

На правах рукописи

Косенко Дарья Николаевна

Молекулы HD в холодной диффузной фазе
межзвездной среды

Специальность:

1.3.1 - Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2024

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. Иоффе
- Официальные оппоненты: Васильев Евгений Олегович
доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник
Астрокосмического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева
- Вибе Дмитрий Зигфридович
доктор физико-математических наук
заведующий отделом физики и эволюции звезд
Института астрономии РАН
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Специальная астрофизическая
обсерватория РАН

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

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

Автореферат разослан 2024 года.

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

П. С. Штернин

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Межзвездная среда (МЗС) тесно связана с эволюцией галактик, являясь источником вещества для звездообразования. В свою очередь, МЗС сама испытывает воздействие от формирующихся звезд в виде обогащения тяжелыми металлами и пылью при истечении звездных ветров и взрывах сверхновых, ультрафиолетового (УФ) излучения от звезд, космических лучей, ударных волн и так далее.

Температуры (T) и плотности (n) межзвездного газа варьируются в широком диапазоне, вместе с тем значительная часть газа сосредоточена в так называемых фазах, характеризующихся определенными значениями T и n . Данная работа посвящена изучению холодной диффузной фазы МЗС, которая имеет характерную температуру $T \sim 100$ К и плотность $n \sim 100$ см $^{-3}$.

Физические условия в холодной фазе МЗС способствуют образованию молекулярного водорода H_2 – самой распространенной молекулы во Вселенной. Присутствие большого количества H_2 в среде, в свою очередь, способствует формированию изотополога H_2 – молекулы дейтерированного водорода HD – за счет ионно-молекулярной реакции



Изотопическое отношение D/H мало (например, [1]), поэтому распространенность молекул HD примерно на 5 порядков меньше, чем содержание H_2 . Несмотря на это, HD является одной из самых распространенных молекул в МЗС.

Основной способ изучения молекул HD и H_2 в МЗС – это спектроскопия абсорбционных линий этих молекул в среде, попадающей на луч зрения наблюдатель – яркий фоновый источник. Для исследования газа в удаленной Вселенной в качестве фоновых источников используются далекие квазары и оптические послесвечения γ -всплесков. Однако вероятность найти холодный газ при слепом поиске мала, так как, во-первых, объемный фактор заполнения холодной фазы в МЗС чрезвычайно мал ($\lesssim 1\%$). А во-вторых, холодная фаза МЗС находится преимущественно вблизи центра галактики, в то время как обычно на луч зрения попадает среда из ее периферии. Поэтому на красных смещениях $z \gtrsim 2$ молекулы H_2 были идентифицированы лишь в ~ 40 абсорбционных системах в спектрах квазаров, при этом только в 12 из них были найдены молекулы HD (см., например, [2, 3]). Тем не менее, в последние годы при помощи современных оптических инструментов с высоким разрешением были получены новые спектры квазаров, содержащие абсорбционные системы с высокой лучевой концентрацией молекул H_2 . Это может указывать на присутствие молекул HD в этих системах. Таким образом, систематический поиск молекул HD на $z \gtrsim 2$ и увеличение выборки таких систем является актуальной задачей.

В отличие от исследований далеких галактик, где практически всегда наблюдения выполнены вдоль одного луча зрения отдельной галактики, в Млечном Пути и соседних галактиках есть возможность изучать МЗС вдоль разных направлений. Для этого в качестве фоновых источников используют

ся яркие звезды. В Млечном Пути молекулы H_2 идентифицированы практически на всех лучах зрения, даже на высоких галактических широтах (см., например [4, 5]). Это позволило получить большую выборку абсорбционных систем, содержащих H_2 [5] и провести систематический поиск HD в нашей Галактике [6]. Ближайшие к Млечному Пути галактики – это Большое и Малое Магелланово Облако. Несмотря на то, что в Магеллановых Облаках был выполнен систематический поиск H_2 [7], молекулы HD в них полноценно не изучались и были обнаружены только в нескольких системах. Поскольку Магеллановы Облака – это карликовые галактики низкой металличности [8], это делает их интересными пробными системами при изучении галактик в ранней Вселенной. Поэтому систематический поиск молекул HD в Магеллановых Облаках представляет собой актуальную задачу.

Анализ распространенностей HD и H_2 в нашей Галактике и на красных смещениях $z \gtrsim 2$ показал, что измерения относительных лучевых концентраций HD/ 2H_2 (здесь и далее символом HD/ H_2 обозначается отношение и лучевых, и объемных концентраций $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$ и $n_{\text{HD}}/n_{\text{H}_2}$, соответственно, если не оговорено, какие концентрации имеются ввиду в конкретном случае) в далеких галактиках в некоторых случаях близки к первичному изотопическому отношению $(\text{D}/\text{H})_p$, в то время как величины, полученные в Млечном Пути, меньше его примерно на порядок [9, 10]. При этом моделирование показало, что наблюдаемое отличие нельзя объяснить лишь разрушением дейтерия в ходе звездной эволюции, так как содержание дейтерия не может упасть более, чем на $\sim 1/3$ от своего первичного значения [11]. Кроме того, известно, что распространенность молекул HD может сильно зависеть от физических условий в среде [10], что, (i) вероятно, объясняет наблюдаемое различие в относительных лучевых концентрациях HD/ H_2 на красных смещениях $z \gtrsim 2$ и в нашей Галактике, (ii) позволяет оценивать физические параметры в среде. Такие оценки были выполнены лишь для нескольких абсорбционных систем, содержащих молекулы HD и H_2 , в Млечном Пути (например, [12]). Один из важнейших параметров, влияющих на распространенность молекул HD, – это скорость ионизации космическими лучами. Оценка этого параметра важна, так как на данный момент это один из немногих доступных способов изучения космических лучей низких энергий ($\lesssim 100$ МэВ). При этом сложность доступных на сегодняшний день моделей (например, Meudon PDR [13]) увеличивает время расчета, что усложняет систематическую оценку параметров. Таким образом, актуальной задачей является построение упрощенной модели облака, содержащего молекулы HD и H_2 , позволяющей проводить систематические оценки ряда физических параметров в МЗС, в первую очередь скорости ионизации космическими лучами, по измеряемым лучевым концентрациям молекул HD и H_2 .

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является исследование влияния физических условий в холодной диффузной МЗС на распространенность молекул HD, поиск новых абсорбционных систем, содержащих молекулы HD в ранней Вселенной и в Магеллановых Облаках, а также оценка физических условий в найденных системах.

Поставленные задачи:

1. Проведение систематического поиска молекул HD в абсорбционных системах на красных смещениях $z \gtrsim 2$, в которых ранее были найдены молекулы H₂.
2. Систематический поиск молекул HD в Большом и Малом Магеллановых Облаках. Независимый анализ абсорбционных линий H₂ и C I в абсорбционных системах в Магеллановых Облаках.
3. Построение модели облака диффузного холодного межзвездного газа, содержащего молекулы HD и H₂. Расчет отношения лучевых концентраций $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$ и изучение его зависимости от физических условий в среде.
4. Разработка метода оценки физических условий в среде (в частности скорости ионизации космическими лучами) по измеренным лучевым концентрациям молекул HD и H₂. Применение этого метода для оценки физических условий в абсорбционных системах.

Научная новизна

Следующие результаты, описанные в диссертации, получены впервые:

1. Проведен систематический поиск молекул HD в абсорбционных системах на больших красных смещениях ($z \sim 2 - 3$). Молекулы HD идентифицированы в пяти новых абсорбционных системах на красных смещениях $z \gtrsim 2$, а в 12 системах на лучевые концентрации HD получены верхние пределы.
2. Произведен систематический поиск HD в Большом и Малом Магеллановых Облаках в абсорбционных системах, в которых $N_{\text{H}_2} > 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Найдено 19 новых абсорбционных систем, содержащих HD, в 70 системах получены верхние пределы на лучевые концентрации HD.
3. Построена полуаналитическая модель стационарного диффузного холодного облака, содержащего молекулы HD и H₂. Рассчитаны профили отношений лучевых и объемных концентраций HD и H₂ в зависимости от физических параметров. Показано, что при определенных значениях физических параметров (то есть при низкой металличности и/или высокой скорости ионизации космическими лучами) в облаке возникает область, где отношения объемных и лучевых концентраций HD/H₂ выше изотопического отношения D/H.
4. Разработан оригинальный метод оценки физических условий (в частности, скорости ионизации космическими лучами) в МЗС по измеренным лучевым концентрациям молекул HD и H₂. Этот метод использовался для оценки скорости ионизации космическими лучами в МЗС, ассоциированной с 16 абсорбционными системами на красных смещениях $z \gtrsim 2$ (из них 7 систем – новые), с 2 системами в Большом Магеллановом Облаке и с 4 системами в Малом. Также получена оценка на среднюю скорость ионизации космическими лучами в диффузных облаках, содержащих HD, в Млечном Пути.

Достоверность полученных результатов

Результаты были получены при помощи достоверных методов математической статистики при анализе спектров, а также оценке физических условий. Также были использованы математические и численные методы, достоверность которых проверялась сравнением с предыдущими работами (при возможности), а также исследованием предельных случаев.

Научная и практическая значимость

Значительно увеличена выборка абсорбционных систем, содержащих HD, на красных смещениях $z \gtrsim 2$ и подтверждено, что значения $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$, полученные в далеких галактиках, имеют значения, близкие к первичному изотопическому отношению $(\text{D}/\text{H})_{\text{p}}$, хотя и показывают значительный разброс. Полученные лучевые концентрации могут быть использованы при построении и проверке моделей МЗС.

Выполнен поиск молекул HD в Большом и Малом Магеллановых Облаках, которые являются ближайшими к Млечному Пути низкометаллическими галактиками. Полученные результаты могут использоваться для изучения и пространственно-разрешенного моделирования ранних галактик.

Разработанная полуаналитическая модель диффузного облака, содержащего HD и H_2 , позволяет оценить физические условия в наблюдаемых абсорбционных системах как в галактиках на больших красных смещениях, так и в локальной Вселенной. Разработанная модель может быть расширена на другие простые молекулы (OH^+ , H_2O^+ и т.д.). Полученные значения физических параметров в свою очередь могут быть использованы при детальном моделировании эволюции галактик.

Положения, выносимые на защиту

1. В абсорбционных системах в спектрах квазаров J0858+1749, J1311+2225, J1513+0352, J2340–0053 и J2347+0051 на красных смещениях $z \sim 2 - 3$ содержатся молекулы HD, причем в спектрах J1311+2225 и J2340–0053 молекулы HD содержатся в нескольких компонентах. Подтверждается значительный разброс отношения измеренных лучевых концентрации $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$ относительно первичного изотопического отношения $(\text{D}/\text{H})_{\text{p}}$.
2. В 24 системах, ассоциированных с компонентами H_2 в Магеллановых Облаках, содержатся молекулы HD, из них в 19 лучевые концентрации HD измерены впервые.
3. При определенной комбинации физических параметров (металличности, объемной концентрации, скорости ионизации космическими лучами и интенсивности УФ фона) скорость формирования HD увеличивается, и тогда возможна ситуация, когда переход $\text{D I}/\text{HD}$ происходит на меньшей глубине облака, чем $\text{H I}/\text{H}_2$. Это приводит к появлению области, в которой $\text{HD}/2\text{H}_2 > \text{D}/\text{H}$.

4. Разработанный оригинальный метод, основанный на полуаналитической модели диффузного холодного облака, содержащего молекулы HD и H₂, позволяет оценивать физические параметры, в частности скорость ионизации космическими лучами, по измеренным лучевым концентрациям молекул HD и H₂.
5. Скорость ионизации космическими лучами для всех новых и для девяти уже известных абсорбционных систем, содержащих HD, на красных смещениях $z \gtrsim 2$ находится в диапазоне от $\sim 10^{-18}$ до $\sim 10^{-15}$ с⁻¹. Скорость ионизации космическими лучами в системе в спектре звезды Sk-69 246 в Большом Магеллановом Облаке равна $-16.7_{-0.2}^{+0.3}$ с⁻¹. Оценка на среднюю скорость ионизации космическими лучами для Млечного Пути составляет $\zeta \sim (1.3_{-0.5}^{+1.3}) \times 10^{-17}$ с⁻¹.

Апробация работы

Результаты, представленные в работе, были доложены на астрофизических семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на конференциях: “Физика А.СПб” (Санкт-Петербург, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, ИКИ РАН, 2018, 2019, 2022), “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (Пушино, ПРАО АКЦ ФИАН, 2019), “Instability Phenomena and Evolution of the Universe” (Armenia, Yurakan, ВАО, 2018), “Всероссийская астрономическая конференция” (Москва, ГАИШ МГУ, 2021), “Звездообразование и планетообразование” (Москва, АКЦ ФИАН, 2022), “Физика МЗС: от локального облака до ранних галактик” (Москва, ГАИШ МГУ, 2023), “Ультрафиолетовая Вселенная – 2023” (Москва, РАН, 2023).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации – 141 страница, включая 49 рисунков и 19 таблиц. Библиография включает 169 наименований на 18 страницах.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, показаны достоверность, научная значимость и новизна выполненной работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 является обзорной и посвящена описанию исследований холодного диффузного газа в МЗС. Описана структура уровней энергии H₂ и HD, особенности исследования газа, содержащего молекулярный и дейтерированный водород, на красных смещениях $z \gtrsim 2$ и в Млечном Пути и соседних галактиках. Кроме того, описана аналитическая модель облака, содержащего H₂. Также описаны особенности космических лучей низких энергий и способы оценки скорости ионизации космическими лучами. Последующие главы диссертации являются оригинальными.

Глава 2 посвящена поиску новых абсорбционных систем, содержащих молекулы HD, на больших красных смещениях ($z \sim 2-3$) в насыщенных Лайман α (Damped Ly α , DLA) системах – системах с высокой лучевой концентрацией атомарного водорода ($\log N_{\text{HI}} > 20.3$, здесь и далее лучевая концентрация измеряется в см^{-2}) в архивных спектрах далеких квазаров. В *разделе 2.1* описываются особенности наблюдения молекул HD и H₂ на красных смещениях $z \gtrsim 2$, а также известные идентификации молекул HD в ранней Вселенной. Обсуждается отличие этих измерений от измерений в нашей Галактике. Слепой поиск систем, содержащих HD, неэффективен, поэтому в работе поиск этих молекул выполнялся в DLA системах, где ранее были найдены молекулы H₂. *Раздел 2.2* посвящен описанию данных, которые использовались для анализа. Так как из-за космологического красного смещения абсорбционные линии HD и H₂ смещаются в оптическую область, были использованы данные, полученные с помощью спектрографов среднего и высокого разрешения X-shooter ($R \sim 6000$, [14]) и Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph (UVES, $R \sim 50000$, [15]), установленных на телескопе Very Large Telescope (VLT), и High Resolution Echelle Spectrograph (HIRES, $R \sim 50000$, [16]) на телескопе Keck. В *разделе 2.3* описан анализ рассматриваемых DLA систем. Для анализа использовалась подгонка абсорбционных линий многокомпонентным профилем Фойта, где основными параметрами выступают лучевая концентрация, параметр Доплера и красное смещение. Для оценки этих параметров использовался байесов подход, при этом апостериорное распределение параметров оценивалось методом Монте-Карло по схеме марковских цепей. Поиск молекул HD выполнялся на красных смещениях компонент, где были найдены молекулы H₂. Для анализа спектров использовалась программа Spectro, разработанная С.А. Балашевым¹.

Всего было проанализировано 17 абсорбционных систем, содержащих H₂, из которых в пяти были сделаны новые идентификации HD, причем в двух системах (в спектрах квазаров J 1311+2225 и J 2340-0053) было найдено по несколько компонент, содержащих HD. В остальных 12 системах поставлены верхние пределы на лучевые концентрации HD. Кроме того, в спектре квазара J0812+3208 на красном смещении $z = 2.06678$ найдена неопубликованная ранее абсорбционная система, содержащая молекулы H₂. Однако в спектр HIRES для этой системы попали лишь две линии HD (L0-0R0 и L1-0R0) и только самая слабая L0-0R0 не была блендирована, поэтому в этой системе можно поставить лишь верхний предел на лучевую концентрацию HD.

В *разделе 2.4* полученные измерения сравниваются с уже известными результатами на красных смещениях $z \gtrsim 2$, в Млечном Пути [6] и с первичным изотопическим отношением $(\text{D}/\text{H})_{\text{p}}$ [1] (см. рисунок 1). Полученные измерения подтверждают, что отношение $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$, измеренное на красных смещениях $z \gtrsim 2$, имеет достаточно сильный разброс (≈ 1 порядок величины) относительно первичного изотопического отношения. При этом измерения, полученные для нашей Галактики, оказываются примерно на порядок ниже $(\text{D}/\text{H})_{\text{p}}$. Сделан вывод, что, вероятно, такой разброс обуславливается различием физических условий в наблюдаемых системах. Основные результаты, полученные в этой главе, опубликованы в работах [A1, A5] и представлены в *разделе 2.5*.

¹<https://spectro.readthedocs.io/en/latest/>

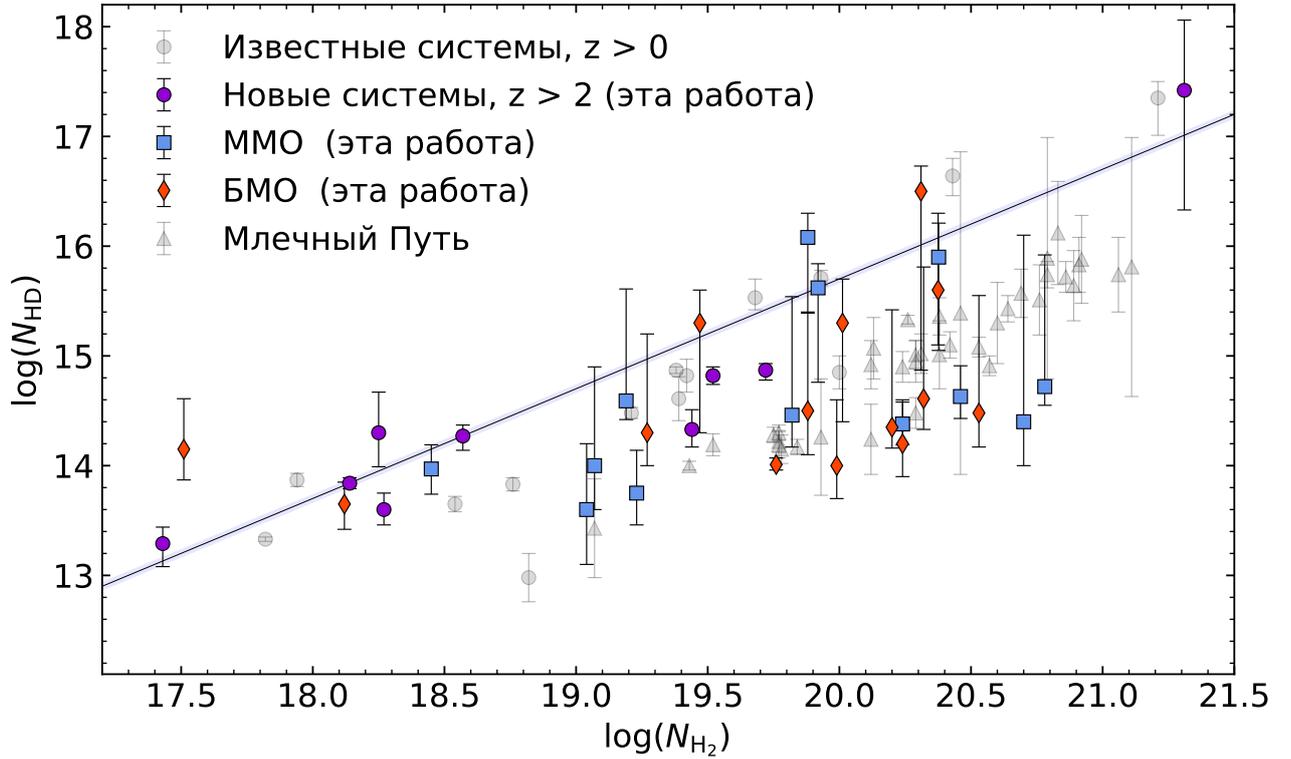


Рис. 1: Относительная распространенность молекул HD и H₂. Новые измерения на красных смещениях $z \gtrsim 2$ показаны фиолетовыми символами [A5], в Большом и Малом Магеллановых Облаках – голубыми и красными символами, соответственно [A6]. Бледно-серыми кружками и треугольниками показаны измерения на красных смещениях $z \gtrsim 0$ в спектрах квазаров и в нашей Галактике [6], соответственно, сплошная голубая линия показывает первичное изотопическое отношение $(D/H)_p$ [1].

Глава 3 посвящена систематическому поиску молекул HD в Магеллановых Облаках. В вступительном *разделе 3.1* описаны особенности наблюдения HD и H₂ в Магеллановых Облаках. Большое и Малое Магеллановы Облака (БМО и ММО, соответственно) – это ближайшие к Млечному Пути низкометаллические галактики [8], причем средняя металличность в ММО ($Z \sim 0.2Z_{\odot}$) сравнима со средней металличностью, наблюдаемой на больших красных смещениях. Относительно малое расстояние до этих галактик позволяет изучать их вдоль различных лучей зрения в направлении на яркие звезды. Для изучения абсорбционных линий HD и H₂ в Млечном Пути и соседних галактиках необходимо использовать космические УФ телескопы, так как в этом случае линии HD и H₂ попадают в область электромагнитного спектра, для которой земная атмосфера непрозрачна. В *разделе 3.2* описаны используемые для анализа архивные спектры звезд в Магеллановых Облаках. Данные, полученные телескопом Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE) с номинальным разрешением $R \sim 20000$ [17], описаны в *подразделе 3.2.1*. Так как качество спектров FUSE не позволяет задетектировать $\log N_{HD} \lesssim 13$, поиск молекул HD выполнялся в системах, в которых $\log N_{H_2} \gtrsim 18$ [7] (типичная измеряемая относительная концентрация $N_{HD}/N_{H_2} \lesssim 10^{-5}$). Всего было отобрано 48 абсорбционных систем в БМО и 46 систем в ММО из выборки, представленной в работе [7]. Кроме того, для некоторых систем были использованы архивные данные телескопа Hubble Space Telescope (HST) для анализа абсорбционных

линий C I, а также некоторых металлов (P II, Zn II либо S II). Это позволило оценить населенности уровней тонкой структуры C I и металличности в этих системах (*подраздел 3.2.2*). Чтобы сделать анализ однородным, был проведен независимый анализ абсорбционных линий H₂ в каждой из систем, а на скоростях, соответствующих компонентам H₂, был выполнен поиск HD. Особенности анализа линий H₂ и HD в данных FUSE и линий C I в данных HST описаны в *разделе 3.3*.

Результаты поиска молекул HD в Магеллановых Облаках представлены в *разделе 3.4* и показаны на рисунке 1. Молекулы HD идентифицированы в 24 абсорбционных системах (из них в 19 – впервые), а в остальных 70 – поставлены верхние пределы. Большое число верхних пределов связано с недостаточно хорошим качеством спектров, поэтому FUSE плохо подходит для изучения HD. Тем не менее виден сильный разброс полученной относительных лучевых концентраций HD/H₂ (≈ 2 порядка величины) в Магеллановых Облаках, что может отражать различие в физических условиях на разных лучах зрения. Также в спектре звезды AV 242 в ММО обнаружено высокоскоростное облако (на скорости $v \sim 100$ км/с), неопубликованное ранее. По-видимому, это первое найденное высокоскоростное облако в направлении на ММО, содержащее молекулы H₂. Основные результаты, полученные в главе 3, опубликованы в работах [A6, A7, A8] и описаны в *разделе 3.5*.

Глава 4 посвящена построению простой полуаналитической модели стационарного облака, содержащего молекулы HD и H₂. Эта модель является расширением построенной ранее другими авторами аналитической модели облака, содержащего H₂ [18], которое основано на решении уравнения баланса между процессами формирования и разрушения HD. В *разделе 4.1* приведено введение к главе. В *разделе 4.2* представлена модель стационарного плоско-параллельного облака, содержащего водород и дейтерий, из которых посредством химических реакций образуются молекулы HD и H₂. Модель основана на решении уравнения баланса между процессами формирования и разрушения молекул HD. Основным канал образования HD – это взаимодействие молекулы H₂ с однократно ионизованным дейтерием D⁺, реакция (1). При низком содержании H₂ молекулы HD могут также формироваться на поверхности пыли. Основным канал разрушения HD – диссоциация УФ излучением. Из уравнения баланса для молекулы HD можно получить уравнение для относительной концентрации HD/H₂:

$$\frac{n_{\text{HD}}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{dN_{\text{HD}}}{dN_{\text{H}_2}} = 2 \frac{D}{H} \frac{1}{f_{\text{H}_2}} \left(\frac{1}{\beta^{\text{chem}} f_{\text{H}_2} + \beta^{\text{dust}}} + 1 \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $f_{\text{H}_2} = 2n_{\text{H}_2}/n_{\text{H}}^{\text{tot}}$ – степень молекуляризации, β^{chem} и β^{dust} – отношения скоростей формирования HD в реакции (1) и на поверхности пыли, соответственно, к скорости разрушения HD. Эти отношения зависят от лучевых концентраций HD и H₂ и от физических параметров: металличности Z , интенсивности УФ фона χ , скорости ионизации космическими лучами ζ и полной объемной концентрации водорода $n_{\text{H}}^{\text{tot}} = n_{\text{H}} + 2n_{\text{H}_2}$. Решение дифференциального уравнения (2) дает профили концентраций $N_{\text{HD}}(N_{\text{H}_2})$ при различных значениях параметров.

Изучена зависимость относительной распространенности HD/H₂ от физических параметров, в частности, наиболее интересным является влияние

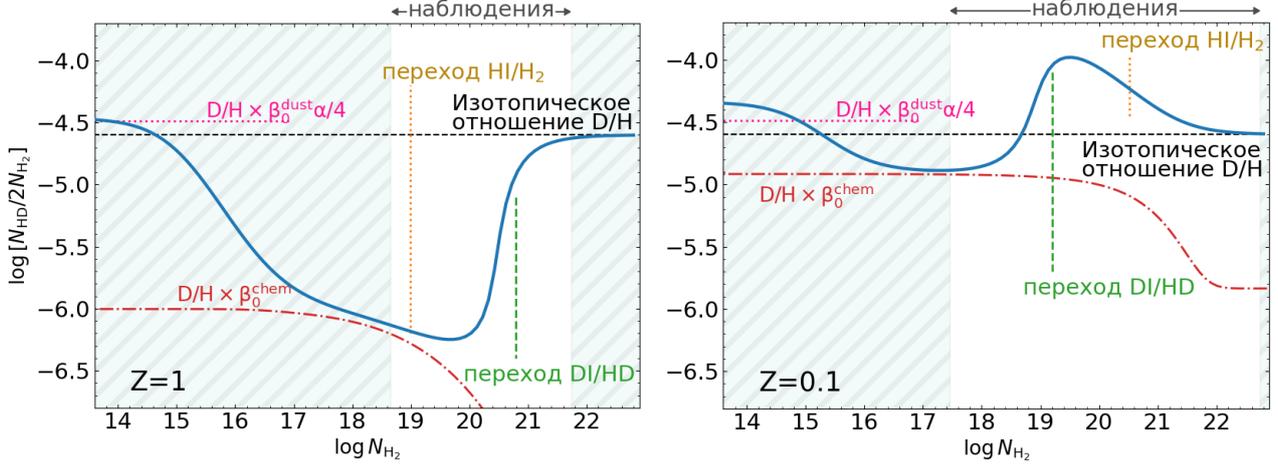


Рис. 2: Отношение лучевых концентраций HD/2H₂ как функция N_{H_2} для модели облака с $n_{\text{H}}^{\text{tot}} = 100 \text{ см}^{-3}$, $T = 100 \text{ K}$, $\chi = 1$ и $\zeta = 3 \times 10^{-17} \text{ с}^{-1}$, $Z = 1$ (левая панель) и $Z = 0.1$ (правая панель). Сплошная голубая кривая показывает решение уравнения (2), розовая пунктирная и красная штрих-пунктирная линии – это асимптотики для внешней и промежуточной частей облака, черная штриховая линия соответствует изотопическому отношению D/H, которое в данном расчете равно $(\text{D}/\text{H})_{\text{p}}$. Зеленая и оранжевая вертикальные линии показывают лучевые концентрации H₂, при которых происходят переходы DI/HD и HI/H₂. На каждой панели незаштрихованные области условно показывают диапазоны лучевых концентраций H₂, в которых могут быть идентифицированы линии HD при помощи современных инструментов (рассчитывалась из условий $\log N_{\text{HD}} > 12.5$ и $A_V < 3$, соответствующих левой и правой границе, соответственно).

металличности. На рисунке 2 показаны примеры профилей отношений лучевых концентраций HD/H₂ при металличностях $Z = 1$ и $Z = 0.1$. Получено аналитическое приближение для HD/H₂ во внешней части облака, где HD формируется преимущественно на пыли (показано на рисунке 2 пунктирной линией). Также получено аналитическое приближение для HD/H₂ для промежуточной области, где молекул H₂ достаточно, чтобы молекулы HD формировались в основном за счет реакции (1), но при этом HD слабо экранированы от УФ излучения (показано на рисунке 2 штрих-пунктирной линией).

В разделе 4.3 получено выражение для глубины проникновения УФ излучения в облако, на которой происходит переход DI/HD, определяемый равенством объемных концентраций $n_{\text{HD}} = n_{\text{D}}$. Показано, что при низкой металличности и/или высокой скорости ионизации космическими лучами скорость формирования HD сильно увеличивается за счет увеличения степени ионизации в среде, что может привести к тому, что переход DI/HD может произойти на меньшей глубине облака, чем переход HI/H₂, то есть молекулы HD становятся самоэкранированными раньше, чем молекулы H₂. Это приводит к появлению области в облаке, где распространенность $\text{HD}/\text{H}_2 > \text{D}/\text{H}$ (см. рисунок 2).

Для проверки полученных результатов, в разделе 4.4 было проведено сравнение с результатами вычислений численного кода Meudon PDR [13]. Код рассчитывает перенос УФ излучения, тепловой баланс между процессами нагрева и охлаждения, населенности уровней и концентрации элементов. На рисунке 3 демонстрируется, что профили концентраций, рассчитанные в рамках простой модели, находятся в хорошем согласии с расчетами ко-

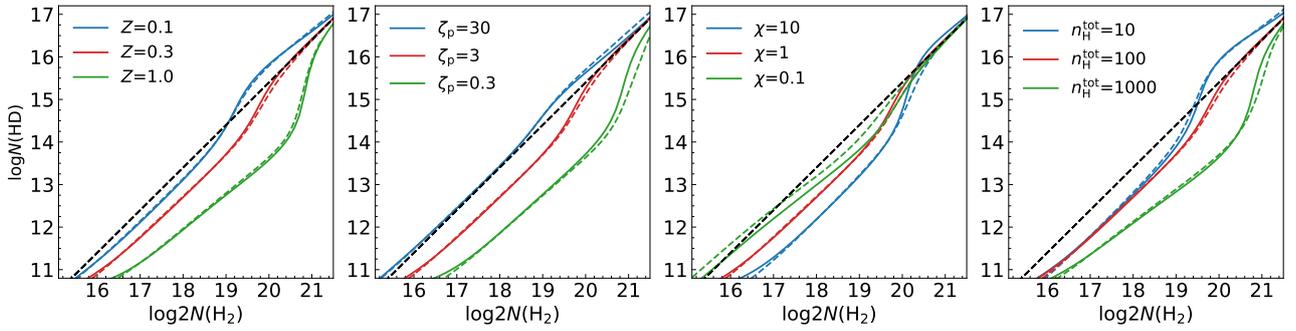


Рис. 3: Зависимость $N_{\text{HD}}(2N_{\text{H}_2})$ от физических параметров с МЗС. Красные кривые показывают базовую модель с $Z = 0.3$, $\chi = 1$, $\zeta = 3 \times 10^{-17} \text{ c}^{-1}$ и $n_{\text{H}}^{\text{tot}} = 100 \text{ cm}^{-3}$. Здесь $\zeta_{\text{p}} = \zeta/10^{-17} \text{ c}^{-1}$. Каждая панель соответствует изменению одного из параметров базовой модели: металличности, скорости ионизации космическими лучами, интенсивности УФ излучения и объемной концентрации слева направо, соответственно. Сплошные кривые показывают результат модели, описанной в главе 4, а штриховые кривые – расчеты кодом Meudon PDR [13]. Черная штриховая линия соответствует изотопическому отношению D/H, которое в данном расчете равно $(\text{D}/\text{H})_{\text{p}}$.

дом Meudon PDR. Показано, что на определенной глубине облака отношение $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$ чувствительно к комбинациям физических параметров, что может быть использовано для их оценки.

В *разделе 4.5* в модель добавлены процессы разрушения молекул HD и H₂ космическими лучами. Показано, что при $\zeta \gtrsim 10^{-15} \text{ c}^{-1}$ разрушение молекул сильно влияет на отношение $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$. Однако если учесть потери энергии космических лучей при проникновении вглубь облака, то можно применять модель без учета разрушения молекул космическими лучами вплоть до $\zeta \gtrsim 10^{-14} \text{ c}^{-1}$.

Основные результаты, полученные в этой главе, опубликованы в работах [A2, A3] и перечислены в *разделе 4.6*.

Глава 5 посвящена оценке физических параметров, главным образом ζ , в абсорбционных системах, исследованных в главах 2 и 3. Во вступительном *разделе 5.1* описаны предыдущие оценки этого параметра, в основном в Млечном Пути, основанные на измеренных распространенностях молекул HD, H₃⁺, OH⁺, H₂O⁺, H₃O⁺ и др. Замечено, что имеется мало оценок скорости ионизации космическими лучами для других галактик, как соседних, так и далеких.

В *разделе 5.2* представлен оригинальный метод оценки ζ по наблюдаемым лучевым концентрациям N_{HD} и N_{H_2} в абсорбционных системах, основанный на модели, разработанной в главе 4. В предложенном методе физические параметры оцениваются путем сравнения решения уравнения (2) с наблюдаемыми распространенностями HD и H₂, используя байесов подход, где апостериорная функция распределения параметров оценивается методом Монте-Карло по схеме марковских цепей. Параметрами уравнения (2) являются металличность, интенсивность УФ излучения, объемная концентрация и скорость ионизации космическими лучами. В принципе, каждый из этих параметров может быть оценен при помощи нашей модели, однако основной целью работы была оценка ζ , так как этот параметр практически не оценивался в других галактиках. Металличность оценивается из анализа линий слабо оседающих на пыли металлов (например, P II или Zn II) и фиксируется в рас-

четах. Для объемной концентрации и интенсивности УФ фона оцениваются априорные вероятности из совместного анализа населенностей вращательных уровней H_2 и уровней тонкой структуры C I [20]. Тогда скорость ионизации космическими лучами является главным параметром, который оценивается из подгонки измеренных значений N_{HD} и N_{H_2} нашей моделью.

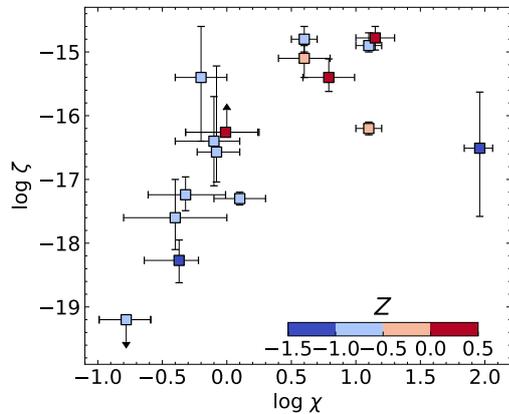


Рис. 4: Зависимость ζ [s^{-1}] от χ (в единицах поля Дрейна [19]). Цветом показана металличность в каждой из систем, значения показаны цветовой шкалой.

В разделе 5.4 произведена оценка ζ в Магеллановых Облаках. Из 24 абсорбционных систем, в которых были найдены молекулы HD, для 11 имеются архивные данные HST, позволяющие оценить населенности уровней тонкой структуры C I . Вместе с населенностями вращательных уровней H_2 они использовались для оценки априорных распределений $n_{\text{H}}^{\text{tot}}$ и χ . Из-за больших неопределенностей лучевых концентраций HD только для абсорбционной системы в спектре звезды Sk-69 246 в БМО измерена скорость ионизации космическими лучами, а еще для пяти оценены верхние пределы на ζ . В остальных системах получить оценку на ζ не удалось. Обсуждается влияние качества и разрешения спектров, полученных телескопом FUSE, на оценку лучевых концентраций HD и, следовательно, на полученные значения скорости ионизации космическими лучами. Показано, что использование спектров высокого разрешения позволит значительно уменьшить неопределенности измерений лучевых концентраций HD и получить более строгие оценки ζ . Результаты этого раздела опубликованы в работе [A7].

В разделе 5.5 выполнена оценка среднего значения ζ в Млечном Пути. Параметр оценивался совместно по всем абсорбционным системам, содержащим HD, используя значения лучевых концентраций HD и H_2 из работы [6]. Априорная вероятность $n_{\text{H}}^{\text{tot}}$ и χ была взята из работы [21]. Получено, что $\zeta = (1.3_{-0.5}^{+1.3}) \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$. Однако необходимо учитывать, что χ и ζ могут достаточно сильно различаться вдоль разных лучей зрения из-за наличия локальных источников. Кроме того, априорные значения $n_{\text{H}}^{\text{tot}}$ и χ , полученные в работе [21], могут отличаться от результатов модели, описанной в работе [20], которая использовалась в остальных разделах главы. Поэтому оценка ζ для отдельных лучей зрения и использование других априорных распределений $n_{\text{H}}^{\text{tot}}$ и χ может привести к смещению среднего значения ζ для Млечного Пути. Результаты этого раздела опубликованы в работе [A4].

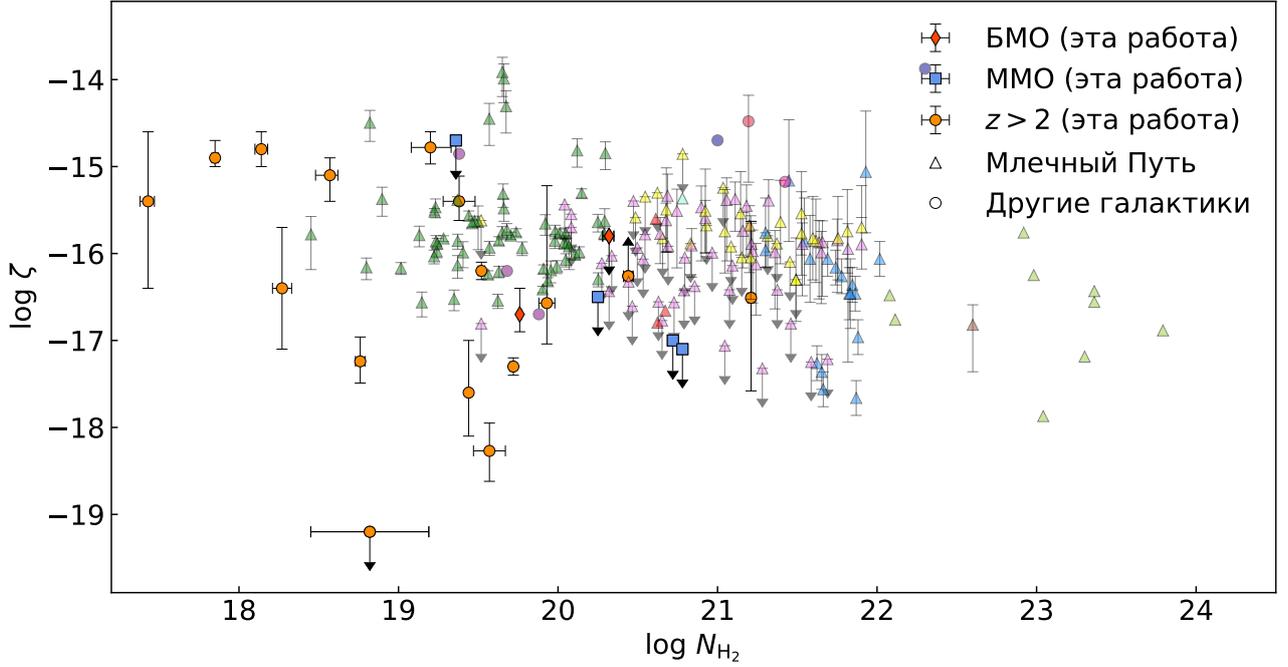


Рис. 5: Значения скорости ионизации космическими лучами как функция лучевой концентрации H_2 . Оранжевые кружки – результаты, полученные нами для DLA систем на красных смещениях $z \gtrsim 2$, голубые квадраты и красные ромбы – значения для Малого и Большого Магеллановых Облаков. Бледные символы показывают известные значения: треугольники – для нашей Галактики (желтые [22], светло-зеленые – из таблицы 6 в работе [23], голубые [24], светло-голубые [25], коричневые [26], фиолетовые [27], темно-зеленые [28]); кружки – для других галактик (голубые [29], фиолетовые [30], розовые [31]).

Результаты оценки ζ в зависимости от N_{H_2} приведены в *разделе 5.6* и показаны на рисунке 5. Получено, что значения скоростей ионизации космическими лучами имеет разброс около трех порядков величины. Также полученные значения сравниваются с уже известными из литературы измерениями в Млечном Пути и в других галактиках. Показано, что значительного уменьшения ζ с увеличением N_{H_2} на нашей выборке не наблюдается. Вероятно, это связано с тем, что в работе рассматривается диффузная среда, в которой лучевая концентрация недостаточно велика для существенных потерь энергии космических лучей. Основные результаты, полученные в этой главе, опубликованы в работах [A4, A5, A7] и представлены в *разделе 5.6*.

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

1. Выполнен систематический поиск молекул HD в абсорбционных системах на красных смещениях $z \gtrsim 2$, содержащих молекулы H_2 . Найденны молекулы HD в пяти системах в спектрах квазаров J 0858+1749, J 1513+0352, J 2347+0051, J 1311+2225 и J 2340–0053. В системах в спектрах квазаров J 1311+2225 и J 2340–0053 молекулы HD были найдены в нескольких компонентах. В 12 системах на лучевые концентрации HD были поставлены верхние пределы. Подтвержден большой разброс относительной лучевой концентрации HD/ H_2 на красных смещениях $z \gtrsim 2$ относительно первичного изотопического отношения $(\text{D}/\text{H})_{\text{p}}$.

2. В спектре квазара J0812+3208 на красном смещении $z = 2.066780$ найдена новая абсорбционная система, содержащая молекулярный водород.
3. Выполнен независимый однородный анализ абсорбционных систем, содержащих молекулы H_2 методом подгонки линий профилем Фойта, в спектрах 48 и 46 звезд в Большом и Малом Магеллановых Облаках, соответственно. Для каждой из систем получены населенности всех вращательных уровней H_2 , линии переходов которых идентифицируются в спектре.
4. В каждой из абсорбционных систем, содержащих H_2 , выполнен поиск молекул HD. Это позволило идентифицировать молекулы HD в 24 системах в Магеллановых Облаках, в 19 из них – впервые. В остальных 70 системах поставлены верхние пределы на лучевые концентрации HD.
5. В спектре звезды AV 242 в ММО найдено неопубликованное ранее высокоскоростное облако, содержащее H_2 .
6. В некоторых абсорбционных системах, содержащих H_2 , выполнен анализ абсорбционных линий C I и определены населенности уровней тонкой структуры. Выполнена независимая оценка металличности по линиям Zn II, S II, P II.
7. Построена простая полуаналитическая модель облака, содержащего HD и H_2 , основанная на решении уравнения баланса между процессами формирования и разрушения молекул HD. Получены выражения для предельных случаев во внешней и центральной частях облака. Произведено сравнение с результатами моделирования кода Meudon PDR. Показано, что при низких металличностях и/или высокой скорости ионизации космическими лучами из-за увеличения скорости формирования HD возможен случай, когда переход D I/HD происходит на меньших глубинах проникновения УФ излучения в облако, чем H I/ H_2 , что приводит к появлению области в облаке, где $HD/2H_2 > D/H$. Получено неравенство, показывающее, при какой комбинации физических параметров реализуется такой случай.
8. Разработан оригинальный метод оценки физических параметров, в частности скорости ионизации космическими лучами, по наблюдаемым лучевым концентрациям молекул HD и H_2 . Выполнены оценки скорости ионизации космическими лучами для 13 DLA систем на красных смещениях $z \gtrsim 2$, двух систем в Большом Магеллановом Облаке и четырех систем в Малом Магеллановом Облаке. Получены значения ζ в диапазоне от $\sim 10^{-18}$ до $\sim 10^{-15} \text{ с}^{-1}$. Получена оценка на среднюю скорость ионизации космическими лучами для Млечного Пути, равная $(1.3_{-0.5}^{+1.3}) \times 10^{-17} \text{ с}^{-1}$.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В публикациях, где соискатель является первым автором, вклад диссертанта является определяющим. В работах, где соискатель не является первым автором, личный вклад указан в скобках.

- [A1] Kosenko D. N., Balashev S. A. HD/H₂ absorption systems at high redshifts // Journal of Physics Conference Series. – 2018. – Vol. 1135, no. 1. – 012009.
- [A2] Kosenko D. N., Balashev S. A. Molecular clouds HD/H₂ in the early Universe // Journal of Physics Conference Series. – 2019. – Vol. 1400, no. 2. – 022012.
- [A3] Balashev S. A., Kosenko D. N. HD/H₂ ratio in the diffuse interstellar medium // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – Vol. 492, no. 1. – L45-L49. (*Вывод основных уравнений, проверка и обсуждение результатов*)
- [A4] Kosenko D. N., Balashev S. A. Constraining of physical conditions in the cold neutral medium using HD/H₂ relative abundance // Journal of Physics Conference Series. – 2020. – Vol. 1697, no. 1. – 012031.
- [A5] Kosenko D. N., Balashev S. A., Noterdaeme P., Krogager J.-K., Srianand R., Ledoux C. HD molecules at high redshift: cosmic ray ionization rate in the diffuse interstellar medium // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – Vol. 505, no. 3. – 3810-3822.
- [A6] Kosenko D.N., Balashev S.A., HD molecules in the Magellanic Clouds // St. Petersburg Polytechnic University Journal – Physics and Mathematics. – 2023. – Vol.15, no. 1.2. – 436-441.
- [A7] Kosenko D.N., Balashev S.A. Cold diffuse interstellar medium of Magellanic Clouds: I. HD molecule and cosmic-ray ionization rate // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – Vol. 525, no. 2. – 2820-2833.
- [A8] Kosenko D.N., Balashev S.A., Klimenko V.V. Cold diffuse interstellar medium of Magellanic Clouds: II. Physical conditions from excitation of C I and H₂ // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2024. – Vol. 528, no. 3. – 5065-5079.

Литература, цитируемая в автореферате

1. Aghanim N., Akrami Y., Ashdown M. et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters // Astron. Astroph.. — 2020. — Vol. 641. — P. A6.
2. Варшалович Д. А., Иванчик А. В., Петижан П. и др. Молекулярные линии HD в абсорбционной системе с красным смещением $z=2.3377$ // Письма в Астрономический журнал. — 2001. — Т. 27. — С. 803–806.
3. Balashev S. A., Noterdaeme P., Rahmani H. et al. CO-dark molecular gas at high redshift: very large H₂ content and high pressure in a low-metallicity damped Lyman alpha system // MNRAS. — 2017. — Vol. 470. — P. 2890–2910.
4. Wakker B. P. A FUSE Survey of High-Latitude Galactic Molecular Hydrogen // Astroph. J. Suppl.. — 2006. — Vol. 163, no. 2. — P. 282–305.
5. Shull J. M., Danforth C. W., Anderson K. L. A Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Survey of Interstellar Molecular Hydrogen in the Galactic Disk // Astroph. J.. — 2021. — Vol. 911, no. 1. — P. 55.

6. Snow T. P., Ross T. L., Destree J. D. et al. A New FUSE Survey of Interstellar HD // *Astroph. J.* — 2008. — Vol. 688. — P. 1124–1136.
7. 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 // *Astroph. J.* — 2012. — Vol. 745, no. 2. — P. 173.
8. Russell S. C., Dopita M. A. Abundances of the Heavy Elements in the Magellanic Clouds. III. Interpretation of Results // *Astroph. J.* — 1992. — Vol. 384. — P. 508.
9. Балашев С. А., Иванчик А. В., Варшалович Д. А. Молекулярные облака HD/H₂ в ранней Вселенной. Проблема первичного дейтерия // *Письма в Астрономический журнал.* — 2010. — Т. 36. — С. 803–815.
10. Liszt H. S. HD/H₂ as a Probe of the Roles of Gas, Dust, Light, Metallicity, and Cosmic Rays in Promoting the Growth of Molecular Hydrogen in the Diffuse Interstellar Medium // *Astroph. J.* — 2015. — Vol. 799. — P. 66.
11. Dvorkin I., Vangioni E., Silk J. et al. Evolution of dispersion in the cosmic deuterium abundance // *MNRAS.* — 2016. — Vol. 458. — P. L104–L108.
12. Black J. H., Dalgarno A. The Cosmic Abundance of Deuterium // *Astroph. J. Lett.* — 1973. — Vol. 184. — P. L101.
13. Le Petit F., Nehmé C., Le Bourlot J., Roueff E. A Model for Atomic and Molecular Interstellar Gas: The Meudon PDR Code // *Astroph. J. Suppl.* — 2006. — Vol. 164, no. 2. — P. 506–529.
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. Dekker H., D’Odorico S., Kaufer A. 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.
16. 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.
17. Moos H. W., Cash W. C., Cowie L. L. et al. Overview of the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Mission // *Astroph. J. Lett.* — 2000. — Vol. 538, no. 1. — P. L1–L6.
18. Sternberg A., Le Petit F., Roueff E., Le Bourlot J. H I-to-H₂ Transitions and H I Column Densities in Galaxy Star-forming Regions // *Astroph. J.* — 2014. — Vol. 790. — P. 10.
19. Draine B. T. Photoelectric heating of interstellar gas // *Astroph. J. Suppl.* — 1978. — Vol. 36. — P. 595–619.

20. Klimenko V. V., Balashev S. A. Physical conditions in the diffuse interstellar medium of local and high-redshift galaxies: measurements based on the excitation of H₂ rotational and C I fine-structure levels // MNRAS. — 2020. — Vol. 498, no. 2. — P. 1531–1549.
21. Jenkins E. B., Tripp T. M. The Distribution of Thermal Pressures in the Diffuse, Cold Neutral Medium of Our Galaxy. II. An Expanded Survey of Interstellar C I Fine-structure Excitations // Astroph. J.. — 2011. — Vol. 734, no. 1. — P. 65.
22. Indriolo N., Geballe T. R., Oka T., McCall Benjamin J. H₃⁺ in Diffuse Interstellar Clouds: A Tracer for the Cosmic-Ray Ionization Rate // Astroph. J.. — 2007. — Vol. 671, no. 2. — P. 1736–1747.
23. Padovani M., Galli D., Glassgold A. E. Cosmic-ray ionization of molecular clouds // Astron. Astroph.. — 2009. — Vol. 501, no. 2. — P. 619–631.
24. Caselli P., Walmsley C. M., Terzieva R., Herbst Eric. The Ionization Fraction in Dense Cloud Cores // Astroph. J.. — 1998. — Vol. 499, no. 1. — P. 234–249.
25. Shaw G., Ferland G. J., Srianand R. et al. On the Enhanced Cosmic-Ray Ionization Rate in the Diffuse Cloud toward ζ Persei // Astroph. J.. — 2008. — Vol. 675, no. 1. — P. 405–412.
26. Maret S., Bergin E. A. The Ionization Fraction of Barnard 68: Implications for Star and Planet Formation // Astroph. J.. — 2007. — Vol. 664, no. 2. — P. 956–963.
27. Indriolo N., McCall B. J. Investigating the Cosmic-Ray Ionization Rate in the Galactic Diffuse Interstellar Medium through Observations of H₃⁺ // Astroph. J.. — 2012. — Vol. 745, no. 1. — P. 91.
28. Indriolo N., Neufeld D. A., Gerin M. et al. Herschel Survey of Galactic OH⁺, H₂O⁺, and H₃O⁺: Probing the Molecular Hydrogen Fraction and Cosmic-Ray Ionization Rate // Astroph. J.. — 2015. — Vol. 800, no. 1. — P. 40.
29. Muller S., Müller H. S. P., Black J. H. et al. OH⁺ and H₂O⁺ absorption toward PKS 1830-211 // Astron. Astroph.. — 2016. — Vol. 595. — P. A128.
30. Shaw G., Rawlins K., Srianand R. Physical conditions in three high-z H₂-bearing DLAs: implications for grain size // MNRAS. — 2016. — Vol. 459, no. 3. — P. 3234–3250.
31. Indriolo N., Bergin E. A., Falgarone E. et al. Constraints on the Cosmic-Ray Ionization Rate in the $z \sim 2.3$ Lensed Galaxies SMM J2135-0102 and SDP 17b from Observations of OH⁺ and H₂O⁺ // Astroph. J.. — 2018. — Vol. 865, no. 2. — P. 127.