

ORGANIC MATTER IN THE INTERSTELLAR MEDIUM

G.S. Simonian, Candidate of Chemistry, Associate Professor
Yerevan State University, Armenia

The composition of interstellar clouds revealed the presence of 200 different molecules and particles, most of which are organic in nature, being integral elements of life. It is shown that the interstellar medium consists of interstellar gas, dust, interstellar magnetic fields, cosmic rays, and dark matter. Interstellar dust contains water ice, silicates, graphite, olivine, oxides and sulfides of metals. On the top it is covered by the shell of the frozen gas. Temperature of dust in the interstellar space is around 10-20 K. It is demonstrated that at low temperatures the organic substances are formed on the surface of dust particles many times faster than at the room temperature. It is discussed that the cause of acceleration at low temperatures for gas phase reactions is the quantum tunneling, while for solid-state reactions - mechanism such as a traveling wave phenomena.

Keywords: organic matter, space, interstellar medium, interstellar dust, cryochemistry, reaction mechanism, tunneling effect, the traveling wave phenomenon.

Conference participant


ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

Симонян Г.С., канд. хим. наук, доцент
Ереванский государственный университет Ереван, Армения

В составе межзвездных облаков установлено наличие 200 различных молекул и частиц, большая часть которых имеет органическую природу и является составной частью нефти. Показано, что в состав межзвездной среды входят межзвездный газ, пыль, межзвездные магнитные поля, космические лучи, а также тёмная материя. Межзвездная пыль содержит водяной лёд, силикаты, графит, оливин, оксиды и сульфиды металлов и покрыта сверху оболочкой из намерзших газов. Температура пыли в межзвездном пространстве около 10-20 К. Показано, что при низких температурах органические вещества образуются на поверхности пылинки в десятки раз быстрее, чем при комнатной температуре. Обсуждается, что причиной ускорения скорости при низких температурах для газофазных реакций является квантовое туннелирование, а для твердофазных реакций - механизм типа явлений бегущей волны.

Ключевые слова: органическое вещество, космос, межзвездная среда, межзвездная пыль, криохимия, механизм реакции, эффект туннелирования, явление бегущей волны.

Участник конференции

 <http://dx.doi.org/10.18007/gisap:pmc.v0i8.1555>

Межзвёздная среда – вещество и поля, заполняющие межзвёздное пространство внутри галактик. В состав межзвёздной среды входят межзвёздный газ, пыль (1 % от массы газа), межзвёздные магнитные поля, космические лучи, а также **тёмная материя**. Химический состав межзвёздной среды — продукт первичного нуклеосинтеза и ядерного синтеза в звёздах. А в конце жизни звезды с неё сбрасывается оболочка, обогащая межзвёздную среду продуктами ядерного синтеза. Пространственное распределение межзвёздной среды нетривиально. Помимо общегалактических структур, таких как перемычка (бар) и спиральные рукава галактик, есть и отдельные холодные и тёплые облака, окружённые более горячим газом. Основная особенность межзвёздной среды – её крайне низкая плотность – в среднем 1000 атомов в кубическом сантиметре.

Химический состав Вселенной зависит от многих факторов, в том числе и от температуры. По мере повышения температуры состав частиц, существующих в атмосфере звезды, упрощается. Так, спектральный анализ звезд с температурой 10000-50000°C показывает в их атмосферах линии ионизированных водорода и гелия и ионы металлов. В атмосферах звезд с температурой 5000°C

обнаруживаются уже радикалы, а в атмосферах звезд с температурой 3800°C – даже молекулы оксидов. В спектрах самых горячих звезд преобладают линии водорода и гелия, но по мере понижения температуры появляются линии других элементов и даже линии соединений. Это еще простые соединения: оксиды циркония, титана, а также радикалы CH, OH, NH, CH₂, C₂, C₃, CaH и др. Наружные слои звезд состоят главным образом из водорода. В среднем на 10 000 атомов водорода приходится около 1000 атомов гелия, 5 атомов кислорода и менее 1 атома других элементов [1].

В природе самая низкая температура была зарегистрирована в туманности Бумеранг. Эта туманность расширяется и выбрасывает охлажденный газ со скоростью 500 000 км/ч. За счет огромной скорости выброса молекулы газа охладились до 2 К. Для сравнения. Обычно, в открытом космосе температура опускается до 0 К. Самая низкая естественная температура на Земле 183.7 К в Антарктиде [2]. А самая низкая температура в Солнечной системе, 38 К на поверхности Тритона (спутник Нептуна).

В этом обзоре основное внимание уделено на образование органических веществ в условиях космоса. Исходя из этого, целью этой статьи является разъяснить, сколько и какие классы

органических соединений идентифицированы в космосе и особенности химических реакций их образования в космических условиях.

Космохимия – наука о химическом составе космических тел, законах распространённости и распределения химических элементов во Вселенной, процессах сочетания и миграции атомов при образовании космического вещества. Космохимия исследует преимущественно «холодные» процессы на уровне атомно-молекулярных взаимодействий веществ, в то время как «горячими» ядерными процессами в космосе – плазменным состоянием вещества, нуклеогенезом (процессом образования химических элементов) внутри звёзд занимается физика.

Криохимия (от греч. kryos – холод и химия), изучает закономерности химических превращений при низких и сверхнизких температурах. В криохимии под низкими понимают температуры от 223 до 77 К, под сверхнизкими – ниже 77 К (температуры кипения азота). Современная криохимия – самостоятельная область исследований, связанная с различными разделами химии, физики, биологии, с разработкой аппаратуры и оборудования для проведения процессов при криогенных температурах. Основные задачи криохимии: выявление особенностей реакций в газовой, жидкой и

Табл. 1.

Органические молекулы, обнаруженные в межзвездном пространстве (N число атомов)

N=5	N=6	N=7	N=8	N=9	N=10
HCOOH	CH ₃ OH	CH ₃ CHO	CH ₃ COOH	CH ₃ CONH ₂	(CH ₃) ₂ CO
NH ₂ CN	CH ₃ CN	CH ₃ OCH ₃	HOCH ₂ CHO	CH ₃ CH ₂ OH	NH ₂ CH ₂ COOH
CH ₄	CH ₃ SH	CH ₂ CHCN	CH ₂ CHCHO	CH ₃ CH ₂ CN	(CH ₂ OH) ₂
π-C ₃ H ₂	C ₂ H ₄	π-C ₂ H ₄ O	CH ₂ CCHCN	CH ₂ CHCH ₃	CH ₃ CH ₂ CHO
HCCNC	CH ₃ CNH				
	CH ₃ NH ₂				

твёрдой фазе, установление механизмов низкотемпературных превращений, исследование явлений, отличающих криохимические процессы от реакций при обычных температурах, изучение физико-химических свойств нестабильных соединений и реакций активных частиц [3].

Открытия молекул в межзвездной среде происходили одновременно с развитием радиоастрономии. Впервые был открыт водород, который излучает на диапазоне 21 см. Первой молекулой, которая была открыта в космосе по собственному излучению, была молекула гидроксида OH, которая излучает на длине волны 18 см. Она была открыта в начале 60-х годов. Первые многоатомные молекулы – молекулы воды и аммиака – с длинами волн порядка 1.35 см открыты в 1967 г. В 1970 году была открыта первая углеродсодержащая молекула — молекула CO, радиолиния которой с длиной волны 2,64 мм наблюдается почти во всех областях межзвездной среды. В 70-е годы были впервые открыты и более сложные органические соединения – формальдегид, метанол и другие. В 1993 г. было обнаружено свыше 80 молекул, наиболее тяжелой была 13-ти атомная молекула HC₁₁N. В составе межзвездных облаков до 2007 г. было обнаружено более 150 различных молекул и частиц, большая часть которых имеет органическую природу (таблица 1). Сейчас известны свыше 200 веществ. Среди обнаруженных в диффузных облаках имеются также формальдегид, ароматические углеводороды, фуллерены, углеродные цепочки, алмазы и сложные ароматические соединения. Обнаружены также цианистый водород, формальдегид, цианацетилен, муравьиная кислота. Из неорганических молекул идентифицированы простые вещества – углерод, H₂, O₂ и N₂. Оксиды

– SO, CO, NO, SiO, N₂O, SO₂, FeO, соединения водорода – LiH, H₂O, HCl, HF, NH₃, HDO, HCN и H₂S. Соли – KCl, NaCl, NaCN [4].

Ученые из Института Макса Планка, Корнельского университета и Кельнского университета, в горячем и плотном облаке газа, известного как «большая молекула Heimat», с помощью метрового телескопа IRAM 30 в Испании обнаружили новые молекулы, этилформиат (C₂H₅OCHO) и n-пропил цианида (C₃H₇CN), которые представляют собой два различных класса молекул – сложные эфиры и алкильные цианиды [5]. Немецкие и американские ученые при помощи телескопа ALMA (Atacama Large Millimeter/ Submillimeter Array), расположенного в Чили, обнаружили в газопылевом облаке Стрелец В2 органические вещества: структурные изомеры пропилацианида [6].

В плотном газопылевом облаке, расположенном по направлению к звезде Cernis 52 в созвездии Персей учеными из испанского Института астрофизики на Канарах, найден антрацен, самая сложная органика, когда-либо обнаруженная на просторах открытого космоса [7]. Пару лет назад эта же команда в этой же области пространства обнаружила и другую молекулу – нафталин [8].

Профессор СунКвок и доктор Йонг Цанг из университета ГонкКонга (Китай) показали, что во Вселенной, помимо метана и другой элементарной органики, существует смесь из более сложных алифатических и ароматических (ряда бензола) соединений [9]. Однако открытие команды астрофизиков свидетельствует о том, что эти вещества могут быть синтезированы в космосе без какого-либо участия живых организмов [10]. Спектральные характеристики этого излучения долгое время оставались необъяснен-

ными. На протяжении двух последних десятилетий общепринятым было мнение о том, что они соответствуют простым молекулам полициклических ароматических углеводородов. Но Квок и Цанг, проанализировав спектр излучения, испускаемого звёздной пылью, образующийся в результате взрыва новых звезд V2362 Лебеда и V2361 Лебеда после 251 и 446 дней соответственно, установили, что сложная органика образуется за очень короткий по галактическим меркам период времени, исчисляющийся неделями. Теоретически этот синтез невозможно осуществить в условиях, близких к вакууму, но тем не менее он происходит в околосвездной и межзвездной туманностях.

Группа астрономов во главе с Яном Ками в планетарной туманности Тс 1 впервые идентифицировали фуллерены, а именно углеродные молекулы C₆₀ и C₇₀ [11]. Астрономы ALMA во главе с Карином Эбергом наблюдали в субмиллиметровом диапазоне окрестности звезды MWC 480 в созвездии Тельца. Показано, что протопланетный диск MWC 480 содержит большое количество нитрила уксусной кислоты [12].

Как было сказано в начале, межзвездная среда весьма разреженная и достаточно неоднородная среда. Имеются как сильно разложенные и горячие области, также значительно плотные и холодные области – до 10 К. Собственно в межзвездной среде, даже в наиболее плотных ее участках, элементы находятся в условиях, далеких от термодинамического равновесия. В силу низкой концентрации вещества химические реакции в межзвездном пространстве крайне маловероятны. Поэтому было высказано предположение, что в построении межзвездных молекул принимают участие частицы космической пыли.

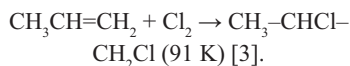
Температура пыли в межзвездном пространстве около 10-20 К. Межзвездная пыль содержит водяной лед, силикаты, графит и, вероятно, оливин, оксиды и сульфиды металлов (MgO, CaO, FeO, FeS₂), покрытые сверху оболочкой из намерзших газов [1, 13]. Размеры гранул можно определить из их рассеивающих свойств; обычно они меньше 1 мкм. Самое сильное рассеивание обусловлено гранулами 0.3 мкм, но в пыли должны присутствовать также частицы более малых размеров. Межзвездный лёд содержит вода, шмол газ, углекислый газ, метанол, аммиак, метан. Гранулы пыли образуются в атмосферах звезд поздних спектральных классов. Газ конденсируется в гранулы таким же образом, как вода в атмосфере Земли может конденсироваться в снег и лед. Затем гранулы выбрасываются в межзвездное пространство давлением излучения. Гранулы могут образовываться также при рождении звезды и, возможно, непосредственно из атомов и молекул в межзвездных облаках. Впервые наблюдения межзвездного льда были проведены в 1973 году в области массивного звездообразования Orion BN/KL [14].

При столкновении с пылинкой атомы адсорбируются на поверхности пылинки и вступают в химические реакции с другими атомами и молекулами. Причем эти реакции происходят с помощью квантово-механического подбарьерного перехода, для которого участникам реакции не требуется большой энергии. Таким образом, поверхность космической пыли является прекрасным катализатором для формирования молекул из атомов. Но ситуация упрощается, когда атомы, которые составляют молекулу, по очереди прилипают к поверхности пылинки. Они бегают по пылинке в результате тепловых движений, сталкиваются друг с другом, и в процессе этих столкновений начинает расти большая молекула. Под действием ультрафиолетового излучения некоторые молекулы оболочки (H₂O, CH₄, NH₃) диссоциируют с образованием радикалов – реакционно способных фрагментов молекул. Эти радикалы могут рекомбинировать с образованием других молекул. В результате длительного об-

лучения может появиться более сложная смесь молекул и радикалов. Таким образом, при сверхнизких температурах из наиболее легких элементов (H, C, N, O) синтезируются прежде более сложные молекулы, похожие на компоненты нефти [15].

Однако известно, что химические реакции замедляются с понижением температуры, поскольку уменьшается их энергия для преодоления барьера, или «порога реакции». Но около века назад были найдены процессы, скорость которых увеличивалась не при нагревании, а при охлаждении. Начиная с работ Джеймса Дюара систематические исследования в области криохимии ведутся с 50-х годов прошлого века, чему способствовало появление ряда новых экспериментальных методик. На сегодняшний день известно сравнительно мало химических реакций, которые происходят при низких температурах самопроизвольно, без специального инициирования. К ним относятся, в первую очередь, реакции с участием молекулярного фтора: 2Na + F₂ = 2NaF (реакция идет при 85 К) и реакция 2NO + O₂ ↔ N₂O₄, скорость которой сильно увеличивается в интервале 83-90 К.

Для жидкофазных реакций (например, галогенов с олефинами) при низких температурах важное значение приобретают сравнительно слабые межмолекулярные взаимодействия реагентов друг с другом и с молекулами среды, которые при обычных температурах не существенны из-за теплового движения.



В работе [16] проводились исследования на реакциях CN радикала с CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₆ и C₂H₂ в температурных интервалах 295-700 К. Показано, что эти химические реакции замедляются с понижением температуры, и энергии активации невысокие. В обзоре [44] показано, что при экстраполяции этих измерений к температурам межзвездного пространства – 20 К константа скорости для реакции CN радикала с C₂H₆, понижается на 7 порядков. Однако экспериментально получается, что с понижением тем-

пературы до 200 К скорость реакции уменьшается и потом растет. При температуре 25 К скорость реакции на 6 порядков больше, чем экстраполированные значения [17].

С наибольшей вероятностью при низкой температуре идет процесс, который характеризуется наименьшей энергией активации. Следовательно, понижение температуры в подобных системах может привести одновременно к двум желательным результатам: во-первых, благодаря изменению механизма образования основного продукта реакции облегчается процесс его накопления через низкотемпературные молекулярные комплексы, во-вторых, подавляются побочные процессы, характеризующиеся, как правило, более высокой энергией активации. В конечном счете, реализуется высокоселективный химический процесс вопреки классическим правилам химии. Короче говоря, межзвездное пространство – это своего рода квантово-химическая лаборатория, в которой может появиться целый ряд разнообразных органических молекул, которые астрономы и обнаружили в космосе.

Группе ученых под руководством Двейн Хэрд, из британского Университета Лидса, воссоздав условия космоса в лаборатории, удалось наблюдать реакцию гидроксильного радикала (OH) с метанолом с образованием метокси радикала (CH₃O) при 63 К [18]. Они обнаружили, что при такой невообразимо низкой температуре газы не только реагируют, но и делают это со скоростью в 50 раз большей, чем при комнатной температуре. Такая реакция с образованием CH₃O происходит в космическом пространстве, заполненном газом, причем ее причиной может оказаться квантовое туннелирование. Квантовое туннелирование – «неклассическое явление», которое означает, что волновая функция взаимодействия OH и метанола имеет ненулевую вероятность проникновения под барьер реакции. То есть система может появиться со стороны «продукта реакции», не пройдя при этом через вершину барьера. Туннелирование вытекает из правил квантовой механики, которые утверждают: частицы не имеют определенных со-


стояний, положений и скоростей, а все эти величины носят вероятностный характер. Так что, хотя данная частица с большой вероятностью должна находиться по одну сторону барьера, все же у нее есть очень небольшой шанс появиться по другую его сторону [19].







Показано также [20], что при 10, 50 и 100 К реакция между CH_3OH и OH обеспечивает эффективный газофазный маршрут образования газообразного метокси радикала (CH_3O), который был недавно обнаружен в холодных, плотных межзвездных облаках. При изучении кинетики реакций гидроксильных радикалов с ацетоном и диметилловым эфиром в температурном диапазоне 63-148 К показано, что для ацетона наблюдается большая отрицательная температурная зависимость, причем коэффициент скорости увеличивается в 62 раза при понижении температуры от 148 К до 79 К. Для диметилэфира коэффициент скорости увеличивается только в 5.5 раз при понижении температуры от 138 К до 63 К [21]. Коэффициенты скорости для реакций OH с этанолом и изопропанолом значительно увеличиваются при понижении температуры, примерно в 18 раз в пределах от 293 и 54 К для этанола, в 10 раз в пределах между 298 и 88 К для реакции $\text{OH} + \text{изопропанол}$ [22]. В работе [23] показано, что скорость реакции гидроксильного (OH) радикала с HC(O)OCH_3 увеличивается на один порядок при понижении от 64 К до 22 К и на 3 порядка от 298 К до 22 К. А в работе [4] проанализированы результаты исследований реакционной способности углеродсодержащих молекул при сверхнизких температурах, прежде всего кинетика реакций радикалов C_2 и C_4H с UV -от метана до бутана, от этена до бутена и от этина до бутина.

Результаты исследований, касающихся новых явлений типа бегущей волны в низкотемпературной химии твердого тела наблюдаются в самых разнообразных твердофазных химических реакциях при температурах жидкого азота или гелия, обсуждаются в работе [24]. Исследованные процессы характеризуются аномально высокими скоростями реакции, которые сравнимы со скоростью самых быстрых реакций горения высокой

температуры в классической химии. Предполагается, что механизм этих реакций широко встречается в космосе. В обзоре [25] с целью изучения эволюции углеродистых соединений предлагается исследовать физико-химические модели, имитирующие неравновесные процессы на поверхности частиц пыли в межзвездных облаках, вызванные космическими лучами, УФ излучением и ударными волнами. В космическом пространстве радиоактивное излучение есть везде. Излучение приводит некоторый процент атомов в возбужденное состояние, и считать их холодными уже нельзя. Поэтому могут идти реакции, имеющие очень большую энергию активации.

References:

1. Spittser L. Prostranstvo mezhdz zvezdami., Per. s angl. k.fiz.-mat. Nauk [Interstellar space., Translated from English by the Candidate of Physics and Mathematics]. B.M. Shustova, ed. By the d-r phys.-math. scien. V.I. Slysha. – Moskva, Mir, 1986. – 182 p.
2. Kravchuk P.A. Rekordy prirody [Records of nature]. - L., Erudit, 1993. - 216 p.
3. Tret'yakov YU.D. Nizkotemperaturnyye protsessy v khimii i tekhnologii., Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal [Low-temperature processes in chemistry and technology., Soros Educational Journal], No. 4, 1996., pp. 45-51.
4. Kanoza A. Kinetika gazofaznykh reaktsiy pri sverkhnikzikh temperaturakh: sovremennyye dostizheniya v khimii ugleroda s ispol'zovaniyem metoda CRESU., Uspekhi khimii [Kinetics of gas-phase reactions at very low temperatures: recent achievements in carbon chemistry using the CRESU method. Success in chemistry]. – 2007., Vol. 76, Issue 12., pp. 1171–1184.
5. Comito C., Schilke P. Increased complexity in interstellar chemistry: detection and chemical modeling of ethyl formate and n-propyl cyanide in Sagittarius B2(N)., Astronomy & Astrophysics. – 2009., Vol. 499, No. 1., pp. 215–232.  <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811550>

6. Belloche A., Garrod R.T., Müller H.S.P., Menten K.M. Detection of a branched alkyl molecule in the interstellar medium: iso-propyl cyanide., Science. – 2014., Vol. 345., pp. 1584-1587.  <https://doi.org/10.1126/science.1256678>
7. Iglesias-Groth S., Manchado A., Rebolo R., Gonzalez Hernandez J.I., Garcia-Hernandez D.A., Lambert D.L. A search for interstellar anthracene toward the Perseus anomalous microwave emission region., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2010., Vol. 407(4)., pp. 2157-2165. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17075.x>
8. Iglesias-Groth S., Manchado A., Rebolo R., Gonzalez Hernandez J.I., Garcia-Hernandez D.A., Lambert D.L. Evidence for the Naphthalene Cation in a Region of the Interstellar Medium with Anomalous Microwave Emission., The Astrophysical Journal. – 2008., Vol. 685(1)., pp. 55.  <https://doi.org/10.1086/592349>
9. Kwok S., Zhang Y. Mixed aromatic-aliphatic organic nanoparticles as carriers of unidentified infrared emission features., Nature. – 2011., Vol. 479, No. 7371., pp. 80-83.  <https://doi.org/10.1038/nature10542>
10. Kwok S. Organic dust in the interstellar medium., Korean Astronomical Society. – 2015., Vol. 30(2)., pp. 155-158.  <https://doi.org/10.5303/pkas.2015.30.2.155>
11. Cami J., Bernard-Salas J., Peeters E., Malek S. E. Detection of C60 and C70 in a Young Planetary Nebula., Science. – 2010., V. 329, Issue 5996., pp. 1180-1182.  <https://doi.org/10.1126/science.1192035>
12. Karin O.I., Guzman V.V., Furuya K., GiC., Aikawa Y., Andrews S.M., Lomis R., Wilner D.J. The comet-like composition of a protoplanetary disk as revealed by complex cyanides., Nature. – 2015., Vol. 520, Issue 7546., pp. 198-201.  <https://doi.org/10.1038/nature14276>
13. Bozhokin S.V. Svoystva kosmicheskoy pyli., Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal [The properties of cosmic dust., Soros Educational Journal]. – 2000., No. 6., pp. 72-77.
14. Gillett F.C., Forrest W.J., Merrill K.M. 8 - 13-micron spectra of NGC 7027, BD +30 3639, and NGC 6572.,

Astrophys. J. – 1973., Vol. 183., pp. 87–93. <https://doi.org/10.1086/152211>

15. Simonyan G.S. Endogennoye obrazovaniye naftidov v svete abiogennoy teorii obrazovaniya nefti., Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskkiye nauki [Endogenous formation of naphthides in the light of the abiogenic theory of oil formation., Scientific Review. Engineering] – 2016., No. 4., pp. 77–101.

16. Herbert L., Smith I.W.M., Spencer-Smith R.D. Rate constants for the elementary reactions between CN radicals and CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₆, and C₂H₂ in the range: 295 || T/K || 700., Int. J. Chem. Kinet. – 1992., Vol. 24, Issu 2., pp. 791–802. <https://doi.org/10.1002/kin.550240904>

17. Sims I.R., Queffelec J.L., Travers D., Rowe B.R., Herbert L.B., Karthaus J., Smith I.W.M.. Rate constants for the reactions of CN with hydrocarbons at low and ultra-low temperatures., Chem. Phys. Lett., 1993., Vol. 211, Issu 4., pp. 461–468. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(93\)87091-g](https://doi.org/10.1016/0009-2614(93)87091-g)

18. Shannon R.J., Blitz M.A., Goddard A., Heard D.E Accelerated chemistry in the reaction between the hydroxyl radical and methanol at interstellar temperatures facilitated by tunnelling., Nature Chemistry. – 2013., Vol. 5, pp. 745–749. <https://doi.org/10.1038/nchem.1692>

19. Delone N.B. Tunnel'nyy effekt., Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal [The tunnel effect., Soros Educational Journal], – 2000., No. 1., pp.79–84.

20. Acharya K, Herbst E, Caravan R.L, Shannon R.J, Blitz M.A, Heard D.E The importance of OH radical–neutral low temperature tunnelling reactions in interstellar clouds using a new model., Molecular Physics., 2015., V. 113., pp. 2243–2254. <https://doi.org/10.1080/00268976.2015.1021729>

21. Shannon R.J., Caravan R.L., Blitz M.A., Heard D.E. A combined experimental and theoretical study of reactions between the hydroxyl radical and oxygenated hydrocarbons relevant to astrochemical environments., Physical Chemistry Chemical Physics. – 2014.,

Vol. 16., pp. 3466–3478. <https://doi.org/10.1039/c3cp54664k>

22. Caravan R.L., Shannon R.J., Lewis T., Blitz M.A., Heard D.E. Measurements of Rate Coefficients for Reactions of OH with Ethanol and Propan-2-ol at Very Low Temperatures., Journal of Physical Chemistry A. – 2015., Vol. 119., pp. 7130–7137. <https://doi.org/10.1021/jp505790m>

23. Jiménez E., Antiñolo M., Ballesteros B., Canosa A. Albaladejo, J. First evidence of the dramatic enhancement of the reactivity of methyl formate (HC(O)OCH₃) with OH at temperatures of the interstellar medium: a gas-phase kinetic study between 22 K and 64 K., Phys. Chem. Chem. Phys. – 2016., Vol. 18 (3), pp. 2183–2191. <https://doi.org/10.1039/c5cp06369h>

24. Barelko V.V., Kiryukhin D.P., Barkalov I.M., Kichigina G.A., Pumir A. Nonlinear traveling wave mechanisms of fast solid-phase cryochemical reactions., Russian Chemical Bulletin. – 2011., Vol. 60 <https://doi.org/10.1007/s11172-011-0196-6>

25. Otroshchenko V.A., Alekseyev V.A., Ryabchuk V.K. Neravnovesnyye protsessy sinteza organicheskogo veshchestva v mezhzvezdnykh gazo-pylevykh oblakakh., Uspekhi biologicheskoy khimii [Nonequilibrium processes of organic matter synthesis in the interstellar gas and dust clouds] – 2002., Vol. 42., pp. 295–320.

Литература:

1. Спитцер Л. Пространство между звездами., Пер. с англ. к. физ.-мат. наук Б.М. Шустова, под ред. д-ра физ.-мат. наук В.И. Слыша.– М., Мир, 1986.– 182 с.

2. Кравчук П.А. Рекорды природы. — Л., Эрудит, 1993. — 216 с.

3. Третьяков Ю.Д. Низкотемпературные процессы в химии и технологии., Соросовский образовательный журнал, № 4, 1996., С. 45–51.

4. Каноза А. Кинетика газофазных реакций при сверхнизких температурах: современные достижения в химии углерода с использованием метода CRESU., Успехи химии.– 2007., Т.76, Вып.12., С. 1171–1184.

5. Comito C., Schilke P. Increased complexity in interstellar chemistry:

detection and chemical modeling of ethyl formate and n-propyl cyanide in Sagittarius B2(N), Astronomy & Astrophysics. – 2009., V. 499, № 1., pp. 215–232. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811550>

6. Belloche A., Garrod R.T., Müller H.S.P., Menten K.M. Detection of a branched alkyl molecule in the interstellar medium: iso-propyl cyanide., Science. – 2014., V. 345., pp. 1584–1587. <https://doi.org/10.1126/science.1256678>

7. Iglesias-Groth S., Manchado A., Rebolo R., Gonzalez Hernandez J.I., Garcia-Hernandez D.A., Lambert D.L. A search for interstellar anthracene toward the Perseus anomalous microwave emission region., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2010., V. 407(4), pp. 2157–2165. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17075.x>

8. Iglesias-Groth S., Manchado A., Rebolo R., Gonzalez Hernandez J.I., Garcia-Hernandez D.A., Lambert D.L. Evidence for the Naphthalene Cation in a Region of the Interstellar Medium with Anomalous Microwave Emission., The Astrophysical Journal. – 2008., V.685(1), pp. 55. <https://doi.org/10.1086/592349>

9. Kwok S., Zhang Y. Mixed aromatic–aliphatic organic nanoparticles as carriers of unidentified infrared emission features., Nature. – 2011., V. 479, № 7371., pp. 80–83. <https://doi.org/10.1038/nature10542>

10. Kwok S. Organic dust in the interstellar medium., Korean Astronomical Society. – 2015., V. 30(2), pp. 155–158. <https://doi.org/10.5303/pkas.2015.30.2.155>

11. Cami J., Bernard-Salas J., Peeters E., Malek S. E. Detection of C₆₀ and C₇₀ in a Young Planetary Nebula., Science. – 2010., V. 329, Issue 5996., pp. 1180–1182. <https://doi.org/10.1126/science.1192035>

12. Karin O.I., Guzman V.V., Furuya K., GiC., Aikawa Y., Andrews S.M., Lomis R., Wilner D.J. The comet-like composition of a protoplanetary disk as revealed by complex cyanides., Nature. – 2015., V. 520, Issue 7546., pp.198–201. <https://doi.org/10.1038/nature14276>

13. Божокин С.В. Свойства космической пыли., Соросовский обра-

зовательный журнал. – 2000., № 6., С. 72-77.

14. Gillett F.C., Forrest W.J., Merrill K.M. 8 — 13-micron spectra of NGC 7027, BD +30 3639, and NGC 6572., *Astrophys. J.*–1973., V. 183., pp. 87–93. [crossref https://doi.org/10.1086/152211](https://doi.org/10.1086/152211)

15. Симонян Г.С. Эндеогенное образование нафтидов в свете абиогенной теории образования нефти., *Научное обозрение. Технические науки* – 2016., № 4., С. 77-101.

16. Herbert L., Smith I.W.M., Spencer-Smith R.D.. Rate constants for the elementary reactions between CN radicals and CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₆, and C₂H₂ in the range: 295 || T/K || 700., *Int. J. Chem. Kinet.* – 1992., V. 24, Issu 2., P. 791-802. [crossref https://doi.org/10.1002/kin.550240904](https://doi.org/10.1002/kin.550240904)

17. Sims I.R., Queffelec J.L., Travers D., Rowe B.R., Herbert L.B., Karthaus J., Smith I.W.M.. Rate constants for the reactions of CN with hydrocarbons at low and ultra-low temperatures., *Chem. Phys. Lett.*, 1993., V. 211, Issue 4., pp. 461-468. [crossref https://doi.org/10.1016/0009-2614\(93\)87091-g](https://doi.org/10.1016/0009-2614(93)87091-g)

18. Shannon R.J., Blitz M.A., Goddard A, Heard D.E Accelerated chemistry in the reaction between the hydroxyl radical and methanol at

interstellar temperatures facilitated by tunnelling., *Nature Chemistry.* – 2013., V. 5., pp. 745-749. [crossref https://doi.org/10.1038/nchem.1692](https://doi.org/10.1038/nchem.1692)

19. Делоне Н.Б. Туннельный эффект., *Соросовский образовательный журнал.* – 2000., № 1., С.79-84.

20. Acharyya K., Herbst E., Caravan R.L., Shannon R.J., Blitz M.A., Heard D.E. The importance of OH radical–neutral low temperature tunnelling reactions in interstellar clouds using a new model., *Molecular Physics.*, 2015., V. 113., pp. 2243-2254. [crossref https://doi.org/10.1080/00268976.2015.1021729](https://doi.org/10.1080/00268976.2015.1021729)

21. Shannon R.J., Caravan R.L., Blitz M.A., Heard D.E. A combined experimental and theoretical study of reactions between the hydroxyl radical and oxygenated hydrocarbons relevant to astrochemical environments., *Physical Chemistry Chemical Physics.* – 2014., V. 16., pp. 3466-3478. [crossref https://doi.org/10.1039/c3cp54664k](https://doi.org/10.1039/c3cp54664k)

22. Caravan R.L., Shannon R.J., Lewis T., Blitz M.A., Heard D.E. Measurements of Rate Coefficients for Reactions of OH with Ethanol and Propan-2-ol at Very Low Temperatures., *Journal of Physical Chemistry A.* – 2015., V. 119., pp. 7130-7137. [crossref https://doi.org/10.1021/jp505790m](https://doi.org/10.1021/jp505790m)

<https://doi.org/10.1021/jp505790m>

23. Jiménez E., Antiñolo M., Ballesteros B., Canosa A. Albaladejo, J. First evidence of the dramatic enhancement of the reactivity of methyl formate (HC(O)OCH₃) with OH at temperatures of the interstellar medium: a gas-phase kinetic study between 22 K and 64 K., *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2016., V. 18 (3), pp. 2183-2191. [crossref https://doi.org/10.1039/c5cp06369h](https://doi.org/10.1039/c5cp06369h)

24. Barelko V.V., Kiryukhin D.P., Barkalov I.M., Kichigina G.A., Pumir A. Nonlinear traveling wave mechanisms of fast solid-phase cryochemical reactions., *Russian Chemical Bulletin.* – 2011., V. 60, Issue 7., pp. 1286-1289. [crossref https://doi.org/10.1007/s11172-011-0196-6](https://doi.org/10.1007/s11172-011-0196-6)

25. Отрощенко В.А., Алексеев В.А., Рябчук В.К. Неравновесные процессы синтеза органического вещества в межзвездных газо-пылевых облаках., *Успехи биологической химии.* – 2002., Т. 42., С. 295-320.

Information about author:

1. Geworg Simonian – Candidate of Chemistry, Associate Professor; Yerevan State University; address: Armenia, Yerevan city; e-mail: sim-gev@mail.ru

