

## Молекулы HD в Млечном Пути

© Д.Н. Косенко, С.А. Балашев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: kosenkodn@yandex.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 31 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Проведен независимый анализ абсорбционных линий молекул HD и H<sub>2</sub> в ряде систем в нашей Галактике в архивных данных космического телескопа FUSE и линий нейтрального углерода и металлов в этих системах, используя архивные данные космического телескопа HST. Лучевые концентрации HD были получены в диапазоне от  $\sim 10^{14}$  до  $\sim 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>. Полученные лучевые концентрации были использованы для оценки физических условий в рассматриваемых системах, в том числе значения скорости ионизации космическими лучами, которое лежит в диапазоне от  $\xi \sim 10^{-17}$  до  $\sim 10^{-15.5}$  s<sup>-1</sup>.

**Ключевые слова:** галактики, межзвездная среда, космические лучи.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56821.f212-23

### Введение

Молекулярный водород, H<sub>2</sub>, — самая распространенная молекула во Вселенной, являющаяся трейсером холодной фазы нейтральной межзвездной среды (МЗС). При достаточно большой концентрации H<sub>2</sub> в среде также можно задетектировать его изотопмер, молекулу HD. Так как собственное излучение молекул H<sub>2</sub> и HD подавлено, то основной метод изучения этих молекул в межзвездной среде — это спектроскопия абсорбционных линий в направлении на яркие фоновые источники. Однако атмосферное поглощение препятствует наблюдению наземными телескопами абсорбционных линий H<sub>2</sub> и HD в Млечном Пути и соседних галактиках, так как эти абсорбционные линии находятся в ультрафиолетовой области спектра ( $\lambda \lesssim 1100$  Å). Поэтому для наблюдения этих молекул в локальной Вселенной используются данные, полученные космическими телескопами, например, FUSE и Copernicus.

Ранее архивные данные космического телескопа FUSE использовались для изучения H<sub>2</sub> и HD в нашей Галактике и в Магеллановых Облаках [1–3], однако в работе [1] представлена лишь часть абсорбционных систем Млечного Пути, где идентифицированы молекулы HD. Кроме того, для многих систем, где были найдены линии молекулы H<sub>2</sub>, имеются архивные данные космического телескопа Хаббл (HST), позволяющие изучать линии нейтрального углерода, C I, а также оценивать металличность в системе. Используя лучевые концентрации<sup>1</sup> HD, а также населенности вращательных уровней H<sub>2</sub>, уровней тонкой структуры C I и металличности, можно оценить физические условия в системе, а именно интенсивность ультрафиолетового (УФ) фона,  $\chi$ , объемную концентрацию,  $n$ , и скорость ионизации космическими

<sup>1</sup> Здесь и далее лучевая концентрация (обозначается  $N$ ) измеряется в cm<sup>-2</sup>.

лучами,  $\xi$ , которые определяют химическую эволюцию облака (см., например, [4]).

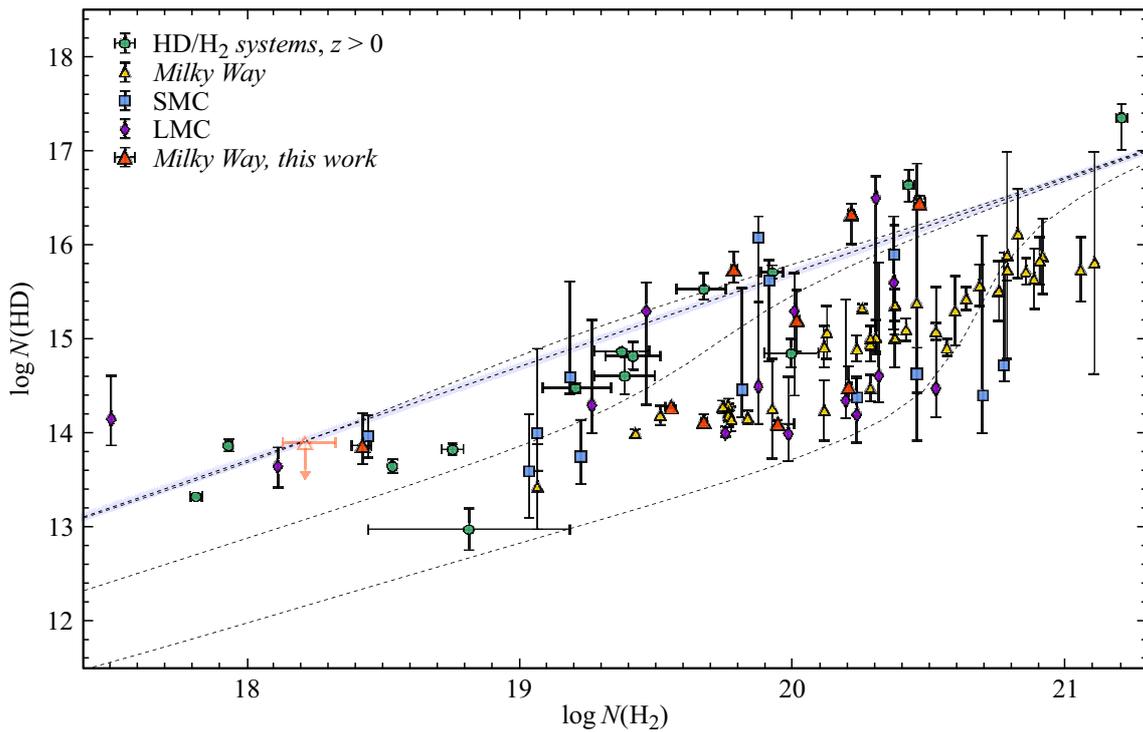
В представленной пилотной работе, мы отобрали восемь абсорбционных систем в направлении на звезды нашей Галактики, в пяти из которых линии HD еще не изучались. Для однородного анализа мы заново проанализировали линии H<sub>2</sub>, а также нашли населенности уровней тонкой структуры C I и металличности в этих системах, что описано в разд. 2, результаты обсуждаются в разд. 2. В разд. 3, используя полученные лучевые концентрации, мы выполнили оценки на упомянутые выше физические условия в среде, ассоциируемой с абсорбционными системами.

### 1. Данные и анализ

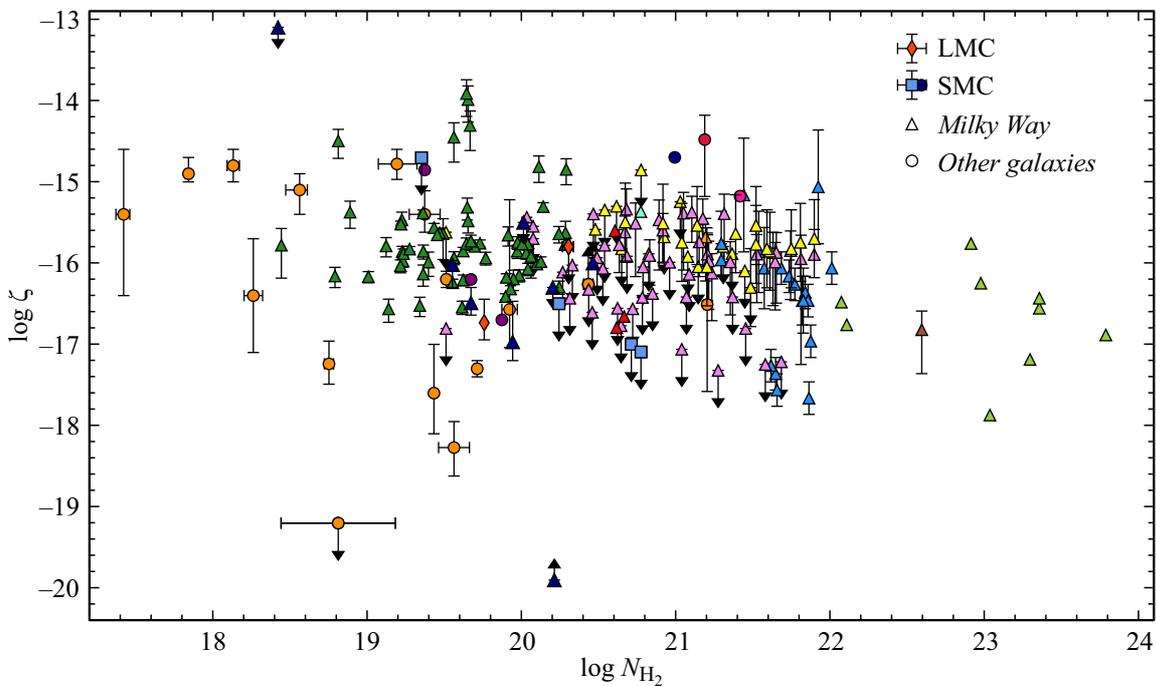
В настоящей работе были использованы архивные данные космического телескопа FUSE [5,6]. Мы отобрали подвыборку систем из выборки, представленной [2], для анализа возможных систематических эффектов в предыдущих измерениях HD, а также поиска новых систем, содержащих HD.

Спектры FUSE плохо откалиброваны по длине волны, поэтому мы применили процедуру, позволяющую улучшить качество калибровки [7]. Для этого мы сравнивали линии H<sub>2</sub> в наблюдаемом спектре с соответствующими линиями в синтетическом спектре (брались только тонкие, одиночные линии) и методом кросс-корреляции [8] оценивался сдвиг между ними. Затем строилась зависимость сдвига от длины волны, которая применялась для корректировки калибровки экспозиций при их сложении. Также сложение отдельных экспозиций позволило значительно улучшить отношение сигнала к шуму спектра, которое составило  $S/N \sim 20-50$  в рассматриваемых системах.

Для подгонки абсорбционных линий мы использовали многокомпонентный профиль Фойта (компоненты опре-



**Рис. 1.** Измеренные значения лучевых концентраций HD и H<sub>2</sub>. Результаты, полученные в настоящей работе, обозначены красными треугольниками, желтые треугольники — результаты измерения HD в нашей Галактике полученные ранее в [1], зелеными кругами обозначены измерения на больших красных смещениях [4], синие квадраты — в Малом Магеллановом Облаке, фиолетовые ромбы — в Большом Магеллановом Облаке. Светло-синяя прямая показывает значение первичного изотопического отношения D/H [15]. Пунктирные кривые — теоретические расчеты отношения HD/H<sub>2</sub> для  $\log \xi = -15, -16, -17$ .



**Рис. 2.** Скорость ионизации космическими лучами в зависимости от лучевой концентрации H<sub>2</sub>. Треугольники — это оценки, полученные в нашей Галактике (темно-синие точки были получены в настоящей работе), квадраты — в Малом Магеллановом Облаке, ромбы — в Большом Магеллановом Облаке, кружки — в других галактиках (ссылки, например, в [4]).

Таблица 1. Измерения лучевых концентраций HD, H<sub>2</sub> и C I

Звезда	$v_{\text{LSR}}^a$ , km/s	$\log N_{\text{H}}^b$	$\log N_{\text{H}_2}$	$\log N_{\text{HD}}$	$\log N_{\text{C I}}$
HD 93129A	-39.1	21.47	$16.70^{+0.08}_{-0.35}$	$\lesssim 13.4$	$13.93^{+0.02}_{-0.01}$
	-16.8	„—“	$18.22^{+0.11}_{-0.08}$	$\lesssim 13.9$	$14.61^{+0.01}_{-0.01}$
	1.0	„—“	$20.22^{+0.01}_{-0.01}$	$16.33^{+0.11}_{-0.32}$	$14.80^{+0.01}_{-0.01}$
HD 93205	-83.8	21.36	$16.67^{+0.07}_{-0.12}$	$\lesssim 13.1$	$13.68^{+0.01}_{-0.01}$
	3.6	„—“	$19.80^{+0.01}_{-0.01}$	$15.74^{+0.19}_{-0.14}$	$14.80^{+0.01}_{-0.01}$
HD 93843	$\sim 2.5$	21.3	$19.68^{+0.01}_{-0.01}$	$14.12^{+0.08}_{-0.04}$	$14.30^{+0.01}_{-0.01}$
HD 99890	-13.4	21.12	$19.56^{+0.01}_{-0.02}$	$14.28^{+0.01}_{-0.01}$	$14.58^{+0.01}_{-0.01}$
HD 100199	$\sim 2.8$	21.18	$20.21^{+0.01}_{-0.01}$	$14.49^{+0.22}_{-0.13}$	$14.70^{+0.01}_{-0.01}$
HD 101190	$\sim 3.9$	21.15	$20.47^{+0.02}_{-0.02}$	$16.45^{+0.07}_{-0.05}$	$15.11^{+0.03}_{-0.04}$
HD 103779	$\sim -2.9$	21.17	$19.95^{+0.06}_{-0.01}$	$14.10^{+0.04}_{-0.03}$	$14.48^{+0.01}_{-0.01}$
HD 104705	-21.8	21.15	$18.43^{+0.03}_{-0.04}$	$13.87^{+0.34}_{-0.20}$	$13.82^{+0.01}_{-0.01}$
	2.9	„—“	$20.02^{+0.01}_{-0.01}$	$15.2^{+0.32}_{-0.33}$	$14.39^{+0.01}_{-0.01}$

Примечание. <sup>a</sup> — скорость абсорбционной системы в системе локального стандарта покоя, <sup>b</sup> — значения взяты из [2].

Таблица 2. Оценка физических условий

Звезда	$v_{\text{LSR}}$ , km/s	[X/H]	X	$\log n$ , cm <sup>-2</sup>	$\log \chi$	$\log \xi$ , s <sup>-1</sup>
HD 93129A	-39.1	$-0.28^{+0.05}_{-0.05}$	Zn	$2.98^{+0.31}_{-0.35}$	$0.69^{+0.26}_{-0.24}$	—
	-16.8	„—“	„—“	$2.65^{+0.35}_{-0.22}$	$1.58^{+0.48}_{-0.23}$	—
	1.0	„—“	„—“	$1.63^{+0.17}_{-0.19}$	$0.48^{+0.29}_{-0.21}$	$\gtrsim 19.9$
HD 93205	-83.8	$0.11^{+0.06}_{-0.06}$	S	$\gtrsim 2.5$	$1.51^{+0.68}_{-0.33}$	—
	3.6	„—“	„—“	$1.32^{+0.17}_{-0.17}$	$0.44^{+0.36}_{-0.26}$	—
HD 93843	$\sim 2.5$	$-0.03^{+0.04}_{-0.04}$	P	$1.77^{+0.16}_{-0.16}$	$0.52^{+0.19}_{-0.18}$	$-16.49^{+0.19}_{-0.15}$
HD 99890	-13.4	$0.07^{+0.03}_{-0.03}$	P	$1.42^{+0.17}_{-0.16}$	$1.29^{+0.44}_{-0.40}$	$-16.02^{+0.65}_{-0.28}$
HD 100199	$\sim 2.8$	$0.01^{+0.10}_{-0.04}$	P	$1.70^{+0.18}_{-0.18}$	$0.44^{+0.23}_{-0.20}$	$\lesssim -16.3$
HD 101190	$\sim 3.9$	$-0.11^{+0.05}_{-0.05}$	Zn	$1.76^{+0.18}_{-0.17}$	$0.59^{+0.23}_{-0.18}$	$\gtrsim -16.0$
HD 103779	$\sim 2.9$	$-0.02^{+0.08}_{-0.06}$	S	$1.27^{+0.17}_{-0.17}$	$0.59^{+0.44}_{-0.24}$	$-16.97^{+0.50}_{-0.23}$
HD 104705	-21.8	$0.10^{+0.03}_{-0.03}$	P	$1.05^{+0.14}_{-0.15}$	$1.04^{+0.47}_{-0.31}$	$\lesssim -13.1$
	2.9	„—“	„—“	$1.28^{+0.18}_{-0.19}$	$0.23^{+0.31}_{-0.22}$	$\lesssim -15.5$

Примечание. Столбцы: (i) название звезды; (ii) скорость абсорбционной системы относительного локального стандарта покоя; (iii) металличность; (iv) элемент для оценки металличности; (v) объемная концентрация; (vi) интенсивность УФ излучения; (vii) скорость ионизации космическими лучами. В направлении на HD 93129A (1 и 2 компоненты) и HD 93205 скорость ионизации космическими лучами не оценивалась.

деляются сдвигом по скорости), который дает оценки лучевых концентраций,  $N$ , и параметры Доплера,  $b$ , для разных уровней. Нами было замечено, что в результате применения процедуры калибровки и сложения экспозиций, а также других систематических эффектов, спектральное разрешение может ухудшаться (номинальное разрешение FUSE  $R = \lambda/\Delta\lambda = 20\,000$ ), поэтому оно было свободным параметром при подгонке. Для определения постериорных распределений параметров был

использован байесов анализ с интегрированием методом Монте-Карло по схеме марковских цепей. Кроме того, мы использовали две штрафные функции для корректировки гладкости формы восстанавливаемой диаграммы населенности вращательных уровней H<sub>2</sub>, и роста параметра Доплера с увеличением номера вращательного уровня H<sub>2</sub> (про наблюдения этого эффекта см., например, [9]). Детальное описание использованного метода см. в работах [4,10].

На скоростях, соответствующих позициям компонент  $H_2$  в спектре, мы выполнили поиск молекул HD. В случае, когда мы могли поставить только верхний предел (здесь и далее верхние и нижние пределы определяются из анализа апостериорной функции распределения на уровне  $3\sigma$ ) на концентрацию HD, были зафиксированы положения линий и использованы приоры на параметры Доплера, полученные в анализе линий  $H_2$ .

Используя архивные данные HST, мы также проанализировали абсорбционные линии CI и линии металлов, что было необходимо для оценок физических условий. При анализе линий CI предполагалось, что все уровни тонкой структуры имеют идентичный параметр Доплера.

## 2. Результаты

Оценки лучевых концентраций HD,  $H_2$  и CI представлены в табл. 1. Системы в направлении на HD 93205, HD 101190 и HD 104705 были ранее изучены [1]. Найденное значение  $\log N_{HD}$  в направлении на HD 104705 близко к тому, что дает [2], однако для HD 93205 и HD 101190 значения отличаются на порядок. Такая разница может быть результатом разных подходов к обработке данных: [1] использован метод построения кривой роста для определения  $b$  и  $N$ , мы же использовали метод подгонки многокомпонентным профилем Фойта. Кроме того, для HD 93205 в [1] нижний предел  $b$  был получен в предположении, что линия оптически тонкая и находится в линейной области кривой роста, что исключает насыщенные решения. Таким образом, мы обнаружили молекулы HD в пяти новых системах в нашей Галактике. На рис. 1 показано сравнение полученных лучевых концентраций HD и  $H_2$  с известными измерениями на больших красных смещениях [4], в Магеллановых Облаках (Kosenko et al., готовится к публикации) и изотопическим отношением D/H. Также для сравнения показаны значения, полученные ранее для нашей Галактике [1]. Большой разброс в полученных значениях можно объяснить разными физическими условиями в наблюдаемых системах и высокой чувствительностью концентрации HD к их изменению [11]. Ранее мы показали, что отношение  $N_{HD}/N_{H_2}$  уменьшается при увеличении металличности, так как уменьшается концентрация ионизованного водорода, который необходим для формирования HD в газовой фазе. Тем не менее в трех системах были обнаружены отношения  $N_{HD}/2N_{H_2} > D/H$ , что может свидетельствовать, например, о повышенном фоне космических лучей.

## 3. Физические условия

Используя оценки на лучевые концентрации  $H_2$ , HD и CI, мы выполнили оценки физических условий в среде, ассоциируемой с абсорбционными системами, согласно процедуре, предложенной и использованной ранее для

систем HD/ $H_2$  на космологических красных смещениях в работе [4].

Согласно этой процедуре, сначала производится оценка  $n$  и  $\chi$  из совместного анализа населенностей вращательных уровней  $H_2$  и уровней тонкой структуры CI на основе сравнения наблюдаемых значений с сетками моделей, посчитанных кодом MEUDON PDR [12,13]. Затем производится оценка  $\xi$  при использовании полуаналитической модели, описанной в [11]. Было показано, что отношение лучевых концентраций HD и  $H_2$  зависит от  $\xi$ ,  $n$ ,  $\chi$  и металличности  $Z$  (которая была определена из анализа линий металлов в спектрах HST и зафиксирована в дальнейших расчетах). Мы использовали метод Монте-Карло по схеме марковских цепей для определения  $\xi$ , а значения  $n$  и  $\chi$ , найденные по  $H_2$  и CI, были использованы в качестве приоров. Результаты представлены в табл. 2.

Полученные значения скорости ионизации космическими лучами лежат в широком интервале  $\xi \sim 10^{-17} - 10^{-15.5} \text{ s}^{-1}$ , но хорошо согласуются с типичными значениями в диффузной фазе МЗС (см., например, обзор [14]).

## Финансирование работы

Работа поддержана грантом РФФ № 22-22-00164

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

## Список литературы

- [1] T.P. Snow, T.L. Ross, J.D. Destree, M.M. Drosback, A.G. Jensen *ApJ*, **688**, 1124 (2008). DOI: 10.1086/592288
- [2] J.M. Shull, C.W. Danforth, K.L. Anderson. *ApJ*, **911**, 55 (2021). DOI: 10.3847/1538-4357/abe707
- [3] D.E. Welty, R. Xue, T. Wong. *Astrophys. J.*, **745**, 173 (2012). DOI: 10.1088/0004-637X/745/2/173
- [4] D.N. Kosenko, S.A. Balashev, P. Noterdaeme, J.-K. Krogager, R. Srianand, C. Ledoux. *MNRAS*, **505**, 3810 (2021). DOI: 10.1093/mnras/stab1535
- [5] H.W. Moos, W.C. Cash, L.L. Cowie, A.F. Davidsen, A.K. Dupree, et al. *ApJ*, **538**, L1 (2000). DOI: 10.1086/312794
- [6] D.J. Sahnou, H.W. Moos, T.B. Ake, J. Andersen, B.G. Andersson, et al. *ApJ*, **538**, L7 (2000). DOI: 10.1086/312794
- [7] D.N. Kosenko, S.A. Balashev. *MNRAS* **525**, 2820 (2023). DOI: 10.1093/mnras/stad2299
- [8] S.M. Simkin. *A&A*, **31**, 129 (1974).
- [9] S.A. Balashev, D.A. Varshalovich, A.V. Ivanchik. *Astronomy Lett.*, **35**, 150 (2009). DOI: 10.1134/S1063773709030025
- [10] P. Noterdaeme, S.A. Balashev, J.-K. Krogager, R. Srianand, H. Fathivavsari, et al. *A&A*, **627**, A32 (2019). DOI: 10.1051/0004-6361/201935371
- [11] S.A. Balashev, D.N. Kosenko. *MNRAS: Lett.*, **492**, L45 (2020). DOI: 10.1093/mnrasl/slz180

- [12] F. Le Petit, C. Nehmé, J. Le Bourlot, E. Roueff. *Astrophys. J. Supplement Series*, **164**, 506 (2006). DOI: 10.1086/503252
- [13] V.V. Klimenko, S.A. Balashev. *MNRAS*, **498**, 1531 (2020). DOI: 10.1093/mnras/staa2134
- [14] M. Padovani, A.V. Ivlev, D. Galli, S.S.R. Offner, N. Indriolo, D. Rodgers-Lee, A. Marcowith, P. Girichidis, A.M. Bykov, J.M.D. Kruijssen. *Space Sci. Rev.*, **216**, 29 (2020). DOI: 10.1007/s11214-020-00654-1
- [15] Planck Collaboration, N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, et al. *A&A*, **641**, A6 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/201833910