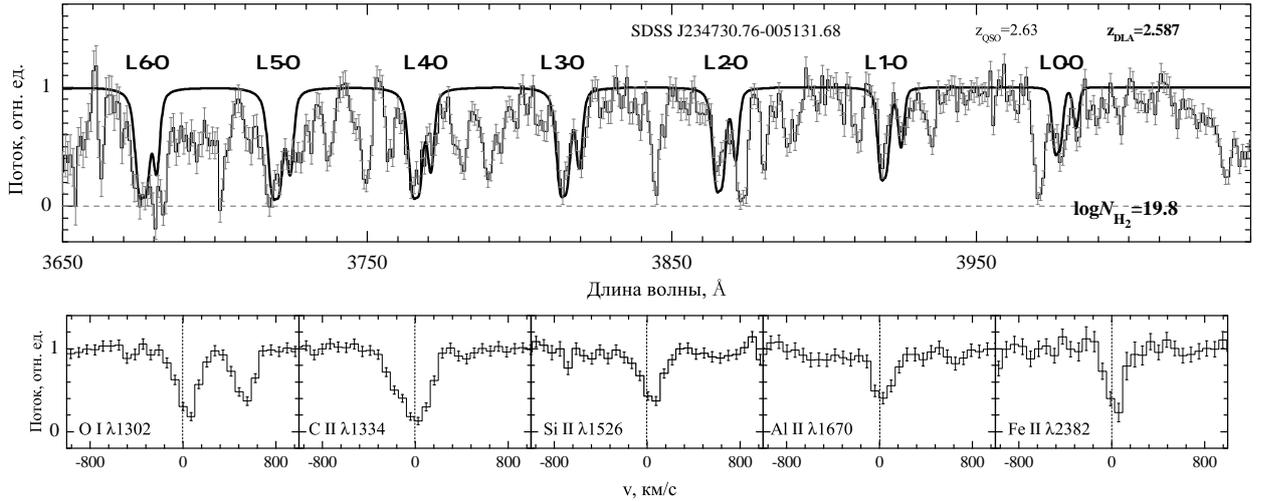


Рис. 1: Спектр квазара SDSS J 234730.76–005131.68. На верхней панели показан участок спектра квазара, содержащий абсорбционные линии системы H_2 с красным смещением $z_{\text{abs}} = 2.587$. Жирной линией показан синтетический профиль абсорбционной системы H_2 (после свертки с аппаратной функцией спектрографа SDSS). На нижних панелях показаны профили линий тяжелых элементов (O I, C II, Si II, Al II, Fe II), ассоциированных с системой H_2 . По оси абсцисс показана относительная скорость абсорбционных линий тяжелых элементов и абсорбционной системы H_2 .

облаками почти полностью ионизованного водорода, попавшими на луч зрения между квазаром и наблюдателем).

Процедура поиска абсорбционных систем H_2 в спектрах SDSS описана в параграфе 1.3. С ее помощью выполнено построение континуума квазаров и идентификация абсорбционных систем H_2 . Это позволило отобрать спектры, в которых прописываются линии H_2 (потенциальные кандидаты) и отделить спектры, в которых абсорбционные системы H_2 отсутствуют. Из-за большого количества спектров, используемых в анализе ($\approx 13\,000$), процедура поиска абсорбционных систем H_2 была полностью автоматизирована.

В параграфе 1.4 выполнена оценка надежности кандидатов с помощью двух методов: “моделирование Монте-Карло” и “сравнение с контрольной выборкой спектров”. Второй метод позволил определить значения параметров спектров квазаров (S/N, красное смещение квазара, красное смещение DLA системы), для которых идентификация абсорбционных систем H_2 становится надежной. В разделе 1.4.3 получено верхнее ограничение вероятности идентификации системы H_2 ($\log N_{H_2} > 19$) в спектрах квазаров, содержащих DLA системы, составляющее около 7%.

Метод был применен к каталогам спектров квазаров SDSS-II Data Release 7 и SDSS-III Data Release 9; список 23 наиболее надежных кандидатов в абсорбционных системы H_2 приведен в параграфе 1.5. Эти кандидаты в дальнейшем следует исследовать как объекты спектроскопии высокого разрешения на крупнейших оптических телескопах (таких как VLT и Keck). Для примера, на рис. 1 показан спектр кандидата J 234730.76–005131.68. Спектр имеет относительно высокое отношение S/N и очень низкое значение вероятности ложной идентификации абсорбционной системы

H_2 , т.е. такая система H_2 надежно детектируется.

В параграфе 1.6 описаны наблюдения кандидатов в абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями на телескопе VLT с использованием спектрографов высокого разрешения UVES ($R \approx 50\,000$) и среднего разрешения X-Shooter ($R \approx 4000 - 10\,000$). Среди 23 кандидатов было отобрано 8, наиболее подходящих для наблюдений в 92 и 94 наблюдательных циклах. Для всех восьми кандидатов абсорбционные системы H_2 были подтверждены.

Вторая глава посвящена анализу наблюдений абсорбционных систем H_2 с большими красными смещениями ($z \sim 2 - 3$), содержащих молекулы HD. Приведены результаты анализа трех абсорбционных систем H_2/HD в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 2123–0050 и J 2100–0641 [A2, A4, A6, A7].

В параграфе 2.1 описаны основные задачи определения относительной распространенности молекул HD в облаках молекулярного водорода с большими красными смещениями ($N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$): (i) определение распространенности изотопов (D/H) в ранней Вселенной с целью оценки плотности барионной материи во Вселенной; (ii) изучение физических условий в облаках молекулярного водорода.

В параграфе 2.2 представлен независимый анализ абсорбционной системы H_2 с красным смещением $z_{\text{abs}} = 2.81$ в спектре квазара Q 0528–2508 [A4]. Она является первой системой, в которой были идентифицированы линии молекул H_2 с большим красным смещением [7]. Для получения спектра были использованы все доступные экспозиции квазара, полученные на телескопе VLT. Суммарное время экспозиции составило более 30 часов наблюдений, что позволило получить спектр высокого качества с разрешением $R \sim 45\,000$ и отношением сигнала к шуму $S/N \approx 60$ для участка спектра, содержащего абсорбционные линии H_2 . В разделе 2.2.2 представлено краткое описание нескольких результатов анализа абсорбционной системы H_2 , выполненного независимыми группами [7, 15, 16]. Полученные результаты сильно варьируются в зависимости от качества используемого спектра и модели абсорбционной системы (оценка полной лучевой концентрации H_2 меняется в пределах двух порядков величины, от $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$). Благодаря высокому качеству спектра, использованного нами в анализе этой системы, была выявлена важная особенность: обнаружено, что часть излучения квазара от области формирования континуального излучения проходит мимо абсорбционной системы. Этот эффект подробно рассмотрен в главе 3. Учет этой особенности оказался важен в анализе абсорбционной системы H_2 . Показано, что с учетом этого эффекта, абсорбционная система H_2 может быть описана двухкомпонентной моделью с высокими лучевыми концентрациями. Полная лучевая концентрация H_2 почти на два порядка превышает значение, полученное в работе [16], где авторы использовали трехкомпонентную модель. Линии молекул HD идентифицированы только в одной из компонент абсорбционной системы H_2 . Для этой компоненты измерена лучевая концентрация молекул HD и отношение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ [A4].

В параграфе 2.3 представлен независимый детальный анализ абсорбционной системы H_2 с красным смещением $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре квазара J 2123–0050 [A6, A7]. Этот квазар независимо наблюдался на двух крупнейших оптических телескопах Кеск (с использованием спектрографа

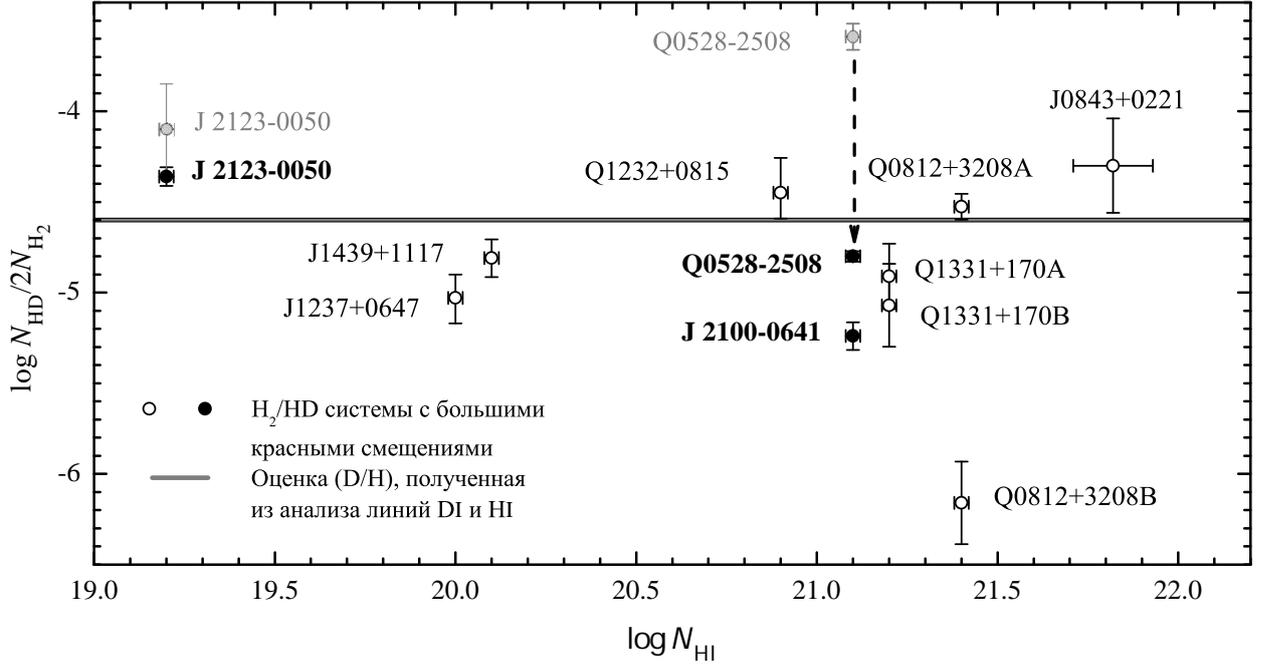


Рис. 2: Измерения относительной распространенности молекул HD ($N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$) в абсорбционных системах H_2 с большими красными смещениями в зависимости от лучевой концентрации систем атомарного водорода N_{HI} , ассоциированных с системами H_2 . Черными кружками показаны результаты анализа абсорбционных систем H_2/HD , представленные в этой работе. Горизонтальной серой полосой показана оценка распространенности дейтерия (D/H) на больших красных смещениях, полученная из анализа атомарных линий HI и DI [19].

высокого разрешения HIRES, $R \approx 110\,000$) и VLT (с использованием спектрографа UVES, $R \approx 50\,000$). Анализ абсорбционной системы H_2 в спектре, полученном на телескопе Кекс, дает противоречивые результаты [17, 18]. В данной работе выполнен независимый анализ абсорбционной системы H_2 в спектре J 2123–0050, полученном на телескопе VLT. Для участка спектра, содержащего линии H_2 , отношение сигнала к шуму в этом спектре ($S/N \sim 30$) в 2–3 раза выше, чем в спектре, полученном на телескопе Кекс. Это позволило с более высокой точностью оценить лучевые концентрации молекул H_2 и HD. Определено, что относительное содержание молекул HD ($N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$) в одной из компонент системы в ≈ 1.5 раза превышает (на уровне значимости 3σ) отношение изотопов (D/H) для систем с большими красными смещениями [19]. В других известных абсорбционных системах H_2/HD с большими красными смещениями отношение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ не превышает отношения (D/H) в пределах ошибок измерений, см. рис. 2.

В параграфе 2.4 представлен анализ линий молекул H_2 и HD с красным смещением $z_{\text{abs}} = 3.092$ в спектре квазара J 2100–0641 [A2, A3]. Спектр был получен на телескопе Кекс с использованием спектрографа HIRES. Ранее в этом спектре были идентифицированы линии поглощения нейтрального углерода C I с $z_{\text{abs}} = 3.09$ [9]. Известно, что абсорбционные системы с высоким содержанием C I являются хорошими кандидатами в абсорбционные

системы H_2 [15]. В настоящей работе выполнена идентификация линий H_2 и HD, ассоциированных с абсорбционной системой C I, и определены лучевые концентрации молекул H_2 и HD и отношение $N_{HD}/2N_{H_2}$.

В параграфе 2.5 приведена статистика измерений отношения $(N_{HD}/2N_{H_2})$ в абсорбционных системах H_2/HD с большими красными смещениями.

Третья глава диссертации посвящена исследованию эффекта неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком H_2 , находящимся на большом красном смещении. Представлено три новых случая детектирования этого эффекта в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 2123–0050, J 2100–0641 [A4, A5, A6, A7].

В параграфе 3.1 изложено описание эффекта неполного покрытия. Неполное покрытие означает, что часть излучения от квазара проходит мимо абсорбционной системы и образует остаточный поток (ОП) в спектре квазара в абсорбционных линиях исследуемой системы. Величина ОП по отношению к полному потоку излучения квазара количественно выражается фактором покрытия $0 \leq f_c \leq 1$. Описаны существующие наблюдения эффекта неполного покрытия квазаров абсорбционными системами с большими красными смещениями. На настоящий момент эффект неполного покрытия области формирования излучения квазаров абсорбционными системами H_2 с большим красным смещением обнаружен для пяти квазаров, (включая три идентификации эффекта, представленные в диссертации) [A5].

В спектре квазара Q 0528–2508 впервые обнаружен эффект неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком H_2 с большим красным смещением $z_{abs} = 2.811$ [A4]. В параграфе 3.2 представлен анализ этого эффекта. Показано, что в центре насыщенных абсорбционных линий H_2 (на уровне значимости $4 - 5 \sigma$) детектируется ОП величиной $\approx 2\%$ от полного потока излучения квазара. Величина ОП не зависит от положения абсорбционных линий H_2 в спектре. В разделе 3.2.2 рассмотрены возможные причины возникновения ОП центре насыщенных линий H_2 . В частности, ОП может возникнуть, если абсорбционная система состоит из нескольких ненасыщенных компонент с близкими красными смещениями, так что отдельные компоненты не различаются в профилях линий. Такая модель была использована в анализе этой абсорбционной системы H_2 другими авторами в работе [16]. В разделе 3.2.3 описан тест, который показал, что такая модель скорее всего неверна. В разделе 3.2.6 предложено три интерпретации эффекта неполного покрытия: (1) квазар имеет многокомпонентную структуру, и не все источники излучения покрыты системой H_2 ; (2) рассеяние излучения квазара на пыли в DLA системе, содержащей абсорбционную систему H_2 и (3) дополнительный источник континуального излучения квазара, образовавшийся в результате взаимодействия джета квазара с удаленным облаком родительской галактики.

В параграфе 3.3 представлен анализ эффекта неполного покрытия области формирования широких эмиссионных линий квазара J 2123–0050 облаком H_2 с $z_{abs} = 2.059$ [A6, A7]. В абсорбционных линиях H_2 лаймановских полос L0-0 и L1-0, попавших в участок спектра, содержащий эмиссионные линии квазара $Ly\beta$ и O VI, обнаружен ОП $\approx 3\%$ от полного потока. Для других абсорбционных линий H_2 , находящихся в участках спектра, не со-

держащих эмиссионных линий квазара, ОП не обнаружен. Скорее всего, облако молекулярного водорода полностью покрывает область формирования континуального излучения квазара, и только частично покрывает область формирования широких эмиссионных линий. Из-за низких значений силы осцилляторов переходов H_2 лаймановских полос L0-0 и L1-0 и невысокой лучевой концентрации H_2 учет этого эффекта почти не влияет на определяемые параметры абсорбционной системы.

В параграфе 3.4 представлен анализ эффекта неполного покрытия области формирования широких эмиссионных линий квазара J 2100–0641 абсорбционной системой H_2 с $z_{\text{abs}} = 3.092$. В абсорбционных линиях H_2 лаймановских полос L5-0 и L6-0, попавших в участок спектра, содержащий эмиссионные линии квазара $Ly\beta$ и O VI, детектируется ОП $\sim 10\%$ от полного потока. Вследствие большого числа линий H_2 , доступных для анализа, учет эффекта почти не влияет на определяемые параметры системы.

В **Четвертой главе** диссертации выполнен анализ физических условий в холодной фазе межзвездной среды в суб-DLA системе с $z_{\text{abs}} = 2.059$ в спектре квазара J 2123–0050 [A7].

В параграфе 4.1 показано, что по сравнению с DLA системами с большими красными смещениями, содержащими абсорбционные системы H_2 , исследуемая система обладает высоким содержанием молекул H_2 , HD и атомов C I при наименьшей лучевой концентрации атомов H I, равной $\log N_{\text{HI}} = 19.18 \pm 0.15$. Средняя степень молекуляризации газа в этой системе $f_{H_2} = 2N_{H_2}/(2N_{H_2} + N_{HI}) \approx 0.1$, что на 2–3 порядка выше, чем типичные значения степени молекуляризации в диффузных атомарных облаках с тем же значением N_{HI} в нашей Галактике и Магеллановых Облаках (см. рис. 3). Относительное содержание молекул HD в этой системе – наибольшее среди известных H_2 /HD систем с большими красными смещениями, и в 1.5 раза превышает оценку отношения изотопов (D/H) на больших красных смещениях из анализа линий H I и D I (см. рис. 2).

В параграфе 4.2 изложены основные методы определения физических условий в абсорбционных системах H_2 (анализ относительной населенности вращательных уровней молекул H_2 и HD, уровней тонкой структуры атомов C I).

В параграфе 4.3 выполнен анализ физических условий в рамках модели однородного облака. Показано, что система H_2 состоит из двух компонент (A и B) с полными лучевыми концентрациями $\log N_{H_2}^A = 17.94 \pm 0.01$ и $\log N_{H_2}^B = 15.16 \pm 0.02$. В компоненте B среда оптически-тонкая в линиях H_2 . В этом случае населенности вращательных уровней H_2 определяются преимущественно процессом радиативной накачки, что позволило измерить интенсивность фонового УФ излучения для компоненты B, которая оказалась примерно в 8 раз выше среднего значения в Галактике. В компоненте A лучевая концентрация H_2 высокая, молекулы в центре облака экранированы от внешнего УФ излучения, а отношение количества орто- и пара-водорода в облаке определяется кинетической температурой газа, равной $T = 139 \pm 6$ К. Температура возбуждения верхних уровней H_2 J=3 и J=5 ($T_{35} \approx 336$ К) в 2.5 раза выше кинетической температуры газа, что указывает на существенный вклад радиативной накачки в заселение верхних уровней H_2 . С помощью анализа относительной населенности уровней тонкой структуры атомов C I в компоненте A определена объемная концен-

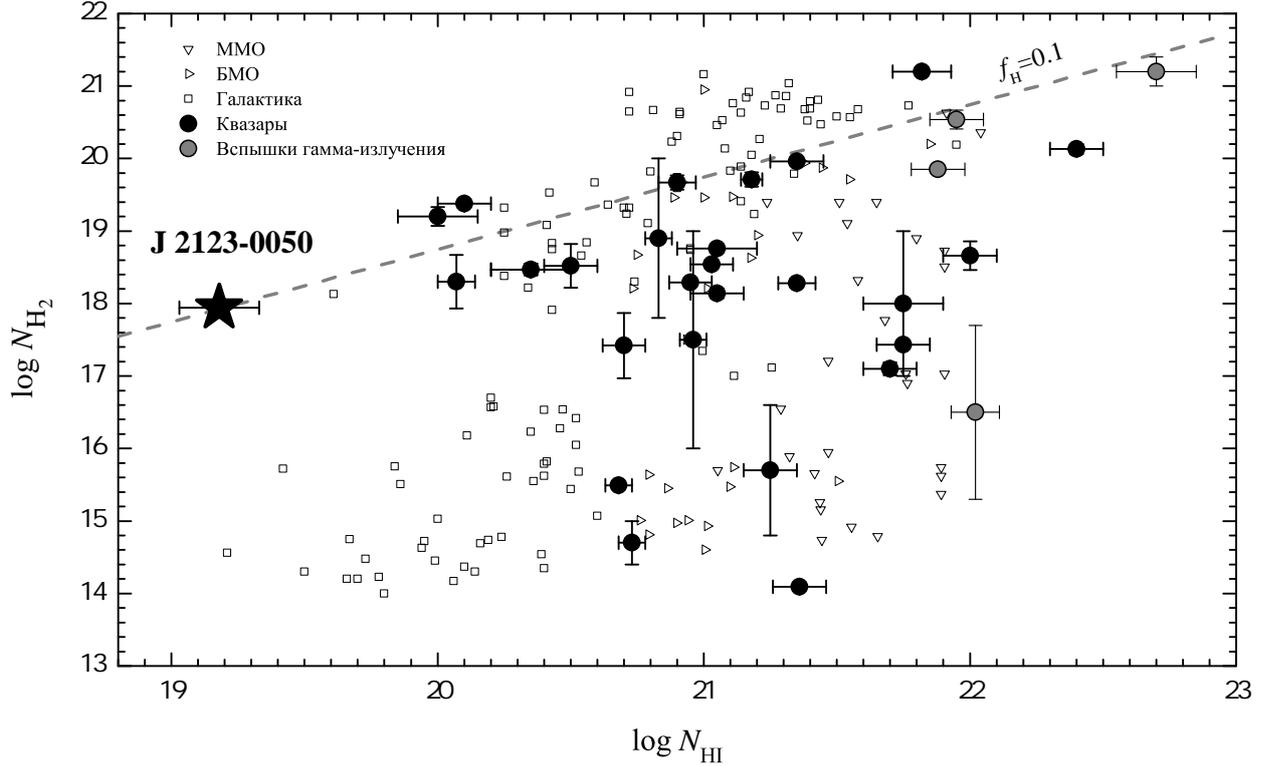


Рис. 3: Результаты измерений полной лучевой концентрации H_2 и HI для абсорбционных систем с большими красными смещениями в спектрах квазаров (черные кружки, [12]), спектрах послесвечения гамма-всплесков (серые кружки [13]). Для облаков в Галактике и Магеллановых облаках (открытые квадратики – Галактика [25], открытые треугольники – Большое и Малое Магелланово Облака [26]). Исследуемая система (показана черной звездочкой) имеет самое низкое значение лучевой концентрации HI ($\log N_{\text{HI}} = 19.18 \pm 0.15$) среди систем с большими красными смещениями с $\log N_{\text{H}_2} \sim 18$.

трация газа ($n = 22 \pm 7 \text{ см}^{-3}$). Основной механизм образования молекул H_2 в межзвездной среде – это образование H_2 на частицах межзвездной пыли (см., например, [20]). В условиях стационарного баланса в облаке содержание молекул H_2 определяется отношением коэффициента темпа образования молекул H_2 на пыли (R_{H_2}) и интенсивности УФ излучения. Показано, что для компоненты А коэффициент темпа образования молекул H_2 в 40 раз превышает среднее значение R_{H_2} в диффузных атомарных облаках Галактики ($R_{\text{H}_2}^{\text{G}} = 3 \div 4 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [21]), если фон внешнего УФ излучения в 10 раз выше среднегалактического. Относительное содержание молекул HD и атомов C I в диффузных атомарных облаках, главным образом, зависит от степени ионизации газа [22, 23]. Это позволило из анализа относительного содержания $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$ и $N_{\text{C I}}/N_{\text{C II}}$ определить степень ионизации газа для компоненты А, $n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}} \geq 10^{-2}$, что более чем на порядок превышает степень ионизации газа в диффузных облаках Галактики [24].

В разделах 4.3.4–4.3.6 представлены результаты моделирования структуры облака H_2 с помощью кода Meudon PDR [11]. Для компонент А и В построены модели для сетки параметров: объемная концентрация газа, степень ионизации, интенсивность УФ излучения, относительное содержание

углерода, темп образования молекул H_2 на пыли. С помощью сравнения измеренных значений полной лучевой концентрации H_2 , HD, CI, населенностей вращательных уровней H_2 и уровней тонкой структуры CI со значениями, полученными в моделировании, определены физические условия в компонентах системы. Полученные результаты находятся в согласии с результатами расчета в рамках однородной модели. Высокая степень ионизации газа в системе H_2 , по-видимому, вызвана неполным экранированием УФ излучения с $E > 13.6$ эВ слоем атомарного водорода в суб-DLA системе. В разделе 4.3.7 выполнено моделирование ионизационной структуры суб-DLA системы с помощью кода CLOUDY [10]. Показано, что нейтральный газ образуется только в узкой области вблизи центра системы, а большая часть газа в системе ($\sim 90\%$) ионизована. Концентрация ионов H^+ быстро уменьшается с расстоянием от границы нейтральной холодной и горячей ионизованной фаз, и меняется от значения 2 см^{-3} на границе до $2 \times 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ в центре системы.

В **Пятой главе** диссертации выполнен обзор распространенности нейтрального хлора в облаках межзвездного газа с большими красными смещениями $z = 2 - 5$, содержащих молекулярный водород.

Среди элементов, тяжелее гелия, хлор обладает уникальными свойствами в присутствии в среде молекул H_2 . Потенциал ионизации хлора (13.0 эВ) ниже, чем потенциал ионизации атомарного водорода (13.6 эВ), поэтому в диффузной нейтральной среде, не содержащей молекул H_2 , атомы хлора ионизованы. При взаимодействии с молекулами H_2 ионы хлора за счет экзотермической реакции быстро переходят в соединение HCl^+ . Затем, с помощью нескольких каналов реакций хлор переходит в нейтральное состояние (CI) [27]. Даже при малом содержании молекул H_2 в среде хлор находится преимущественно в нейтральном состоянии. Наблюдения диффузных атомарных облаков в нашей Галактике выявили линейную корреляцию между лучевыми концентрациями CI и H_2 [28].

В параграфе 5.2 указаны параметры абсорбционных линий CI (длины волн и силы осцилляторов переходов), которые использованы в анализе.

В параграфе 5.3 описаны использованные для анализа 18 спектров квазаров, полученных на телескопах VLT/UVES и Кекк/HIRES, содержащие абсорбционные системы H_2 с лучевой концентрацией $N_{\text{H}_2} > 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Для систем с меньшей лучевой концентрацией H_2 оценка лучевой концентрации CI (из наблюдений в Галактике, см. [28]) ниже порогового значения $N_{\text{CI}} \sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$, при котором линию CI можно идентифицировать в спектре квазара с $R \approx 50\,000$ и $S/N \sim 50$.

Результаты поиска абсорбционных линий CI представлены в параграфе 5.4. Линии CI идентифицированы в девяти спектрах; в пяти спектрах идентификация линий CI выполнена впервые. В спектрах квазаров Q 0528–2508, Q 0812+3208, Q 2340–0053 линии CI детектируются в двух компонентах абсорбционных систем H_2 . Дополнительно, в 9 спектрах были получены верхние пределы на N_{CI} . Результаты измерений лучевой концентрации CI в зависимости от лучевой концентрации H_2 показаны на рис. 4.

Анализ распространенности нейтрального хлора в облаках H_2 с большими красными смещениями описан в параграфе 5.5. Определено, что лучевые концентрации CI и H_2 линейно зависимы (см. рис. 4); для вы-

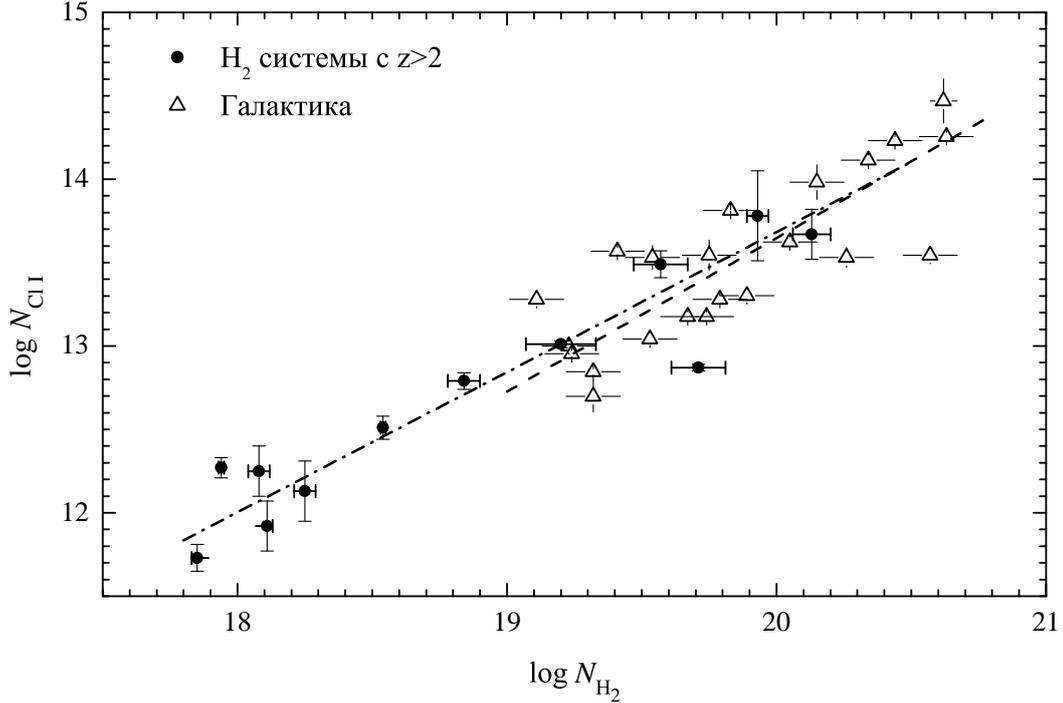


Рис. 4: Результаты измерений лучевой концентрации H_2 и CII для систем с большими красными смещениями (заполненные кружки) и систем в Галактике (открытые треугольники, [28]).

борки из двенадцати измерений коэффициент корреляции Пирсона равен $r = 0.95$. Вероятность того, что распределение точек носит случайный характер не превышает 0.001%. Показано, что в диапазоне лучевых концентраций $18 < \log N_{\text{H}_2} < 20$ отношение содержания CII и H_2 описывается следующим выражением:

$$N_{\text{CII}} = (8.6 \pm 1.4) \times 10^{-7} \times N_{\text{H}_2} \quad (1)$$

Измерения в системах с большими z продолжают зависимость “ CII-H_2 ” для Галактики в диапазон на порядок меньших лучевых концентраций H_2 , а в области перекрытия диапазонов ($\log N_{\text{H}_2} \approx 19 - 20.2$) эти две группы измерений неотличимы. Показано, что отношение CII/H_2 в облаках H_2 с $z > 2$ такое же, что и в диффузных облаках нашей Галактики. Это указывает на сходные химические и физические условия в холодной фазе межзвездной среды как в Галактике, так и на больших красных смещениях.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

- Разработан новый метод поиска абсорбционных систем H_2 в спектрах среднего разрешения ($R \approx 2000$) квазаров обзора SDSS. Метод применен к каталогам спектров квазаров SDSS DR 7 и DR 9. Обнаружено 23 кандидата в абсорбционные системы H_2 с большими красными смещениями. Для восьми из 23 кандидатов выполнены наблюдения на телескопе VLT с использованием спектрографов высокого разрешения UVES ($R \approx 50\,000$) и среднего разрешения X-shooter ($R \approx 4000 - 10\,000$). Для всех восьми кандидатов присутствие аб-

сорбционных систем H_2 было подтверждено.

- Выполнен независимый анализ абсорбционных систем молекулярного водорода (H_2 и HD) с красными смещениями $z_{\text{abs}} = 2.81$, $z_{\text{abs}} = 2.06$ и $z_{\text{abs}} = 3.09$ в спектрах квазаров Q 0528–2508, J 2123–0050 и J 2100–0641, соответственно. В спектре J 2100–0641 идентифицированы линии молекул H_2 и HD. Определена скоростная структура абсорбционных систем, измерены лучевые концентрации молекул H_2 и HD и отношение $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ в компонентах абсорбционных систем.
- Исследован эффект неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком молекулярного водорода, находящимся на большом красном смещении. Впервые обнаружен эффект неполного покрытия области формирования континуального излучения квазара облаком H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.81$ в спектре квазара Q 0528–2508. В спектрах квазаров J 2123–0050 и J 2100–0641 обнаружен эффект неполного покрытия области формирования излучения в эмиссионных линиях облаками H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.06$ и $z_{\text{abs}} = 3.09$, соответственно. На настоящий момент эффект неполного покрытия области формирования излучения квазара облаком H_2 с большим красным смещением обнаружен для пяти объектов, три из которых идентифицированы в данной работе.
- Исследованы физические условия в абсорбционной системе H_2 с $z_{\text{abs}} = 2.06$ в спектре квазара J 2123–0050. Показано, что абсорбционная система состоит из двух компонент А и В, которые имеют существенно разные оптические толщины в линиях H_2 . Показано, что для компоненты А среда экранирована в линиях H_2 от внешнего УФ излучения. В рамках однородной модели облака определены типичные значения объемной концентрации газа $n = 22 \pm 7 \text{ см}^{-3}$ и кинетической температуры $T = 139 \pm 6 \text{ К}$. Для компоненты В среда оказалась оптически тонкой в линиях H_2 . В рамках однородной модели получена оценка интенсивности УФ фона (в ~ 8 раз выше средней в Галактике) и давление газа, $\log(P/k_B) = 4.2 \pm 0.3 \text{ К см}^{-3}$. Выполнено моделирование структуры облака H_2 для сетки параметров: объемная концентрация газа, степень ионизации, интенсивность УФ излучения, относительное содержание углерода в облаке, темп образования H_2 на пыли. Показано, что наилучшая модель, которая описывает наблюдаемые лучевые концентрации H_2 , HD, C I и населенности уровней H_2 и C I для компонент А и В – это модель с постоянной плотностью газа ($n_{\text{H}} = 40 \text{ см}^{-3}$), степенью ионизации $n_{\text{H}^+}/n_{\text{H}} \sim 10^{-2}$, содержанием углерода (C/H) в 2.8 раз выше солнечной распространенности, интенсивностью УФ излучения на границе облака в 12 раз выше средней интенсивности в Галактике. Показано, что для образования наблюдаемого количества молекул H_2 для компонент А и В коэффициент темпа образования H_2 на пыли $R_{\text{H}_2} \sim (1 - 2) \times 10^{-15} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, что в ~ 40 раз выше типичного значения R_{H_2} в диффузных атомарных облаках нашей Галактики. Выполнено моделирование ионизационной структуры суб-DLA системы. Показано, что высокое значение степени ионизации газа в облаке H_2 ($\sim 10^{-2}$) может быть следствием неполного экранирования внешнего УФ-излучения (с $E > 13.6 \text{ эВ}$)

слоем нейтрального водорода в этой системе.

- Выполнена оценка распространенности нейтрального хлора в облаках межзвездного газа с большими красными смещениями ($z_{\text{abs}} = 2 - 5$), содержащих молекулярный водород. Линии нейтрального хлора идентифицированы в 9 абсорбционных системах H_2 (включая 5 новых идентификаций), и дополнительно в 9 системах получены верхние пределы на лучевую концентрацию Cl I . Обнаружена линейная зависимость между лучевыми концентрациями Cl I и H_2 ; $N_{\text{Cl I}} = (8.6 \pm 1.4) \times 10^{-7} \times N_{\text{H}_2}$ в диапазоне лучевых концентраций $18 < \log N_{\text{H}_2} < 20$. Найденное соотношение соответствует данным наблюдений диффузных облаков нашей Галактики. Это указывает на сходные химические и физические условия в холодной фазе межзвездной среды на больших красных смещениях и в нашей Галактике.

Публикации по теме диссертации

- [A1] Balashev S. A., **Klimenko, V. V.**, Ivanchik A. V., Varshalovich D. A., Petitjean, P., Noterdaeme P. Molecular hydrogen absorption systems in Sloan Digital Sky Survey // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2014. Vol. 440. P.225.
- [A2] Иванчик А.В., Балашев С.А., Варшалович Д.А., **Клименко В.В.** Молекулярные облака H_2/HD в ранней Вселенной. Независимый способ оценки концентраций барионов во Вселенной // Астрономический журнал. 2015. Т. 92. С.119.
- [A3] Balashev S. A., Noterdaeme P., **Klimenko V. V.**, Petitjean P., Srianand R., Ledoux C., Ivanchik A. V., Varshalovich D. A. Neutral chlorine and molecular hydrogen at high redshift // Astronomy & Astrophysics. 2015. Vol. 575. P.8
- [A4] **Klimenko, V. V.**, Balashev, S. A., Ivanchik, A. V., Ledoux, C., Noterdaeme, P., Petitjean, P., Srianand, R., Varshalovich, D. A. Partial covering of the emission regions of Q 0528–250 by intervening H_2 clouds. // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2015. Vol. 448. P.280.
- [A5] Ofengeim, D. D., Balashev, S. A., Ivanchik, A. V., Kaminker, A. D., **Klimenko, V. V.** Effect of a partial coverage of quasar broad-line regions by intervening H_2 -bearing clouds // Astrophysics and Space Science. 2015. Vol. 359. P.26
- [A6] **Klimenko V. V.**, Balashev S. A., Ivanchik A. V., Varshalovich D.A. A new estimation of $\text{HD}/2\text{H}_2$ at high redshift using the spectrum of the quasar J 2123–0050. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. 661 012005

- [A7] **Клименко В. В.**, Балашев С. А., Иванчик А. В., Варшалович Д. А. Оценка физических условий в холодной фазе межзвездной среды в суб-DLA системе с $z=2.06$ в спектре квазара J 2123–0050. // Письма в Астрономический Журнал 2016, т.42, с. 161

Список литературы

- [1] The neutral atomic phases of the interstellar medium / M. G. Wolfire, D. Hollenbach, C. F. McKee et al. // *Astrophys. J.* — 1995. — Vol. 443. — Pp. 152–168.
- [2] *de Avillez M. A., Breitschwerdt D.* Volume filling factors of the ISM phases in star forming galaxies. I. The role of the disk-halo interaction // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 425. — Pp. 899–911.
- [3] *Madau P., Dickinson M.* Cosmic Star-Formation History // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2014. — Vol. 52. — Pp. 415–486.
- [4] *Snow T. P., McCall B. J.* Diffuse Atomic and Molecular Clouds // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 44. — Pp. 367–414.
- [5] *Wolfe A. M., Gawiser E., Prochaska J. X.* Damped Ly α Systems // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 43. — Pp. 861–918.
- [6] On the sizes of $z\sim 2$ damped Ly α absorbing galaxies / J.-K. Krogager, J. P. U. Fynbo, P. Møller et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 424. — Pp. L1–L5.
- [7] *Levshakov S. A., Varshalovich D. A.* Molecular hydrogen in the $Z = 2.811$ absorbing material toward the quasar PKS 0528-250 // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1985. — Vol. 212. — Pp. 517–521.
- [8] Search for cold gas in $z > 2$ damped Ly α systems: 21-cm and H₂ absorption / R. Srianand, N. Gupta, P. Petitjean et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 421. — Pp. 651–665.
- [9] *Jorgenson R. A., Wolfe A. M., Prochaska J. X.* Understanding Physical Conditions in High-redshift Galaxies Through C I Fine Structure Lines: Data and Methodology // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 722. — Pp. 460–490.
- [10] The 2013 Release of Cloudy / G. J. Ferland, R. L. Porter, P. A. M. van Hoof et al. // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica.* — 2013. — Vol. 49. — Pp. 137–163.
- [11] A Model for Atomic and Molecular Interstellar Gas: The Meudon PDR Code / F. Le Petit, C. Nehmé, J. Le Bourlot, E. Roueff // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2006. — Vol. 164. — Pp. 506–529.
- [12] H₂/HD molecular clouds in the early universe. An independent means of estimating the baryon density of the universe / A. V. Ivanchik, S. A. Balashev, D. A. Varshalovich, V. V. Klimenko // *Astronomy Reports.* — 2015. — Vol. 59. — Pp. 100–117.
- [13] The warm, the excited, and the molecular gas: GRB 121024A shining through its star-forming galaxy / M. Friis, A. De Cia, T. Krühler et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 451. — Pp. 167–183.
- [14] Molecular hydrogen in high-redshift damped Lyman- α systems: the VLT/UVES database / P. Noterdaeme, C. Ledoux, P. Petitjean, R. Srianand // *Astron. Astrophys.* — 2008. — Vol. 481. — Pp. 327–336.

- [15] The VLT-UVES survey for molecular hydrogen in high-redshift damped Lyman α systems: physical conditions in the neutral gas / R. Srianand, P. Petitjean, C. Ledoux et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 2005. — Vol. 362. — Pp. 549–568.
- [16] New constraint on cosmological variation of the proton-to-electron mass ratio from Q0528-250 / J. A. King, M. T. Murphy, W. Ubachs, J. K. Webb // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 2011. — Vol. 417. — Pp. 3010–3024.
- [17] Keck telescope constraint on cosmological variation of the proton-to-electron mass ratio / A. L. Malec, R. Buning, M. T. Murphy et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*. — 2010. — Vol. 403. — Pp. 1541–1555.
- [18] Cosmological Concordance or Chemical Coincidence? Deuterated Molecular Hydrogen Abundances at High Redshift / J. Tumlinson, A. L. Malec, R. F. Carswell et al. // *Astrophys. J.*. — 2010. — Vol. 718. — Pp. L156–L160.
- [19] Precision Measures of the Primordial Abundance of Deuterium / R. J. Cooke, M. Pettini, R. A. Jorgenson et al. // *Astrophys. J.*. — 2014. — Vol. 781. — P. 31.
- [20] Surface chemistry in the interstellar medium. I. H₂ formation by Langmuir-Hinshelwood and Eley-Rideal mechanisms / J. Le Bourlot, F. Le Petit, C. Pinto et al. // *Astron. Astrophys.*. — 2012. — Vol. 541. — P. A76.
- [21] *Jura M.* Interstellar clouds containing optically thin H₂ // *Astrophys. J.*. — 1975. — Vol. 197. — Pp. 575–580.
- [22] *Le Petit F., Roueff E., Le Bourlot J.* D/HD transition in Photon Dominated Regions (PDR) // *Astron. Astrophys.*. — 2002. — Vol. 390. — Pp. 369–381.
- [23] *Liszt H. S.* How does C⁺ recombine in diffuse molecular gas? // *Astron. Astrophys.*. — 2011. — Vol. 527. — P. A45.
- [24] *Welty D. E., Hobbs L. M., Morton D. C.* High-Resolution Observations of Interstellar Ca I Absorption-Implications for Depletions and Electron Densities in Diffuse Clouds // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*. — 2003. — Vol. 147. — Pp. 61–96.
- [25] Molecular Hydrogen in the FUSE Translucent Lines of Sight: The Full Sample / B. L. Rachford, T. P. Snow, J. D. Destree et al. // *ArXiv e-prints*. — 2008.
- [26] *Welty D. E., Xue R., Wong T.* Interstellar H I and H₂ in the Magellanic Clouds: An Expanded Sample Based on Ultraviolet Absorption-line Data // *Astrophys. J.*. — 2012. — Vol. 745. — P. 173.
- [27] *Neufeld D. A., Wolfire M. G.* The Chemistry of Interstellar Molecules Containing the Halogen Elements // *Astrophys. J.*. — 2009. — Vol. 706. — Pp. 1594–1604.
- [28] *Moomey D., Federman S. R., Sheffer Y.* Revisiting the Chlorine Abundance in Diffuse Interstellar Clouds from Measurements with the Copernicus Satellite // *Astrophys. J.*. — 2012. — Vol. 744. — P. 174.