

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 H_2

Из-за симметричности у молекулы 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 CO . С Земли по линиям излучения могут наблюдаться только H_2 в возбужденном состоянии в ближнем инфракрасном диапазоне ($\lambda \approx 2$ мкм). Основным методом изучения молекул 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 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 H_2 в диффузных облаках лежат в пределах $10^{14} \leq N(\text{H}_2) \leq 10^{20}$ см $^{-2}$, а доля молекул 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 H и H_2 , так как на краях облаков молекулы H_2 диссоциируют под действием УФ-излучения. Поглощая кванты полос Лаймана и Вернера, молекулы 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 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 H₂ экранирует CO, предотвращая диссоциацию [12]. Таким образом, в тех частях молекулярных облаков, где наблюдается CO, водород также находится в форме молекул H₂. Вот уже несколько десятилетий CO активно используется для определения лучевой концентрации молекул H₂ 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 $W(\text{CO}, J = 1-0)$ К км с⁻¹ — интегральная интенсивность излучения CO на длине волны 3 мм. Коэффициент пересчета CO-в-H₂ X_{CO} зависит от множества факторов, включая оптическую толщину линий, металличность среды и проч. Одновременные наблюдения CO и H₂ в УФ-диапазоне позволяют проводить калибровки фактора пересчета CO-в-H₂, 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 H₂ и CO, УФ-наблюдения позволили обнаружить в диффузных молекулярных облаках такие молекулы, как OH, C₂, N₂, CO₂, 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 H₂, т. к. его коротковолновая граница составляет 115 нм, а для H₂ 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], [¹³C II], [O I], and HCO⁺ 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-H₂ 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 ¹²CO, ¹³CO, and C₂ 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.