

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики
Сектор теоретической астрофизики

Косенко Дарья Николаевна

Молекулы HD в диффузной фазе межзвездной среды

Научный доклад

Специальность:

1.3.1 - Физика космоса, астрономия

Санкт - Петербург

2023

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Межзвёздная среда (МЗС) тесно связана с формированием и эволюцией галактик, так как именно МЗС определяет ключевой процесс галактической эволюции - звездообразование. С другой стороны, звёзды в процессе своей эволюции также влияют на окружающую среду - они обогащают МЗС тяжелыми металлами и пылью, облучают газ ультрафиолетовым (УФ) излучением, космическими лучами (КЛ) и т.д., влияя, таким образом, на распространенности элементов, ионизационные состояния и населенности уровней атомов и молекул.

Молекулярный водород, H_2 , - самая распространенная молекула во Вселенной - один из основных трейсеров холодной фазы МЗС. Его изотопмер, дейтерированный водород, HD, также является одной из самых распространенных молекул во Вселенной, однако характерная распространенность HD меньше распространенности H_2 : $\sim 10^{-5}$.

Так как дипольный момент H_2 равен нулю, а концентрация HD мала, то исследование этих молекул в эмиссии затруднено, поэтому основной способ их изучения - это спектроскопия абсорбционных линий. Облака, содержащие молекулярный водород, можно задетектировать в абсорбции в направлении на яркий фоновый источник, например, квазар (для изучения систем в ранней Вселенной) или звезду класса O или B (для изучения МЗС в Млечном Пути и в соседних галактиках). Абсорбционные линии HD и H_2 находятся в УФ части электромагнитного спектра ($\lambda_{H_2} \lesssim 1100\text{\AA}$), которую сложно наблюдать с поверхности Земли из-за атмосферного поглощения. Но на космологических красных смещениях ($z \sim 2 - 3$) линии сдвигаются в оптическую область и их можно наблюдать на больших наземных телескопах со спектрографами высокого разрешения. Тем не менее,

слепого поиска систем в далеких галактиках, содержащих молекулы HD и H_2 , неэффективен, так как доля холодного газа среди наблюдаемых систем с высокой концентрацией HI мала, $\sim 4\%$ [1], поэтому молекулы H_2 были найдены в $\gtrsim 40$ системах, из них лишь в 12 были задетектированы молекулы HD. Было получено, что отношение HD/ H_2 существенно выше того, что измеряется в нашей Галактике, причем объяснения для этого факта ранее не было предложено. Наблюдения HD и H_2 в локальной Вселенной проводятся уже при помощи космических УФ телескопов, из которых данные наилучшего качества и разрешения получал космический телескоп Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE). Данные FUSE уже использовались для изучения H_2 и HD в нашей Галактике [2, 3] и в Магеллановых Облаках [4]. Магеллановы Облака интересны тем, что средние металличности в этих галактиках ниже, чем в Млечном Пути, и, благодаря близости к нашей Галактике, их можно изучать вдоль различных лучей зрения. Однако, несмотря на то, что молекулы HD были найдены в нескольких системах в Магеллановых Облаках [5, 6], систематический поиск HD не был произведен.

Интерес к распространенности молекул HD заключается в том, что относительная концентрация (как объемная, так и лучевая) HD/ H_2 чувствительна к условиям в молекулярном облаке, а именно, к скорости ионизации космическими лучами, ζ , интенсивности УФ излучения, χ , объемной концентрации газа, n , и металличности, Z . Из них отдельный интерес представляет ζ , так как этот параметр изучался в различных фазах в нашей Галактике, однако, практически не измерялся в других галактиках, как далеких, так и соседних. Тем не менее, космические лучи являются важным источником нагрева МЗС, а также основным источником ионизации в холодной среде, что контролирует образование значительной части молекул в МЗС. Благодаря своей чувствительности к этим параметрам, по измеренным значениям лучевых концентраций молекул HD и H_2 можно оценить

физические условия в среде, в частности, скорость ионизации космическими лучами.

Цели и задачи работы

Целью научно-квалификационной работы является исследование влияния физических условий в системе на концентрацию молекул HD, поиск новых систем, содержащих молекулы HD в ранней Вселенной и в соседних галактиках, а также оценка физических условий в найденных системах.

Поставленные задачи:

1. Построение модели облака межзвёздного газа, содержащего молекулы HD и H₂.
2. Изучение зависимости отношения концентраций $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$ от физических условий в среде (то есть от ζ , χ , n , Z).
3. Разработка метода оценки физических условий в среде (в частности, скорости ионизации космическими лучами) по измеренным лучевым концентрациям молекул HD и H₂.
4. Проведение систематического поиска молекул HD в системах на больших красных смещениях, где ранее были найдены молекулы H₂.
5. Систематический поиск молекул HD в Большом и Малом Магеллановых Облаках, независимый анализ абсорбционных линий H₂ в системах в Магеллановых Облаках.
6. Оценка скорости ионизации космическими лучами в системах, где задетектированы молекулы HD.

Научная новизна

1. Построена простая полуаналитическая модель облака, содержащего молекулы HD и H₂. Показано, что при уменьшении Z увеличивается концентрация HD. Впервые показано, что при уменьшении металличности переход D I/HD может происходить на меньшей глубине облака, чем переход H I/H₂, что ведет к $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2} > \text{D}/\text{H}$ в некоторых областях в облаке.
2. Найдены и проанализированы четыре новые системы, содержащие HD, на больших красных смещениях.
3. Впервые выполнена оценка скорости ионизации космическими лучами в 16 системах на больших красных смещениях.
4. Произведен систематический поиск HD в Большом и Малом Магеллановых Облаках. Найдено 19 новых систем, содержащих HD.
5. Получены ограничения на скорости ионизации космическими лучами в семи системах Магеллановых Облаках.

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, 2018, 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).

Личный вклад автора

Вклад автора в основные результаты научно-квалификационной работы является определяющим. Работы опубликованы в соавторстве с сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Института астрофизики Парижа (Париж, Франция), Южной европейской обсерватории (Сантьяго, Чили) и Межуниверситетского центра астрономии и астрофизики (Пуна, Индия).

Основное содержание работы

1 Модель HD/H₂

1.1 Описание модели

Относительная распространенность молекул HD/H₂ сильно зависит от физических условий в среде, а именно, от скорости ионизации космическими лучами, ζ , объемной концентрации, n , интенсивности УФ излучения, χ , и металличности, Z . В работе [7] мы представили полуаналитическое описание относительной распространенности HD/H₂ в диффузной МЗС в зависимости от этих параметров в системе.

Был рассмотрен плоско-параллельный слой газа с концентрацией водорода n ($n_2 = n/100 \text{ см}^{-3}$) и металличностью Z (относительно солнечной, Z_\odot), облучаемый УФ излучением с одной стороны (интенсивности χ в единицах поля Дрейна [8]) и космическими лучами (скорость первичной ионизации КЛ на атом водорода ζ_p , в единицах 10^{-17} с^{-1}). Температура была зафиксирована на $T = 100 \text{ К}$, так как при типичных температурах холодной фазы диффузной МЗС (50-200 К, см., например, [9]) реакции, рассматриваемые в работе, практически не зависят от температуры. Концентрация HD, n_{HD} , определяется уравнением баланса между процессами формирования и разрушения молекул. Основные реакции формирования

молекул HD - это реакция в газовой фазе



и формирование на поверхности пылинок. Основным канал разрушения HD (как и H₂) - это фотодиссоциация УФ излучением, которая происходит через возбуждение молекулы в верхнее электронное состояние, откуда примерно 15% молекул диссоциируют [10], а остальные, возвращаясь в основное электронное состояние, населяют верхние вращательно-колебательные уровни. При проникновении УФ излучения в облако, линии, в которых происходит фотовозбуждение, становятся насыщенными, скорость фотовозбуждения падает, и, следовательно, скорость фоторазрушения уменьшается. Это так называемый эффект самоэкранирования молекул от УФ излучения [11]. Обычно он описывается функцией самоэкранирования $S(N_{\text{HD}}, N_{\text{H}_2})$, показывающей, как скорость разрушения молекул уменьшается при увеличении лучевых концентраций HD и/или H₂ [12]. Таким образом, уравнение химического баланса для HD выглядит следующим образом:

$$F^{\text{HD}} n_{\text{H}_2} n_{\text{D}^+} + R^{\text{HD}} n n_{\text{D}} = \frac{1}{2} \chi D^{\text{HD}} S^{\text{HD}} e^{-\tau_{\text{g}}} n_{\text{HD}} \quad (2)$$

где справа описывается формирование HD в реакции (1) (первое слагаемое, F^{HD} - скорость реакции (1)) и на пыли (второе слагаемое, R^{HD} - скорость формирования HD на пыли), а слева - разрушение УФ излучением (где D^{HD} - неэкранированная скорость разрушения HD), с учетом самоэкранирования HD и поглощения излучения пылью (оптическая толщина, описывающая поглощение фотонов пылью $\tau_{\text{g}} = \sigma (N_{\text{H}} + 2N_{\text{H}_2})$, где σ - сечение поглощения УФ излучения пылью [13, 14]). Распространенность D⁺, n_{D^+} , в диффузной МЗС определяется в основном зарядово-обменной реакцией с H:



Тогда получаем концентрацию D^+

$$n_{D^+} \approx \frac{k}{k'} \frac{n_{H^+} n_D}{n} \quad (4)$$

где k и k' - это скорости прямой и обратной реакции (3), соответственно. Ионизованный водород в основном образуется в результате ионизации космическими лучами H и H_2 (k_ζ^H и $k_\zeta^{H_2}$, соответственно) и разрушается в результате радиативной рекомбинации, α^{rr} [10] и рекомбинации на пыли α^{gr} (основной канал) [15]:

$$k_\zeta^H n_H + k_\zeta^{H_2} n_{H_2} = \alpha^{rr} n_{H^+} n_e + \tilde{\alpha}^{gr} n_e n_{H^+} \quad (5)$$

Концентрация электронов в холодной фазе МЗС: $n_e \approx n_{H^+} + n_{C^+}$. Тогда степень ионизации в среде:

$$f_{H^+} \equiv \frac{n_{H^+}}{n} = \frac{x_C}{2} \left(\sqrt{\frac{4(k_\zeta^H - f_{H_2}(k_\zeta^H - 0.5k_\zeta^{H_2}))}{(\tilde{\alpha}^{gr} + \alpha^{rr})n x_C^2}} + 1 - 1 \right) \quad (6)$$

где $x_C = n_C/n$ - концентрация углерода ([16], считается, что она линейно масштабируется с металличностью), $f_{H_2} = 2n_{H_2}/(n_H + 2n_{H_2})$ - степень молекуляризации. Тогда, подставляя (4) и (6) в уравнение (2), получаем

$$n_{HD} = n_D (\beta^{\text{chem}} f_{H_2} + \beta^{\text{dust}}) \quad (7)$$

где

$$\beta^{\text{chem}} = \frac{k F^{\text{HD}} n f_{H^+}}{k' \chi D^{\text{HD}} S^{\text{HD}} e^{-\tau_g}} \equiv \frac{\beta_0^{\text{chem}}}{S^{\text{HD}} e^{-\tau_g}} \quad (8)$$

$$\beta^{\text{dust}} = \frac{2R^{\text{HD}} n}{\chi D^{\text{HD}} S^{\text{HD}} e^{-\tau_g}} \equiv \frac{\beta_0^{\text{dust}}}{S^{\text{HD}} e^{-\tau_g}} \quad (9)$$

где β_0^{chem} и β_0^{dust} - это значения β^{chem} и β^{dust} в случае отсутствия экранирования УФ поля, т.е. $S^{\text{HD}} = 1$, $\tau_g = 0$; они могут быть записаны как функции от физических условий и степени молекуляризации H_2 :

$$\beta_0^{\text{chem}} = 0.6 \frac{n_2 Z d_C}{\chi} \left(\sqrt{\frac{0.8 \zeta_p (1 - 0.95 f_{H_2})}{n_2 Z^2 d_C^2 (1 + 15 \chi^{-1} n_2 Z)}} + 1 - 1 \right) \quad (10)$$

$$\beta_0^{\text{dust}} = 1.2 \times 10^{-4} \frac{n_2 Z}{\chi}, \quad (11)$$

где d_C - деплеция углерода, т.е. $n_C = n d_C [C/H] Z$, $[C/H] = 2.7 \times 10^{-4}$ - солнечная распространенность углерода.

Учитывая, что $n_D + n_{\text{HD}} = n_D^{\text{tot}}$, а $n_D^{\text{tot}}/n_H^{\text{tot}} = D/H$, получаем

$$\frac{n_{\text{HD}}}{2n_{\text{H}_2}} = \frac{D}{H} \frac{1}{f_{\text{H}_2}} \left(\frac{1}{\beta^{\text{chem}} f_{\text{H}_2} + \beta^{\text{dust}}} + 1 \right)^{-1} \quad (12)$$

Пользуясь формализмом из работы [14], можно задать f_{H_2} как функцию N_{H_2} и параметра $\alpha \equiv \chi D^{\text{H}_2}/R^{\text{H}_2} n = 1.3 \times 10^4 \chi/n_2 Z$ - отношение скоростей разрушения (без учета экранирования) и образования H_2 . Таким образом, учитывая, что $n_{\text{HD}}/n_{\text{H}_2} = dN_{\text{HD}}/dN_{\text{H}_2}$ (т.е. $N_{\text{HD}} = \int dN_{\text{HD}} = \int \frac{n_{\text{HD}}}{n_{\text{H}_2}} dN_{\text{H}_2}$), уравнение (12) можно переписать как дифференциальное уравнение для лучевых концентраций HD и H_2 . На рисунке 1 показаны рассчитанные профили $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2}$ как функции H_2 для $n_2 = 2$, $\zeta_p = 3$, $\chi = 1$ (что соответствует типичным условиям в холодной фазе диффузной МЗС) для металличностей $Z = 1$ (солнечная металличность, левая панель) и $Z = 0.1$ (правая панель). Из рисунка видно, что при уменьшении металличности отношение HD/ 2H_2 сильно увеличивается и может быть выше, чем изотопическое отношение, что естественным образом объясняет наблюдаемое различие между измерениями HD/ H_2 в Млечном Пути и на больших красных смещениях [18]. Основная причина такого увеличения заключается в увеличении степени ионизации H^+ (и, следовательно, D^+), так как при меньшей металличности уменьшается скорость разрушения H^+ в правой части уравнения (5) за счет уменьшения количества пыли, а также уменьшения количества электронов за счет уменьшения концентрации C I.

Анализируя уравнение (12) можно найти три асимптотики для отношения $n_{\text{HD}}/n_{\text{H}_2}$ (аналогичные асимптотики получаются для отношения $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$, которые показаны на рисунке 1 пунктирными линиями).

- Экранированная область ($S^{\text{HD}} \rightarrow 0$); тогда $\beta^{\text{chem}} \gg 1$, $\beta^{\text{dust}} \gg 1$

$f_{\text{H}_2} \rightarrow 1$. Тогда

$$\frac{n_{\text{HD}}}{2n_{\text{H}_2}} = \frac{\text{HD}}{\text{H}_2} \quad (13)$$

то есть весь водород и дейтерий находится в молекулах H_2 и HD (в нашей модели мы пренебрегли такими реакциями, как разрушение молекул космическими лучами, деплещией на пыли и обогащением дейтерием сложных молекул, которые затрудняют достижение полной молекуляризации даже в самоэкранированной части облака).

- Неэкранированное УФ поле и промежуточные значения f_{H_2} ; тогда для $\log N_{\text{HD}} \lesssim 14$: $S^{\text{HD}} \rightarrow 1$. Для промежуточных значений $f_{\text{H}_2} \gtrsim 10^{-4}$, $\beta_0^{\text{chem}} f_{\text{H}_2} > \beta_0^{\text{dust}}$ и тогда:

$$\frac{n_{\text{HD}}}{2n_{\text{H}_2}} \approx \frac{\text{D}}{\text{H}} \beta_0^{\text{chem}}, \quad (14)$$

- Неэкранированное УФ поле и низкие значения f_{H_2} . Соответствует внешней поверхности облака, где, следуя [14], можно написать $f_{\text{H}_2} = 4/\alpha$ и доминирует слагаемое с β^{dust} (то есть HD образуется преимущественно на пыли, так как концентрации H_2 недостаточно для реакции (1)), поэтому

$$\frac{n_{\text{HD}}}{2n_{\text{H}_2}} = \frac{\text{D}}{\text{H}} \frac{\beta_0^{\text{dust}}}{f_{\text{H}_2}} = \frac{\alpha \text{D}}{4 \text{H}} \beta_0^{\text{dust}} = \frac{\text{D}}{\text{H}} \frac{R^{\text{HD}} D^{\text{H}_2}}{2R^{\text{H}_2} D^{\text{HD}}} \approx 1.6 \frac{\text{D}}{\text{H}}. \quad (15)$$

1.2 Переход $\text{D I}/\text{HD}$

Согласно записанным выражениям, концентрация n_{HD} увеличивается с глубиной проникновения УФ излучения в облако (определяемой H_{H_2}) до значения $n_{\text{D}}^{\text{tot}}$. С другой стороны, n_{D} уменьшается с $n_{\text{D}}^{\text{tot}}$. Тогда должна быть точка перехода, которой $n_{\text{D}} = n_{\text{HD}}$, которую можно получить из уравнения (7):

$$\beta^{\text{chem}} f_{\text{H}_2} + \beta^{\text{dust}} \approx 1. \quad (16)$$

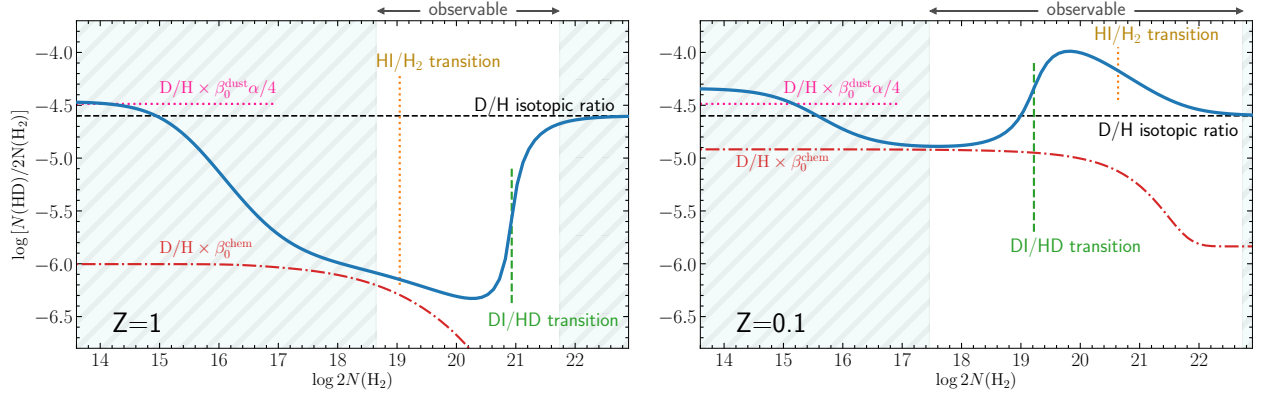


Рис. 1: $\log N(\text{HD})/N(\text{H}_2)$ как функция от $\log N(\text{H}_2)$ для $n_2 = 2$, $T = 100$ К, $\chi = 1$ и $\zeta_p = 3$, но для значений $Z = 1$ и $Z = 0.1$ на левой и правой панелях, соответственно. Сплошная голубая кривая показывает решение уравнения (12), розовая пунктирная линия показывает асимптотику в неэкранированной части облака (15), красная штрих-пунктирная линия - это асимптотика в случае (14) и черная пунктирная линия соответствует изотопическому отношению D/H. Зеленая и оранжевая вертикальные пунктирные линии показывают лучевую концентрацию H_2 для переходов DI/HD (17) и HI/ H_2 [17], соответственно. Область $\log N(\text{HD})/N(\text{H}_2)$, которая может наблюдаться с современными инструментами рассчитывалась в предположении $\log N_{\text{HD}} > 12.5$ и $A_V < 3$.

Обычно в МЗС $\beta^{\text{chem}} f_{\text{H}_2} \gg \beta^{\text{dust}}$ для перехода DI/HD, тогда концентрация N_{H_2} , при которой происходит этот переход, можно получить из уравнения

$$f_{\text{H}_2} \approx (\beta_0^{\text{chem}})^{-1} S^{\text{HD}} e^{-\tau_g}. \quad (17)$$

Из рисунка 1 видно, что для низких металличностей переход DI/HD (показанная зеленой вертикальной пунктирной линией) может происходить раньше, чем переход HI/ H_2 (оранжевая вертикальная линия), что ведет к $N_{\text{HD}}/2N_{\text{H}_2} > \text{D}/\text{H}$ в этих областях. В этом случае по концентрациям HD/ H_2 нельзя оценивать даже верхний предел на изотопическое отношение D/H.

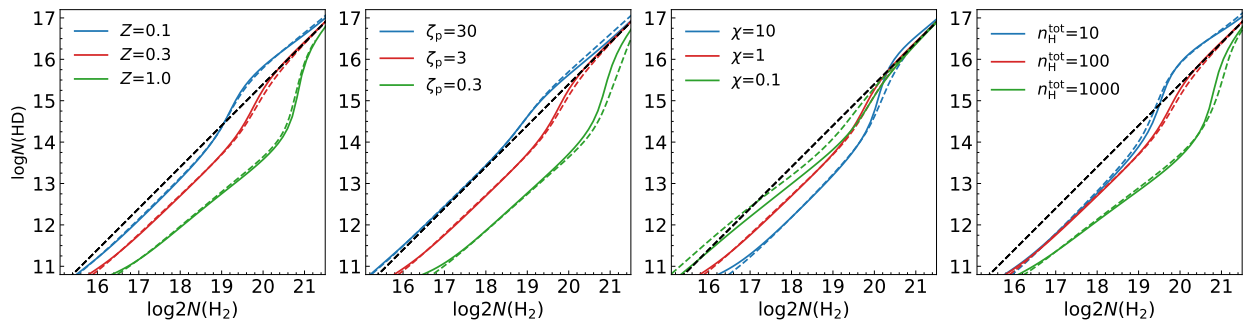


Рис. 2: Зависимость $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$ от физических параметров с МЗС. Красные кривые показывают базовую модель с $Z = 0.3$, $\chi = 1$, $\zeta_p = 3$ и $n = 100 \text{ см}^{-3}$. Каждая панель соответствует изменению одного из параметров базовой модели: металличности, скорости ионизации космическими лучами, интенсивности УФ излучения и объемной концентрации слева направо, соответственно. Сплошные кривые показывают решение уравнения (12), а пунктирные кривые - расчеты кодом Meudon PDR. Черная пунктирная линия соответствует изотопическому отношению D/H.

1.3 Сравнение с Meudon PDR code

Чтобы проверить наши расчеты, мы использовали код Meudon PDR [19]. Мы рассмотрели слой газа, облучаемый УФ излучением (со спектром поля Дрейна [8]) с одной стороны и посчитали несколько моделей при фиксированной однородной температуре $T = 100 \text{ К}$. Базовая модель имела параметры $Z = 0.3$, $\zeta_p = 3$, $n = 100 \text{ см}^{-3}$, $\chi = 1$. Затем мы меняли независимо Z , ζ_p , n и χ в пределах значений $(0.1, 0.3, 1)$, $(0.3, 3, 30)$, $(10, 100, 1000)$ и $(0.1, 1, 10)$, соответственно. На рисунке 2 видно, что наши расчеты (сплошные кривые) находятся в хорошем согласии с результатами кода Meudon PDR (пунктирные кривые).

2 HD на больших красных смещениях

В предыдущем разделе было показано, что относительная распространенность молекул HD, $N_{\text{HD}}/N_{\text{H}_2}$, увеличивается в системах с низкой металлич-

ностью (см. правую панель рисунка 1). Это также подтверждается наблюдениями на больших красных смещениях (где металличность в среднем на порядок ниже солнечной) и в нашей Галактике, см. например [3, 20, 21].

2.1 Системы, содержащие HD

В работе [22] мы провели систематический поиск HD во всех известных системах на больших красных смещениях, содержащих H₂. Мы использовали спектры квазаров, полученные на спектрографах среднего и высокого разрешения: X-shooter ($R \sim 6000$) и Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph (UVES, $R \sim 50000$) на телескопе Very Large Telescope (VLT) и High Resolution Echelle Spectrograph (HIRES, $R \sim 50000$) на телескопе Кеэк.

Для анализа абсорбционных линий мы использовали подгонку многокомпонентным профилем Фойта. Непоглощенный континуум был проведен на глаз, используя интерполяцию сплайном в областях, где не было абсорбционных линий. Спектральные пиксели, которые использовались для подгонки, были выбраны также на глаз, чтобы уменьшить вклад от блендирования другими линиями (в основном линиями Ly α леса); при анализе линии подгонялись одновременно. Наилучшие оценки и доверительные интервалы параметров (параметры Доплера, b , лучевые концентрации, N , красные смещения, z) были получены на основе постериорной функции распределения, полученной с использованием Байесова подхода. Для сравнения данных и модели использовалась стандартная функцию правдоподобия χ^2 . Чтобы получить апостериорную функцию распределения для параметров, мы использовали метод Монте-Карло по схеме Марковских цепей [9]. Для оценки параметров и их неопределенностей, мы использовали максимум апостериорной функции и доверительные интервалы содержащие 68.3% апостериорной функции распределения (соответствует 1σ для нормального распределения), соответственно. Чтобы получить верхние

пределы, были использованы доверительные интервалы на уровне 1σ . Для большинства спектров, полученных на X-shooter, разрешение не позволяет разрешить скоростную структуру, поэтому некоторые линии HD оказываются в насыщенном режиме. Для некоторых систем лучевые концентрации и параметры Доплера для HD оказались вырожденными, что приводило к большим неопределенностям в ограничениях на параметры. Поэтому мы использовали приоры на количество компонент, их красные смещения и параметры Доплера из анализа линий H_2 либо CI (см., например, [23]), так как для подгонки линий H_2 обычно используется большое количество линий, а линии CI находятся в области, где нет линий $Ly\alpha$ леса, затрудняющих анализ. Кроме того, в спектрах X-shooter определение континуума для HD оказалось нетривиальной задачей, поэтому мы также оценивали дополнительную неопределенность, связанную с положением континуума.

Результаты новых измерений HD (а также H_2 для некоторых систем) показаны в таблице 1. Мы выполнили четыре новых измерения HD на больших красных смещениях (в некоторых системах было по несколько компонент) и поставили верхние пределы на лучевые концентрации в 12 системах. Пример подгонки линий для системы в направлении на J0858+1749 показан на рисунке 3. На рисунке 4 наши результаты сравниваются с уже известными результатами на больших красных смещениях и в Млечном Пути и с первичным изотопическим отношением D/H. Из рисунка видно, что отношения HD/ H_2 (измеряемые как $N_{HD}/2N_{H_2}$), полученные для Галактики, ниже, чем D/H, в то время как измерения на больших красных смещениях такую тенденцию не показывают, наоборот, HD/ H_2 в далеких галактиках ближе к изотопическому отношению. Известно, что средняя металличность на больших красных смещениях ниже, чем в нашей Галактике, так как в ранней Вселенной меньше газа прошло через процессы звездообразования и, таким образом, меньше обогатилось тяжелыми элементами. При этом, в процессе звездообразования дейтерий не нарабаты-

вается, а лишь разрушается (так называемый процесс астрации), поэтому при меньших металличностях ожидается бóльшая концентрация дейтерия. Тем не менее, моделирование [25] показало, что D/H в результате процессов звездообразования в МЗС уменьшается не более чем на 1/3 от своего первичного значения, поэтому астрация не может объяснить такое различие в наблюдаемых данных. С другой стороны, в предыдущем разделе было показано, что низкая металличность влияет на скорость образования молекул HD, увеличивая ее, таким образом, наблюдаемое различие объясняется естественным образом.

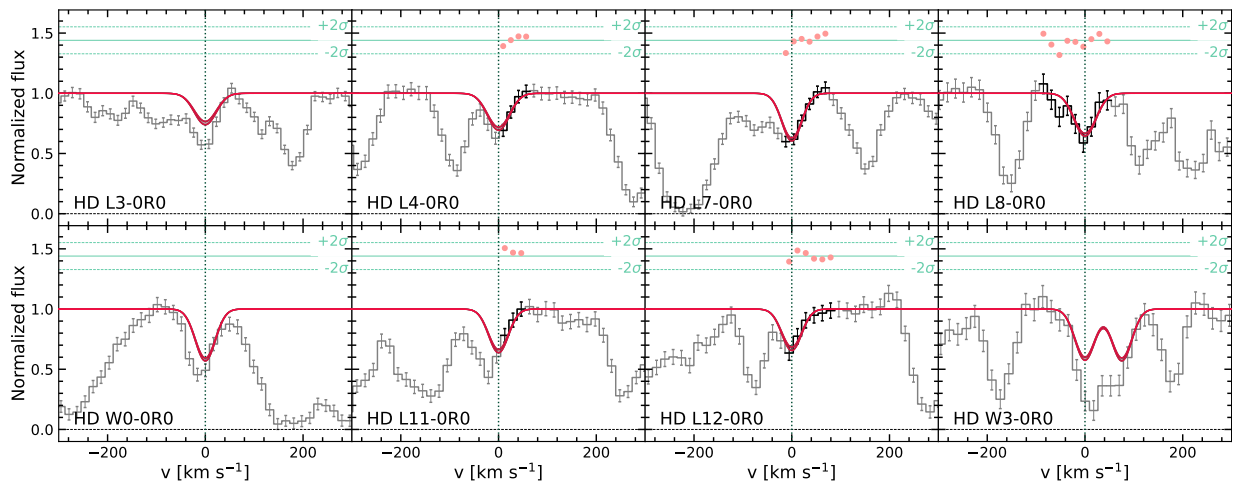


Рис. 3: Подгонка абсорбционных линий HD в абсорбционной системе на $z = 2.62524$ в направлении на J0858+1749. Серые и черные линии показывают весь спектр и пиксели, использованные для расчетов, соответственно. Красная линия показывает рассчитанный профиль линии HD. Область между линиями описывает 68% доверительный интервал для моделей, построенные на основе полученной постериорной функции распределения параметров. Красные точки на верхней части каждой панели показывают невязку. Вертикальные штриховые линии соответствуют центральной позиции скоростной компоненты.

Таблица 1: Результаты анализа линий HD в далеких галактиках.

Quasar	z	b (km s $^{-1}$)	$\log N(\text{HD})$	$\log N(\text{H}_2)$	$N(\text{HD})/2N(\text{H}_2)$
X-shooter data:					
J 0136+0440	2.779430	$7.7^{+2.4}_{-1.9}$	< 14.5	$18.64^{+0.06}_{-0.08}$	$< 3.6 \times 10^{-5}$
J 0858+1749	2.625241	$7.9^{+0.4}_{-0.4}$	$14.87^{+0.06}_{-0.09}$	$19.72^{+0.01}_{-0.02}$	$(7.1^{+1.1}_{-1.4}) \times 10^{-6}$
J 0906+0548	2.569180	$6.8^{+0.1}_{-0.1}$	< 14.7	$18.87^{+0.02}_{-0.02}$	$< 3.4 \times 10^{-5}$
J 0917+0154 ^a	2.10586	$5.2^{+1.1}_{-1.8}$	< 12	$17.96^{+0.82}_{-0.16}$	$< 5.5 \times 10^{-7}$
	2.10624	$6.4^{+1.5}_{-2.4}$	< 15.9	$18.4^{+1.0}_{-0.3}$	$< 1.6 \times 10^{-3}$
	2.106812	$4.7^{+1.1}_{-1.3}$	< 18.1	$20.09^{+0.07}_{-0.08}$	$< 5.1 \times 10^{-3}$
J 0946+1216	2.606406	$9.8^{+0.8}_{-0.3}$	< 15.2	$19.96^{+0.01}_{-0.02}$	$< 9.0 \times 10^{-6}$
J 1143+1420	2.3228054	$2.2^{+2.0}_{-0.6}$	< 15	$18.3^{+0.1}_{-0.1}$	$< 2.5 \times 10^{-4}$
J 1146+0743	2.839459	$7.6^{+0.1}_{-0.4}$	< 14.5	$17.94^{+0.11}_{-0.13}$	$< 1.8 \times 10^{-4}$
	2.841629	$11.4^{+0.5}_{-0.7}$	< 14.4	$18.76^{+0.01}_{-0.01}$	$< 2.2 \times 10^{-5}$
J 1236+0010	3.03292	$2.3^{+0.2}_{-0.2}$	< 16.1	$19.76^{+0.01}_{-0.01}$	$< 1.1 \times 10^{-4}$
J 1513+0352	2.463598	$3.9^{+0.3}_{-0.3}$	$17.42^{+0.64}_{-1.09}$	$21.31^{+0.01}_{-0.01}$	$(6.4^{+2.1}_{-5.9}) \times 10^{-5}$
J 2232+1242	2.2279378	$8.1^{+1.1}_{-1.2}$	< 13.8	$18.56^{+0.02}_{-0.02}$	$< 8.7 \times 10^{-4}$
J 2347+0051	2.587971	$6.2^{+0.2}_{-0.2}$	$14.33^{+0.18}_{-0.16}$	$19.44^{+0.01}_{-0.01}$	$(3.9^{+2.0}_{-1.2}) \times 10^{-6}$
High-resolution data:					
HE 0027–1836	2.4018258	$1.2^{+0.1}_{-0.2}$	< 13.6	$17.43^{+0.02}_{-0.02}$	$< 7.4 \times 10^{-5}$
J 0812+3208	$2.066780^{(+1)}_{(-1)}$	$4.4^{+0.1}_{-0.1}$	< 14.4	$19.26^{+0.02}_{-0.01}$	$< 7.4 \times 10^{-6}$
J 0816+1446 ^a	$3.287252^{(+3)}_{(-2)}$	$0.6^{+0.1}_{-0.1}$	< 14.9	$16.97^{+0.09}_{-0.10}$	$< 4.3 \times 10^{-3}$
	$3.287399^{(+2)}_{(-3)}$	$1.5^{+0.1}_{-0.1}$	< 14	$18.43^{+0.04}_{-0.03}$	$< 1.9 \times 10^{-5}$
	$3.287515^{(+2)}_{(-3)}$	$1.1^{+0.1}_{-0.1}$	< 14.2	$17.60^{+0.10}_{-0.10}$	$< 2.0 \times 10^{-4}$
J 1311+2225	$3.091410^{(+21)}_{(-14)}$	$8.0^{+4.6}_{-5.4}$	< 12.8	$17.87^{+0.37}_{-0.33}$	$< 4.4 \times 10^{-6}$
	$3.0915397^{(+66)}_{(-77)}$	$5.4^{+0.8}_{-0.8}$	$14.82^{+0.08}_{-0.08}$	$19.52^{+0.02}_{-0.02}$	$(1.0^{+0.3}_{-0.2}) \times 10^{-5}$
	$3.091714^{(+28)}_{(-48)}$	$\lesssim 2.8$	$14.30^{+0.37}_{-0.31}$	$18.25^{+0.22}_{-0.39}$	$(5.6^{+13.7}_{-3.2}) \times 10^{-5}$
	$3.091871^{(+11)}_{(-26)}$	$4.0^{+1.6}_{-1.2}$	$14.27^{+0.10}_{-0.13}$	$18.57^{+0.05}_{-0.09}$	$(2.5^{+0.9}_{-0.7}) \times 10^{-6}$
	Total:		$15.02^{+0.11}_{-0.07}$	$19.59^{+0.01}_{-0.01}$	$(1.3^{+0.4}_{-0.2}) \times 10^{-5}$
J 2140–0321	$2.33996^{(+3)}_{(-3)}$	$4.5^{+0.9}_{-0.7}$	< 14.6	$20.13^{+0.07}_{-0.07}$	$< 1.5 \times 10^{-6}$
J 2340–0053 ^a	$2.0541703^{(+6)}_{(-4)}$	$2.5^{+0.1}_{-0.1}$	< 13.5	$15.99^{+0.04}_{-0.04}$	$< 1.7 \times 10^{-3}$
	$2.0542913^{(+4)}_{(-9)}$	$1.7^{+0.1}_{-0.2}$	< 12.7	$15.24^{+0.04}_{-0.03}$	$< 1.4 \times 10^{-3}$
	$2.054528^{(+3)}_{(-3)}$	$3.0^{+0.1}_{-0.2}$	< 13.8	$17.11^{+0.12}_{-0.14}$	$< 2.2 \times 10^{-4}$
	$2.054610^{(+1)}_{(-1)}$	$1.0^{+0.1}_{-0.3}$	$13.60^{+0.15}_{-0.14}$	$18.27^{+0.06}_{-0.06}$	$(1.1^{+0.5}_{-0.3}) \times 10^{-5}$
	$2.054723^{(+3)}_{(-3)}$	$3.1^{+0.1}_{-0.1}$	$13.84^{+0.05}_{-0.05}$	$18.14^{+0.04}_{-0.04}$	$(2.5^{+0.4}_{-0.3}) \times 10^{-5}$
	$2.0549952^{(+5)}_{(-4)}$	$3.8^{+0.1}_{-0.1}$	< 12.6	$16.43^{+0.03}_{-0.03}$	$< 7.1 \times 10^{-5}$
	$2.0551398^{(+6)}_{(-4)}$	$1.8^{+0.1}_{-0.1}$	$13.29^{+0.15}_{-0.21}$	$17.43^{+0.04}_{-0.05}$	$(3.6^{+1.6}_{-0.3}) \times 10^{-5}$
	Total:		$14.11^{+0.06}_{-0.06}$	$18.57^{+0.02}_{-0.02}$	$(1.7^{+0.3}_{-0.2}) \times 10^{-5}$

^a Эти системы были заново проанализированы, чтобы получить самосогласованные результаты для HD, H₂ и C I.

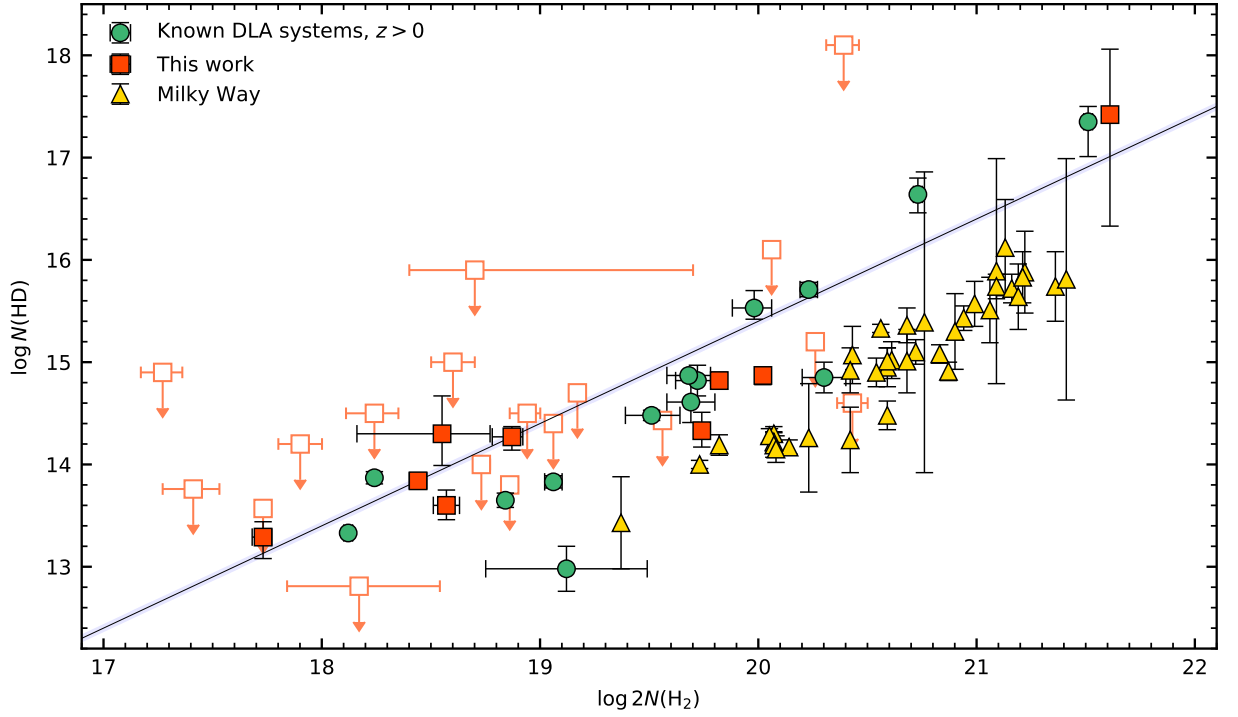


Рис. 4: Относительная распространенность молекул HD и H₂. Зеленые, красные и желтые символы соответствуют известным системам на больших красных смещениях, содержащим HD (ссылки см. в работе [22]), новым измерениям (и верхним пределам) на HD на больших красных смещениях (заполненные и пустые символы, см. таблицу 1) и измерениям в нашей Галактике [3], соответственно. Сплошная голубая прямая показывает первичное изотопическое отношение D/H [24].

2.2 Оценка физических условий

Измеренные значения лучевых концентраций HD и H₂ позволяют оценивать физические условия в среде, так как из уравнения (12) видно, что отношение HD/H₂ зависит от ζ , n , χ и Z . Для металличности мы использовали оценки, полученные из анализа линий металлов, и зафиксировали их для дальнейших расчетов. Чтобы получить апостериорное распределение для остальных параметров, мы использовали метод Монте-Карло по схеме Марковских цепей. Для интенсивности УФ излучения и объемной концентрации мы использовали приоры, полученные из совместного

анализа относительно населенности вращательных уровней H_2 и уровней тонкой структуры C I [23, 26, 27]. Это позволило получить более жесткие ограничения на функцию распределения ζ .

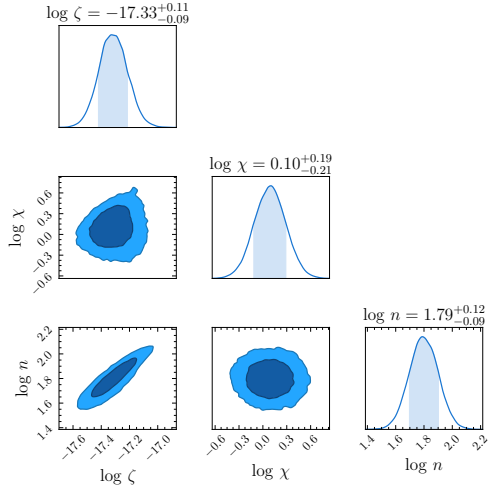


Рис. 5: Апостериорная функция распределения для ζ , χ и n для системы на $z = 2.625241$ в направлении на J 0858+1749. Диагональные панели показывают одномерные маргинализованные постериорные функции распределения, заполненные области соответствуют доверительному интервалу 1σ , недиагональные показывают двухмерные апостериорные функции, где темно- и светлоголубые области соответствуют доверительным интервалам на уровне 1σ и 2σ , соответственно.

Мы оценили физические условия в новых системах, а также в некоторых уже известных системах, содержащих HD. Пример апостериорного распределения для системы в направлении на J 0858+1749 показан на рисунке 5, а полученные физические условия представлены в таблице 2 (мы не смогли получить ограничения на ζ в системах в направлении на J 1513+0352 и J 1311+2225 (компонента 3) из-за больших неопределенностей на лучевые концентрации HD). На рисунке 9 оранжевыми символами показаны значения скорости ионизации космическими лучами, полученные нами, в сравнении с известными значениями для других галактик и для Млечного Пути. На нашей выборке не видно значимого уменьшения ζ при увеличении N_{H_2} , предсказанное ранее [28], вероятно, из-за того, что в наша выборка содержит преимущественно диффузные облака, с недостаточно большой концентрацией. Система в направлении на J 0812+3208 (компо-

Таблица 2: Оценки физических параметров

Quasar	$\log \zeta$	$\log \chi$	$\log n$	Ref. [†]
J 0000+0048	$\gtrsim -16.3$	$0.0^{+0.3}_{-0.3}$	$1.2^{+0.5}_{-0.4}$	(2)
Q 0528–2505	$-14.9^{+0.2}_{-0.1}$	$1.1^{+0.1}_{-0.1}$	$2.4^{+0.1}_{-0.1}$	(3)
J 0812+3208, c1	$-16.6^{+1.4}_{-0.5}$	$-0.1^{+0.2}_{-0.1}$	$2.4^{+0.2}_{-0.2}$	(2)
J 0812+3208, c2	$\lesssim -19.2$	$-0.8^{+0.2}_{-0.2}$	$0.8^{+0.3}_{-0.3}$	(2)
J 0843+0221	$-16.5^{+0.9}_{-1.1}$	$2.0^{+0.1}_{-0.1}$	$1.9^{+0.1}_{-0.1}$	(2)
J 0858+1749	$-17.3^{+0.1}_{-0.1}$	$0.1^{+0.2}_{-0.2}$	$1.8^{+0.1}_{-0.1}$	(1)
J 1232+0815	$-18.3^{+0.3}_{-0.3}$	$-0.4^{+0.2}_{-0.2}$	$1.6^{+0.1}_{-0.1}$	(2)
J 1237+0647	$-14.8^{+0.2}_{-0.2}$	$1.1^{+0.1}_{-0.1}$	$1.3^{+0.1}_{-0.1}$	(2)
J 1311+2225, c2	$-16.2^{+0.1}_{-0.1}$	$1.1^{+0.1}_{-0.1}$	$1.7^{+0.2}_{-0.2}$	(4)
J 1311+2225, c3	–	$1.0^{+0.1}_{-0.1}$	$1.9^{+0.1}_{-0.1}$	(4)
J 1311+2225, c4	$-15.1^{+0.2}_{-0.3}$	$0.6^{+0.2}_{-0.2}$	$2.1^{+0.3}_{-0.2}$	(4)
J 1439+1118	$-15.4^{+0.3}_{-0.2}$	$0.8^{+0.2}_{-0.2}$	$0.9^{+0.2}_{-0.2}$	(2)
J 1513+0352	–	$0.6^{+0.3}_{-0.2}$	$1.9^{+0.1}_{-0.2}$	(2)
J 2100–0641	$-17.2^{+0.3}_{-0.2}$	$-0.3^{+0.3}_{-0.3}$	$1.4^{+0.3}_{-0.3}$	(2)
J 2340–0053, c4	$-16.4^{+0.7}_{-0.7}$	$-0.1^{+0.2}_{-0.3}$	$0.6^{+0.3}_{-0.4}$	(4)
J 2340–0053, c5	$-14.8^{+0.2}_{-0.2}$	$0.6^{+0.1}_{-0.1}$	$1.2^{+0.1}_{-0.1}$	(4)
J 2340–0053, c7	$-15.4^{+0.8}_{-1.0}$	$-0.2^{+0.2}_{-0.2}$	$0.8^{+0.4}_{-0.4}$	(4)
J 2347+0051	$-17.6^{+0.6}_{-0.5}$	$-0.4^{+0.4}_{-0.4}$	$2.8^{+0.1}_{-0.1}$	(1)

[†] Приоры на χ и n взяты из работ: (1) [23], (2) [26], (3) [27], (4) эта работа.

нента 2) скорее всего является выбросом и нуждается в дополнительном анализе.

3 HD в Магеллановых Облаках

Большое и Малое Магеллановы Облака (БМО и ММО, соответственно) - это ближайшие к Млечному Пути карликовые галактики. Благодаря близкому расстоянию от нашей Галактики они дают уникальную возможность изучения низкометаллической МЗС галактик вдоль различных лучей зрения в направлении на яркие звезды. Расстояние до БМО около 50 кпк, металличность $\sim 0.5Z_{\odot}$ [29, 31]. ММО находится на расстоянии около 62 кпк и имеет металличность $\sim 0.2Z_{\odot}$ [30, 31], сравнимую со средней металличностью в галактиках на больших красных смещениях.

Из-за атмосферного поглощения в УФ области спектра для наблюдений линий HD и H_2 необходимо использовать космические УФ телескопы. Спектры наилучшего качества и разрешения были получены космическим телескопом Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE), который наблюдал на 907-1187 Å и имел номинальное разрешение $R \sim 20000$. В работе [32] были собраны и обработаны все наблюдения FUSE в Магеллановых Облаках (FUSE Magellanic Clouds Legacy Project), а, используя эти данные, в работе [4] были найдены молекулы H_2 в 80 системах в БМО и в 65 системах в ММО. Среди них мы отобрали те системы, в которых $\log N_{H_2} \gtrsim 18$, так как качество спектров FUSE не позволяет задетектировать $\log N_{HD} \lesssim 13$ (типичная измеряемая относительная концентрация $N_{HD}/N_{H_2} \lesssim 10^{-5}$). Таким образом, наша выборка содержит 48 систем в БМО и 46 систем в ММО.

Наблюдения FUSE обычно содержат несколько экспозиций, полученных на разных каналах (прибор состоит из детекторов двух типов: LiF и SiC, каждый из которых разделен на 4 сегмента: 1A, 1B, 2A и 2B, поэтому одно наблюдение обычно содержит 8 спектров). Мы использовали спектры из канала 1A LiF, так как они покрывают большую часть линий HD и H_2 и обладают высокой чувствительностью [33]. К сожалению, большая часть спектров FUSE плохо откалибрована по длине волны, поэтому мы примени-

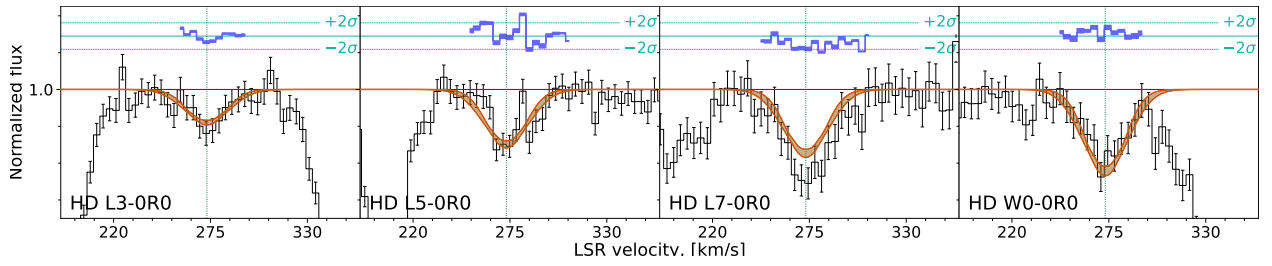


Рис. 6: Подгонка абсорбционных линий HD в направлении на Sk-69 246. Черные линии показывают спектр, красные линии показывают полученные модельные линии HD. Область между красными линиями была рассчитана из постериорной функции распределения параметров подгонки. Голубые точки в верхней части панели показывают невязку. Здесь показана только компонента, соответствующая скорости движения БМО.

ли процедуру, позволяющую улучшить качество калибровки. Сначала мы сложили все доступные экспозиции из канала 1A LiF, предполагая одинаковый сдвиг для каждой отдельной экспозиции. Сдвиг между экспозициями мы получали, используя процедуру кросс-корреляции [34, 35]. Из этого спектра мы получали грубые оценки на лучевые концентрации, параметры Доплера и красные смещения компонент H_2 , которые затем применяли для построения синтетического спектра H_2 . Этот спектр был использован в качестве темплейта для поиска зависимости сдвига от длины волны в каждой экспозиции. Бралась только тонкие, неблендированные линии и из процедуры кросс-корреляции находились сдвиги относительно соответствующих линий синтетического спектра. Затем полученные точки аппроксимировались кусочно-заданной линейной функцией, которая затем использовались для получения финальной экспозиции.

Чтобы сделать анализ однородным, мы проанализировали не только линии HD, но также заново проанализировали H_2 . Анализ был проведен аналогично тому, что был описан в разделе 2, но для верхних пределов были использованы более осторожные доверительные интервалы на уровне 3σ (99.7%). Кроме того, мы не учитывали неопределенность в положении

континуума для линий HD, так как сложение экспозиций значительно улучшило отношение сигнала к шуму.

При подгонке линий H_2 мы использовали все вращательные уровни, которые были видны в спектре (обычно $J \lesssim 5$). Положения линий (которые описываются красным смещением или сдвигом по скорости) были зафиксированы для всех вращательных уровней каждой из компонент, но параметры Доплера для каждого J варьировались (кроме верхних уровней в некоторых системах, где значения b оказались слишком неопределёнными, тогда для таких уровней брались b с уровня ниже). Кроме того, мы использовали две "штрафные" функции [22, 36], чтобы получить гладкую форму диаграммы населенности вращательных уровней H_2 , а также учесть возможный рост параметра Доплера с увеличением номера вращательного уровня [37, 38].

Номинальное разрешение спектров, полученных FUSE, $R = \lambda/\Delta\lambda = 20000$, однако мы заметили, что в результате сложения экспозиций, применения процедуры для улучшения калибровки и других систематических эффектов разрешение может ухудшаться, поэтому при подгонке линий H_2 R было выбрано варьируемым параметром. В большинстве систем мы нашли, что $R \sim 11000 - 18000$.

Линии HD мы искали на сдвигах по скоростям, соответствующих компонентам H_2 . Чтобы получить лучевые концентрации HD мы использовали приоры на параметры Доплера из анализа H_2 $J = 0$ (кроме систем, где HD можно было задетектировать, там b были свободными варьируемыми параметрами).

Мы смогли задетектировать HD лишь в 24 системах (в 19 из них впервые), в остальных системах мы смогли поставить только верхние пределы на лучевые концентрации. Пример подгонки линий HD показан на рисунке 6. На рисунке 7 показаны измеренные значения HD и H_2 , и они сравниваются с уже известными измерениями в нашей Галактике [3] и на больших

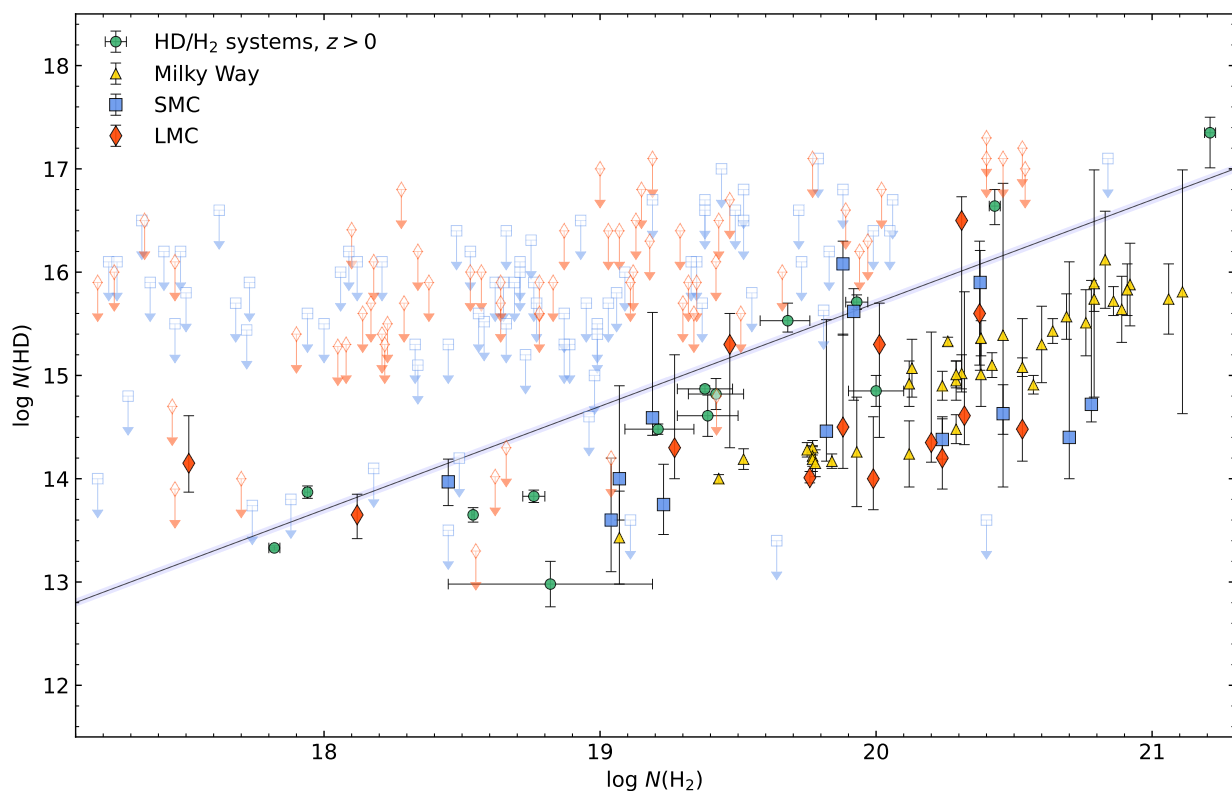


Рис. 7: Относительная распространенность молекул HD и H₂. Измерения в Большом и Малом Магеллановых Облаках показаны заполненными голубыми и красными символами, соответственно. Пустыми символами показаны верхние пределы на лучевые концентрации HD на уровне 3σ . Зелеными кружками показаны измерения в направлении на далекие квазары (см. раздел 2), желтые треугольники показывают измерения в нашей Галактике [3], сплошная голубая линия показывает первичное изотопическое отношение D/H [24].

красных смещениях (см. раздел 2). Из рисунка виден большой разброс в относительной распространенности HD/H₂ в Магеллановых Облаках (≈ 2 порядка величины), что, вероятно, отражает различие в физических условиях в наблюдаемых системах.

Используя измеренные значения лучевых концентраций HD в системах, где были сделаны измерения, мы сделали оценку скорости ионизации космическими лучами, используя подход, описанный в разделах 1 и 2. Чтобы

Таблица 3: Физические условия в системах, ассоциированных с БМО и ММО.

Звезда	[X/H]	X	$\log n[\text{cm}^{-3}]$	$\log \chi$	$\log \zeta[\text{s}^{-1}]$
БМО					
Sk-71 46 [†]	–	–	$2.50^{+0.32}_{-0.28}$	$1.24^{+0.27}_{-0.20}$	$\lesssim -15.8$
Sk-69 246	$-0.65^{+0.05}_{-0.05}$	Zn	$2.06^{+0.20}_{-0.20}$	$1.36^{+0.50}_{-0.41}$	$-17.14^{+0.66}_{-0.35}$
ММО					
AV 26	$-0.96^{+0.06}_{-0.06}$	Zn	$1.92^{+0.24}_{-0.17}$	$-0.08^{+0.29}_{-0.29}$	$\lesssim -14.5$
AV 80	$-1.16^{+0.05}_{-0.05}$	Zn	$2.01^{+0.16}_{-0.25}$	$\lesssim 0.93^{+0.29}_{-0.20}$	$\lesssim -17.5$
AV 486	$-0.83^{+0.06}_{-0.06}$	Zn	$1.77^{+0.19}_{-0.22}$	$0.53^{+0.21}_{-0.25}$	$\lesssim -15.8$
AV 488	$-0.81^{+0.05}_{-0.06}$	Zn	$1.69^{+0.33}_{-0.32}$	$-0.02^{+0.35}_{-0.30}$	$\lesssim -17.0$
Sk 191	$-1.51^{+0.06}_{-0.06}$	Zn	$2.59^{+0.42}_{-0.28}$	$1.11^{+0.20}_{-0.29}$	$\lesssim -18.1$

Колонки в таблице: (i) название звезды; (ii) металличность; (iii) элемент, использовавшийся для оценки металличности; (iv) оценка объемной концентрации; (v) оценка интенсивности УФ поля в единицах поля Матиса [39]; (vi) ограничение на скорость ионизации космическими лучами

Верхние пределы оценивались из доверительного интервала в 3σ

† В случае системы в направлении на Sk-71 46 мы не нашли информацию о лучевой концентрации HI в литературе, поэтому для оценки металличности была использована средняя металличность БМО ($Z = 0.5Z_{\odot}$)

получить приоры на n и χ мы использовали совместный анализ населенностей C I и H₂. Для анализа линий C I, а также линий металлов для оценки металличности были использованы архивные данные космического телескопа Hubble. К сожалению, из-за большой неопределенности в измеренных значениях N_{HD} , мы смогли измерить ζ только в одной системе в направлении на Sk-69 246 (полученная апостериорная функция распределения пока-

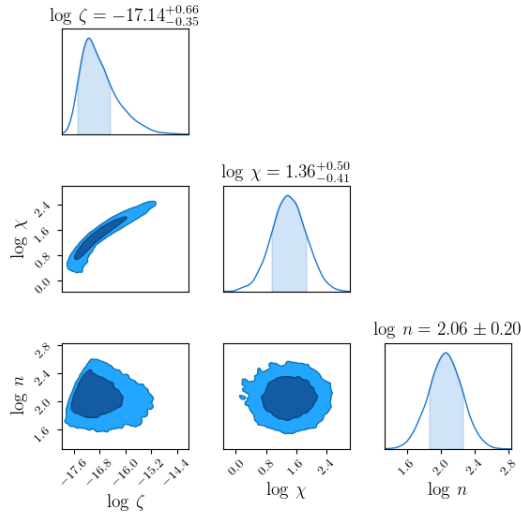


Рис. 8: Постериорная функция распределения для ζ , χ и n в абсорбционной системе направлении на Sk-69 246. Обозначения аналогичны обозначениям на рисунке 5.

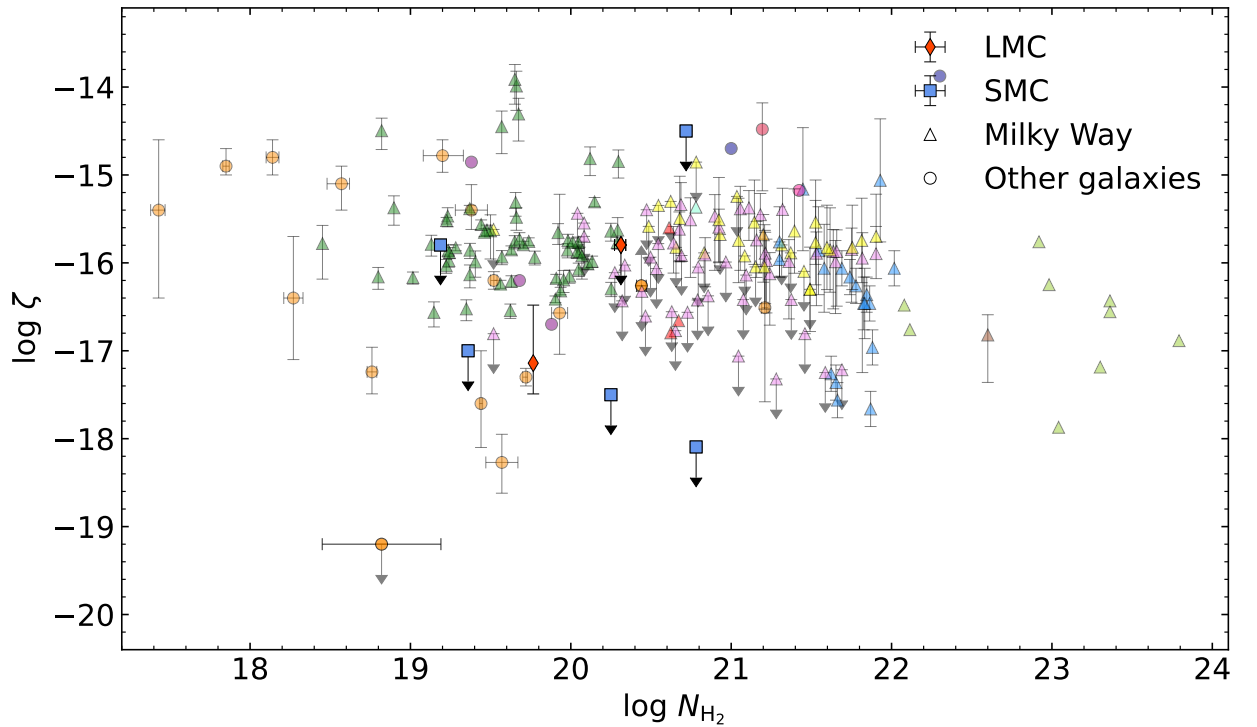


Рис. 9: Оценки на ζ как функция лучевой концентрации N_2 . Красные ромбы и синие квадраты - это значения в Магеллановых Облаках, полученные в этом разделе работы, треугольники - значения, полученные в нашей Галактике, кружки - известные значения ζ в других галактиках, оранжевые кружки - значения, полученные в разделе 2.

зана на рисунке 8), а в 6 системах поставить верхние пределы. Результаты представлены в таблице 3 и на рисунке 9.

Заключение

Основными результатами научно-квалификационной работы являются:

1. Построена простая полуаналитическая модель диффузного облака, содержащего молекулы HD и H₂ и получено дифференциальное уравнение, описывающее зависимость лучевых концентраций HD и H₂ от физических условий в среде, а именно, от скорости ионизации космическими лучами, ζ , интенсивности УФ излучения, χ , объемной концентрации, n , и металличности, Z .
2. Показано, что при уменьшении Z растет скорость реакции образования HD в газовой фазе, что ведет к увеличению относительной распространенности HD в низкометаллических системах. Показано, что при определенных условиях (например, низкой металличности) переход DI/HD может происходить на меньшей глубине облака, чем переход HI/H₂, что ведет к $N_{HD}/2N_{H_2} > D/H$. Это указывает на то, что концентрации HD/H₂ не подходят даже для оценки верхнего предела на изотопическое отношение D/H.
3. Разработан формализм, позволяющий оценивать ζ по измеренным значениям лучевых концентраций HD и H₂.
4. Выполнен систематический поиск молекул HD в абсорбционных системах, содержащих H₂, в спектрах квазаров на больших красных смещениях. Найдены 4 новые системы с большим красным смещением, содержащие HD. В этих системах, а также в некоторых уже известных выполнена оценка скорости ионизации космическими лучами на основе измеренных лучевых концентраций HD и H₂. Полученные значения ζ для систем на больших z находятся в диапазоне $\zeta \sim 10^{-18} \div 10^{-15} \text{ c}^{-1}$.

5. Выполнен систематический поиск молекул HD в Большом и Малом Магеллановых Облаках, ближайших к Млечному Пути низкометаллических галактиках, используя архивные данные космического телескопа FUSE. Найдены 24 системы, содержащие HD (из них 19 впервые), в 70 системах поставлены верхние пределы на лучевые концентрации HD. Заново выполнен анализ абсорбционных линий H_2 и получена населенность вращательных уровней H_2 для 48 систем в БМО и 46 систем в ММО. Выполнена оценка ζ для некоторых систем, содержащих HD, однако из-за недостаточного качества спектров FUSE измерить ζ удалось лишь в одной системе, а в 6 системах были поставлены верхние пределы.

Публикации по теме исследования

1. Kosenko D. N., Balashev S. A. HD/ H_2 absorption systems at high redshifts // Journal of Physics Conference Series. - 2018. - vol. 1135, no. 1. - 012009.
2. Kosenko D. N., Balashev S. A. Molecular clouds HD/ H_2 in the early Universe // Journal of Physics Conference Series. - 2019. - vol. 1400., no. 2. - 022012.
3. Balashev S. A., Kosenko D. N. HD/ H_2 ratio in the diffuse interstellar medium // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2020. - vol. 492., no. 1. - L45-L49.
4. Kosenko D. N., Balashev S. A. Constraining of physical conditions in the cold neutral medium using HD/ H_2 relative abundance // Journal of Physics Conference Series. - 2020. - vol. 1697., no. 1. - 012031.
5. 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.

6. Kosenko D.N., Balashev S.A., no. HD molecules in the Magellanic Clouds (принято к печати в НТВ СПбГПУ)
7. Kosenko D.N., Balashev S.A. Cold diffuse interstellar medium of Magellanic Clouds: I. HD molecules and cosmic ray ionization rate (submitted to MNRAS)
8. Косенко Д.Н., Балашев С.А. Молекулы HD в Млечном Пути (отправлено в ЖТФ)

Список литературы

- [1] Balashev S. A., Noterdaeme P. Constraining the H₂ column density distribution at $z \sim 3$ from composite DLA spectra // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2018. - vol. 478, no. 1. - L7-L11.
- [2] Shull J. M., Danforth C. W., Anderson K. L. A Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Survey of Interstellar Molecular Hydrogen in the Galactic Disk // The Astrophysical Journal. - 2021. - vol. 911, no. 1. - 55.
- [3] Snow T. P., Ross T. L., Destree J. D., et al A New FUSE Survey of Interstellar HD // The Astrophysical Journal. - 2008. - vol. 688, no. 2. - 1124-1136.
- [4] 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 // The Astrophysical Journal. - 2012. - vol. 745, no. 2. - 173.
- [5] André M. K., Le Petit F., Sonnentrucker P., Ferlet R., Roueff E., Civeit T., Désert J.-M., Lacour S., Vidal-Madjar A. Tiny-scale molecular structures

- in the Magellanic Clouds. I. FUSE, HST and VLT observations // *Astronomy and Astrophysics*. - 2004. - vol. 422. - 483-504.
- [6] Bluhm H., de Boer K. S. H₂, HD, and CO at the edge of 30 Dor in the LMC: The line of sight to Sk-69 246 // *Astronomy and Astrophysics*. - 2001. - vol. 379. - 82-89.
- [7] 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.
- [8] Draine B. T. Photoelectric heating of interstellar gas. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. - 1978. - vol. 36, no.. - 595-619.
- [9] 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 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. - 2017. - vol. 470, no. 3. - 2890-2910.
- [10] Le Petit F., Roueff E., Le Bourlot J. D/HD transition in Photon Dominated Regions (PDR) // *Astronomy and Astrophysics*. - 2002. - vol. 390, no.. - 369-381.
- [11] Draine B. T., Bertoldi F. Structure of Stationary Photodissociation Fronts // *The Astrophysical Journal*. - 1996. - vol. 468. - 269.
- [12] Wolcott-Green J., Haiman Z. Suppression of HD cooling in protogalactic gas clouds by Lyman-Werner radiation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. - 2011. - vol. 412, no. 4. - 2603-2616.
- [13] Draine B. T. Interstellar Dust Grains // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. - 2003. - vol. 41. - 241-289.

- [14] 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 // The Astrophysical Journal. - 2014. - vol. 790, no. 1. - 10.
- [15] Weingartner J. C., Draine B. T. Electron-Ion Recombination on Grains and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons // The Astrophysical Journal. - 2001. - vol. 563, no. 2. - 842-852.
- [16] Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Scott P. The Chemical Composition of the Sun // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. - 2009. - vol. 47, no. 1. - 481-522.
- [17] Bialy S., Sternberg A. Analytic H I-to-H₂ Photodissociation Transition Profiles // The Astrophysical Journal. - 2016. - vol. 822, no. 2. - 83.
- [18] 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 // The Astrophysical Journal. - 2015. - vol. 799, no. 1. - 66.
- [19] Le Petit F., Nehmé C., Le Bourlot J., Roueff E. A Model for Atomic and Molecular Interstellar Gas: The Meudon PDR Code // The Astrophysical Journal Supplement Series. - 2006. - vol. 164, no. 2. - 506-529.
- [20] Balashev S. A., Ivanchik A. V., Varshalovich D. A. HD/H₂ molecular clouds in the early Universe: The problem of primordial deuterium // Astronomy Letters. - 2010. - vol. 36, no. 11. - 761-772.
- [21] Ivanchik A. V., Balashev S. A., Varshalovich D. A., Klimenko V. V. H₂/HD molecular clouds in the early universe. An independent means of estimating the baryon density of the universe // Astronomy Reports. - 2015. - vol. 59, no. 2. - 100-117.

- [22] Kosenko D. N., Balashev S. A., Noterdaeme P. et al 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.
- [23] Balashev S. A., Klimenko V. V., Noterdaeme et al X-shooter observations of strong H₂-bearing DLAs at high redshift // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2019. - vol. 490, no. 2. - 2668-2678.
- [24] Planck Collaboration Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters // Astronomy and Astrophysics. - 2020. - vol. 641. - A6.
- [25] Dvorkin I., Vangioni E., Silk J. et al Evolution of dispersion in the cosmic deuterium abundance // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2016. - vol. 458, no. 1. - L104-L108.
- [26] 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 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2020. - vol. 498, no. 2. - 1531-1549.
- [27] Balashev S. A., Ledoux C., Noterdaeme P. et al Nature of the DLA towards Q 0528-250: High pressure and strong UV field revealed by excitation of C I, H₂, and Si II // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2020. - vol. 497, no. 2. - 1946-1956.
- [28] Padovani M., Galli D., Glassgold A. E. Cosmic-ray ionization of molecular clouds // Astronomy and Astrophysics, Le Petit F., Srianand R., Smette A. - 2009. - vol. 501, no. 2. - 619-631.
- [29] Pietrzyński G., Graczyk D., Gallenne A. et al A distance to the Large

- Magellanic Cloud that is precise to one per cent // *Nature*. - 2019. - vol. 567, no. 7747. - 200-203.
- [30] Graczyk D., Pietrzyński G., Thompson I. B. et al A Distance Determination to the Small Magellanic Cloud with an Accuracy of Better than Two Percent Based on Late-type Eclipsing Binary Stars // *The Astrophysical Journal*. - 2020. - vol. 904, no. 1. - 13.
- [31] Russell S. C., Dopita M. A. Abundances of the Heavy Elements in the Magellanic Clouds. III. Interpretation of Results // *The Astrophysical Journal*. - 1992. - vol. 384. - 508.
- [32] Blair W. P., Oliveira C., LaMassa S. et al The Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Legacy in the Magellanic Clouds: An Online Stellar Sight Line Atlas // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. - 2009. - vol. 121, no. 880. - 634.
- [33] Dixon W. V., Sahnou D. J., Barrett P. E. et al CalFUSE Version 3: A Data Reduction Pipeline for the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. - 2007. - vol. 119, no. 855. - 527-555.
- [34] Simkin S. M. Measurements of Velocity Dispersions and Doppler Shifts from Digitized Optical Spectra // *Astronomy and Astrophysics*. - 1974. - vol. 31. - 129.
- [35] Tonry J., Davis M. A survey of galaxy redshifts. I. Data reduction techniques. // *The Astronomical Journal*. - 1979. - vol. 84. - 1511-1525.
- [36] Noterdaeme P., Balashev S., Krogager J.-K. et al Proximate molecular quasar absorbers. Excess of damped H₂ systems at $z_{\text{abs}} \approx z_{\text{QSO}}$ in SDSS DR14 // *Astronomy and Astrophysics*. - 2019. - vol. 627. - A32.

- [37] Balashev S. A., Varshalovich D. A., Ivanchik A. V. Directional radiation and photodissociation regions in molecular hydrogen clouds // *Astronomy Letters*. - 2009. - vol. 35, no. 3. - 150-166.
- [38] Noterdaeme P., Ledoux C., Petitjean P. et al Excitation mechanisms in newly discovered H₂-bearing damped Lyman- α clouds: systems with low molecular fractions // *Astronomy and Astrophysics*. - 2007. - vol. 474, no. 2. - 393-407.
- [39] Mathis J. S., Mezger P. G., Panagia N. Interstellar radiation field and dust temperatures in the diffuse interstellar medium and in giant molecular clouds // *Astronomy and Astrophysics*. - 1983. - vol. 128. - 212-229.