

# МЕЖЗВЕЗДНЫЕ МОЛЕКУЛЫ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ

М. С. Кирсанова

*Институт астрономии РАН*

В лекции представлены результаты наблюдений межзвездных молекул в ультрафиолетовом диапазоне. Основное внимание уделяется молекулам  $H_2$ , CO и воде. Обсуждается задача обнаружения новых молекул в диффузных облаках с помощью телескопа «Спектр-УФ».

## INTERSTELLAR MOLECULES IN THE ULTRAVIOLET

M. S. Kirsanova

*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

We discuss studies of molecular emission in the ultraviolet spectral region. Main attention is given to  $H_2$ , CO and water. We also discuss perspectives for new detections with the “WSO-UV” telescope.

## Введение

На сегодняшний день открыто около 270 различных молекул в галактической межзвездной среде (МЗС), а в других галактиках — около 70 (см., например, полный список на сайте базы данных CDMS: <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>). Несмотря на то, что наибольшее многообразие молекулярного состава обнаружено в областях звездообразования по наблюдениям линий излучения молекул и ионов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах (см. например, [1]), именно абсорбционные спектроскопические наблюдения диффузной межзвездной среды в ультрафиолете (УФ) дали астрономам фундаментальные знания об основных межзвездных молекулах, а также астрохимических путях их синтеза и разрушения.

## Молекулярные облака в МЗС

В холодной нейтральной среде, составляющей примерно половину по массе от всей МЗС, наблюдаются сложные по своей структуре и разнообразные по физическим условиям молекулярные облака. Молекулярный водород ( $H_2$ ) — наиболее распространенная молекула во Вселенной и играет фундаментальную роль в множестве процессов, протекающих в МЗС. Занимая в объеме менее 1 % от всей МЗС, именно эти газопылевые облака ответственны за межзвездное поглощение. В литературе можно найти несколько примеров классификации молекулярных облаков (см. например, [2, 3]), для УФ-спектроскопии молекул, однако же, важно лишь одно — пропускают ли эти облака УФ-излучение фоновых звезд или нет. Пропускание обычно характеризуется величиной поглощения в полосе V ( $A_V$ ,  $\lambda = 540$  нм), и хотя это не ультрафиолетовый диапазон, но по историческим причинам удобно ориентироваться именно на нее. К плотным молекулярным облакам относят те, в которых  $A_V \geq 5-10$ , температура газопылевой среды в них обычно  $T \sim 10-100$  К, а плотность газа  $\sim n \geq 10^3$  см $^{-3}$ . Несмотря на то, что яркие OB-звезды видны в оптике вплоть до  $A_V \approx 10$  [4], основные наблюдения молекул в УФ-диапазоне проводятся в направлении т. н. диффузных молекулярных облаков, в которых  $A_V \leq 1$ ,  $n \leq 10^3$  см $^{-3}$ , а доля молекул  $H_2$  может быть значительно ниже, чем 90 % от общего содержания водорода.

## Молекулы $\text{H}_2$

Из-за симметричности у молекулы  $\text{H}_2$  нет разрешенных вращательных и колебательных переходов, которые могли бы наблюдаться в миллиметровом диапазоне с поверхности Земли, как это имеет место для монооксида углерода  $\text{CO}$ . С Земли по линиям излучения могут наблюдаться только  $\text{H}_2$  в возбужденном состоянии в ближнем инфракрасном диапазоне ( $\lambda \approx 2$  мкм). Основным методом изучения молекул  $\text{H}_2$  является абсорбционная спектроскопия в дальней УФ-области, что накладывает ограничения как на исследуемые молекулярные облака (величина  $A_V \leq 2-3$ ), так и на доступную область Галактики, так как звезды не должны быть слишком слабыми для уверенной детекции линий. Молекулярный водород в диффузных облаках находится либо в основном ( $X^1\Sigma_g^+$ ), либо в первом или втором возбужденном электронном состояниях ( $B^1\Sigma_u^+$  или  $C^1\Pi_u$ ), которые отстоят от основного на 11.2 и 12.3 эВ и в свою очередь расщепляются на колебательные и вращательные состояния, образуя полосы Лаймана и Вернера, соответственно. Благодаря массовым исследованиям УФ-спектров поглощения звезд на спутнике *Copernicus*, в 70-х гг. XX в. стало ясно, что полосы  $\text{H}_2$  на длинах волн  $\lambda \leq 111$  нм наблюдаются повсеместно в картинной плоскости. Наблюдения спутников *Copernicus* и более поздние наблюдения обсерватории *FUSE* показали, что лучевые концентрации  $\text{H}_2$  в диффузных облаках лежат в пределах  $10^{14} \leq N(\text{H}_2) \leq 10^{20}$  см $^{-2}$ , а доля молекул  $\text{H}_2$   $0.01 \leq f(\text{H}_2) \leq 0.8$  относительно полного содержания водорода. Таким образом, теоретические предположения о том, что существуют полностью молекулярные облака, где  $f(\text{H}_2) = 1$  пока что не было подтверждено, хотя часто используется в современных астрохимических моделях плотных молекулярных облаков (например, [5, 6]). Возможно, причина в том, что на луче зрения у наблюдателя всегда находится смесь из  $\text{H}$  и  $\text{H}_2$ , так как на краях облаков молекулы  $\text{H}_2$  диссоциируют под действием УФ-излучения. Поглощая кванты полос Лаймана и Вернера, молекулы  $\text{H}_2$  диссоциируют примерно с вероятностью 10 %. Из-за того что диссоциации предшествует поглощение излучения в узких линиях, в облаках происходит так называемый эффект самоэкранирования — линии быстро становятся оптически-толстыми и молекулы  $\text{H}_2$  защищают сами себя от разрушительного УФ-излучения начиная с  $N(\text{H}_2) \approx 5 \times 10^{19}$  см $^{-2}$  [7, 8]. Массовая УФ-спектроскопия на *Copernicus* и *FUSE* позволила эмпирически получить важные соотношения между общим количеством водорода на луче зрения и величиной поглощения [9, 10]:

$$N(\text{HI} + \text{H}_2) \approx A_V 1.9 \times 10^{21}, \quad (1)$$

где  $N(\text{HI} + \text{H}_2)$  — лучевая концентрация атомарного и молекулярного водорода, см $^{-2}$ . Важно отметить, что данное соотношение используется повсеместно в астрономии, хотя получено оно для объектов с  $A_V \leq 5$ , показателем цвета  $E(B - V) \leq 0.5$  и в предположении т. н. стандартной пыли с отношением полного поглощения к селективному  $R_V = 3.1$ . Более аккуратно стоит говорить о соотношении между  $N(\text{HI} + \text{H}_2)$  и  $E(B - V)$ , которое измерено уже более чем для 130 ОБ-звезд вплоть до  $N(\text{HI} + \text{H}_2) = 5 \times 10^{21}$  см $^{-2}$  и в среднем составляет [9, 11]:

$$\langle N(\text{HI} + \text{H}_2)/E(B - V) \rangle \approx (5.8 - 6.1) \times 10^{21}. \quad (2)$$

Интересно, что числовые коэффициенты в соотношениях 1 и 2, измеренные для массивных звезд из галактической плоскости, не совпадают со значениями, полученными другими способами для высоких галактических широт, что свидетельствует об осаждении пыли к плоскости галактического диска либо о разрушении пыли над плоскостью Галактики.

## Молекулы CO

Благодаря вращательным переходам на длине волны 3 мм, излучение молекул CO активно наблюдается с Земли вот уже несколько десятилетий. Поскольку полосы, в которых CO поглощает УФ-излучение и впоследствии диссоциируют, перекрываются с полосами Лаймана и Вернера, то H<sub>2</sub> экранирует CO, предотвращая диссоциацию [12]. Таким образом, в тех частях молекулярных облаков, где наблюдается CO, водород также находится в форме молекул H<sub>2</sub>. Вот уже несколько десятилетий CO активно используется для определения лучевой концентрации молекул H<sub>2</sub> с помощью простого соотношения  $N(\text{H}_2) \approx A \times 10^4 \times N(\text{CO}) \text{ см}^{-2}$ , где  $A = 1-3$  для галактических объектов, или еще проще [13]:

$$N(\text{H}_2) = X_{\text{CO}} W(\text{CO}, J = 1 - 0), \quad (3)$$

где  $W(\text{CO}, J = 1-0) \text{ К км с}^{-1}$  — интегральная интенсивность излучения CO на длине волны 3 мм. Коэффициент пересчета CO-в-H<sub>2</sub>  $X_{\text{CO}}$  зависит от множества факторов, включая оптическую толщину линий, металличность среды и проч. Одновременные наблюдения CO и H<sub>2</sub> в УФ-диапазоне позволяют проводить калибровки фактора пересчета CO-в-H<sub>2</sub>, что особенно важно для интервала  $N(\text{H}_2) < 10^{20} \text{ см}^{-2}$ , где линейная зависимость перестает работать [14]. Причем полезными могут оказаться не только те части спектра, в которых происходит основное поглощение и где быстро происходит насыщение (для CO это интервал  $\lambda < 107 \text{ нм}$ ), но и линии в менее энергетичном диапазоне с  $\lambda > 120 \text{ нм}$ , в котором работает спектрограф *STIS* на телескопе *HST* [14, 15]. Например, в работе [15] благодаря измерениям со спектральным разрешением 200 000 были получены уникальные спектры в направлении звезды X Персея и определено относительное обилие  $\text{CO}/\text{H}_2 = 5 \times 10^{-6}$ , что является рекордно низким содержанием для плотного молекулярного облака.

## Другие межзвездные молекулы в ультрафиолете

Кроме H<sub>2</sub> и CO, УФ-наблюдения позволили обнаружить в диффузных молекулярных облаках такие молекулы, как OH, C<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, HCl, но многие из молекул, о существовании которых в диффузных облаках астрономы знают по результатам астрохимического моделирования, до сих пор в этих объектах не обнаружены. Такая ситуация сложилась, например, с молекулами воды. На сегодняшний день известно, что основной резервуар воды в МЗС — это поверхности пылинок, из которых вода может выходить в газовую фазу под действием ударных волн [16], и, как показывают астрохимические модели, вода должна содержаться в диффузных облаках на уровне  $\sim 10^{-8}$ . Однако даже на *HST* [17] астрономы не смогли обнаружить линий поглощения воды на длине волны  $\lambda = 124 \text{ нм}$ , а значит,  $10^{-8}$  — это верхний предел ее содержания в диффузных облаках и либо астрохимические модели должны быть пересмотрены, либо требуются дополнительные наблюдения. Похожая ситуация сложилась с некоторыми другими молекулами, что открывает широкие возможности для поиска линий молекул на УФ-телескопах будущего.

## Заключение

Поиск новых линий молекул в межзвездной среде — одна из перспективных задач для международного космического телескопа «Спектр-УФ» [18]. К сожалению, спектрограф VUVES телескопа «Спектр-УФ» не может быть использован для исследований молекул H<sub>2</sub>, т. к. его коротковолновая граница составляет 115 нм, а для H<sub>2</sub> необходим диапазон  $91.2 \leq \lambda \leq 111 \text{ нм}$ . Спектрограф VUVES, однако же, может быть использован для исследований ненасыщенных и слабых линий CO, благодаря чему можно ожидать аккуратных

оценок лучевых концентраций этой астрофизически важной молекулы. Известно, что в диапазоне  $115 \leq \lambda \leq 310$  нм находится множество линий других молекул, поэтому при достаточной экспозиции и обзоре большого числа объектов можно ожидать новых интересных открытий в диффузных облаках.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-12-00373.

## Библиографические ссылки

- [1] *Jørgensen J. K., van der Wiel M. H. D., Coutens A. et al.* The ALMA Protostellar Interferometric Line Survey (PILS). First results from an unbiased submillimeter wavelength line survey of the Class 0 protostellar binary IRAS 16293-2422 with ALMA // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 595. — P. A117.
- [2] *Засов А. В., Постнов К. А.* Общая астрофизика. — 2-е изд. — Фрязино : Век 2, 2006. — 196 с.
- [3] *Wiebe D.* Observations in UV band and problems of star formation studies. // *Ultraviolet Universe II* / ed. by B. Shustov, M. Sachkov, E. Kilpio. — 2008. — P. 268.
- [4] *Kirsanova M. S., Boley P. A., Moiseev A. V. et al.* 3D structure of the H II region Sh2-235 from tunable-filter optical observations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 497, № 1. — P. 1050–1058.
- [5] *Kirsanova M. S., Ossenkopf-Okada V., Anderson L. D. et al.* The PDR structure and kinematics around the compact H II regions S235 A and S235 C with [C II], [<sup>13</sup>C II], [O I], and HCO<sup>+</sup> line profiles // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2020. — Vol. 497, № 3. — P. 2651–2669.
- [6] *Kirsanova M. S., Saliu S. V., Kalenskii S. V. et al.* The warm-up phase in massive star-forming cores around RCW 120 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Vol. 503, № 1. — P. 633–642.
- [7] *Black J. H., Dalgarno A.* Models of interstellar clouds. I. The Zeta Ophiuchi cloud. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1977. — Vol. 34. — P. 405–423.
- [8] *Draine B. T., Bertoldi Frank.* Structure of Stationary Photodissociation Fronts // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 468. — P. 269.
- [9] *Bohlin R. C., Savage B. D., Drake J. F.* A survey of interstellar H I from Lalpha absorption measurements. II. // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 224. — P. 132–142.
- [10] *Rachford Brian L., Snow Theodore P., Destree Joshua D. et al.* Molecular Hydrogen in the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Translucent Lines of Sight: The Full Sample // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2009. — Vol. 180, № 1. — P. 125–137.
- [11] *Shull J. Michael, Danforth Charles W., Anderson Katherine L.* A Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Survey of Interstellar Molecular Hydrogen in the Galactic Disk // *Astrophys. J.* — 2021. — Vol. 911, № 1. — P. 55.
- [12] *van Dishoeck Ewine F., Black John H.* The Photodissociation and Chemistry of Interstellar CO // *Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 334. — P. 771.
- [13] *Bolatto Alberto D., Wolfire Mark, Leroy Adam K.* The CO-to-H<sub>2</sub> Conversion Factor // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 51, № 1. — P. 207–268.
- [14] *Sonnentrucker P., Welty D. E., Thorburn J. A., York D. G.* Abundances and Behavior of <sup>12</sup>CO, <sup>13</sup>CO, and C<sub>2</sub> in Translucent Sight Lines // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 168, № 1. — P. 58–99.

- [15] *Sheffer Yaron, Lambert David L., Federman S. R.* Ultraviolet Detection of Interstellar  $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$  and the CO Isotopomeric Ratios toward X Persei // *Astrophys. J. Lett.* — 2002. — Vol. 574, № 2. — P. L171—L174.
- [16] *van Dishoeck, E. F., Kristensen, L. E., Mottram, J. C. et al.* Water in star-forming regions: physics and chemistry from clouds to disks as probed by Herschel spectroscopy // *A&A.* — 2021. — Vol. 648. — P. A24.
- [17] *Spaans Marco, Neufeld David, Lepp Stephen et al.* Search for Interstellar Water in the Translucent Molecular Cloud toward HD 154368 // *Astrophys. J.* — 1998. — Vol. 503, № 2. — P. 780—784.
- [18] *Shustov Boris, Sachkov Mikhail, Gómez de Castro Ana I. et al.* WSO-UV—ultraviolet mission for the next decade // *Astrophys. Space. Sci.* — 2009. — Vol. 320, № 1—3. — P. 187—190.