

Química e astronomia

Sérgio P. J. Rodrigues

Universidade de Coimbra, Portugal

Resumo

Desde tempos imemoriais que os seres humanos olham e tentam perceber o céu. Não sabiam bem o que eram aquelas luzes a brilhar e que se movimentavam de forma repetida. Hoje em dia parece muito fácil, mas demorou muito tempo a consolidar-se a imagem que atualmente temos do céu. E sobretudo, a sabermos qual era a sua composição química. Este artigo pretende fazer uma revisão de divulgação do conhecimento químico que temos do céu e mostrar que as informações químicas são indissociáveis do entendimento que temos hoje do universo.

Abstract

Since immemorial times, human beings have looked and tried to understand the sky. They didn't quite know what those lights were, shining and moving repeatedly. Today it seems very easy, but it took a long time to consolidate the image we have today of heaven. And above all, to know what its chemical composition was. This article intends to review the dissemination of chemical knowledge that we have of the sky and show that chemical information is inseparable from the understanding we have today of the universe.

Palavras-chave: moléculas no espaço, astroquímica.

Keywords: molecules in the space, astrochemistry.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n2.35752](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n2.35752)

1 Introdução

Estão registrados 118 elementos químicos, mas estima-se que existam 10^{80} átomos e 10^{12} galáxias no universo (ver referência [1]). Tratam-se de números muito grandes mas, curiosamente, o número de átomos contidos na areia de uma praia pode ser maior do que o número de galáxias no universo. Obviamente não estamos a falar da mesma coisa. Cada uma das galáxias é muito mais extensa do que 10^{12} praias. São estes alguns dos paradoxos que resultam dos grandes números e das coisas muito pequenas e muito grandes que envolvem a constante conhecida como o *número de Avogadro* ($6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) e a unidade do sistema internacional *mol*.

Poderíamos indicar muitos outros exemplos de grandes números. Por exemplo, estão registradas (em maio de 2021) mais de 182 milhões de substâncias orgânicas e inorgânicas, mas estima-se que o *espaço químico* (ver Ref. [2] e os demais artigos disponíveis no mesmo volume) chegue a 10^{60} substâncias. São descobertas ou inventadas mais de 15 mil novas substâncias por dia. Exis-

tem cerca de 9 milhões de espécies biológicas conhecidas, mas estima-se que existam mais de 100 milhões de espécies, sendo descobertas cerca de 50 por dia. Entretanto, temos cerca de 8 milhões de seres humanos no planeta, mas estima-se que tenham existido cerca de 10^{45} . E, cada ser humano é único, temos assim o mesmo número de moléculas de DNA diferentes. O que nos conduz ao número enorme de 10 elevado a cerca de 6 milhões de moléculas de DNA possíveis. Para estes números muito grandes não há unidades que os tornem “menores”, como ocorre na astronomia. Na Figura 1 podemos encontrar de forma esquematizada as dimensões típicas envolvidas na química. Esta ciência costuma ser designada por central, mas vemos que “central” significa estar envolvida em todas as ciências sempre que sejam referidas as composições ou os processos relacionados, desde as moléculas até as galáxias.

Nós hoje acreditamos (e todas as experiências têm confirmado) que a matéria é igual em todo o universo, e que as leis físicas são também as mesmas em qualquer lugar. Isso hoje está muito claro, mas nem sempre foi dessa forma. Acre-

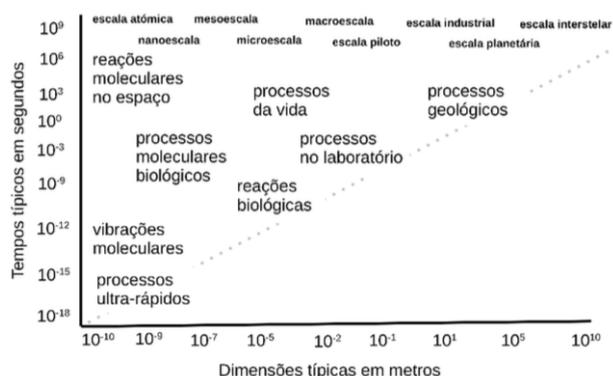


Figura 1: Tempos e dimensões espaciais da química.

ditamos, ainda, que os efeitos diminuem com as distância e que, embora a Lua esteja mais perto e provoque as marés nos oceanos, ela não tem efeito sobre coisas como os nascimentos e o crescimento das plantas. E se a Lua não tem efeito sobre essas coisas, os planetas do nosso sistema solar, que estão muito mais distantes, têm ainda menos, claro. Assim, as ideias da astrologia não têm qualquer base científica, mas são aspectos pitorescos do mundo atual. E, em termos históricos, Galileu por exemplo, além de astrônomo foi também astrólogo. Muitos outros cientistas o foram, muitos não acreditando nos resultados mas ganhando a vida com essa atividade. Os aspectos culturais e históricos são muito importantes no que concerne a astronomia, mas isso não faz com que os mitos que rodeiam a legítima e fundamental procura de explicações tenham base científica. Por outro lado, há muitas coisas que não precisam de uma explicação científica, como a poesia e a arte que se cruzam muitas vezes com a astronomia. Na Figura 2 podemos encontrar uma composição que tem sido apresentada pelo autor e que combina alguns dos aspectos referidos. Os mitos, a poesia ou a arte não têm de ter bases científicas, nem de estar "certos" ou "errados" (embora a ciência e os seus métodos nos possam ajudar a distinguir a fantasia da realidade), mas podem ajudar-nos a refletir sobre o universo e sobre a ciência.

A química é fundamental para se perceber a composição das estrelas ([3–13]) mas também nos permite procurar responder questões como a existência de água no sol ou da existência de aminoácidos no espaço interestelar. Claro que isso nos leva as outras perguntas. Se existe, como é que a água foi parar no Sol? Como é que detectamos água e outras moléculas no espaço? A existência de aminoácidos é uma prova da existência de vida

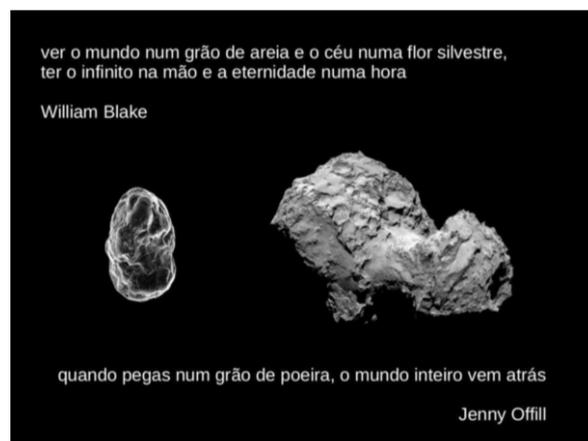


Figura 2: Composição realizada pelo autor envolvendo as imagens de um grão de areia e do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, e citações de dois escritores que envolvem alguns aspectos referidos.

no espaço? E muitas outras.

Os cientistas mostram muitas vezes que o que era considerado impossível era, afinal, possível, enquanto que os filósofos mostram muitas vezes que o que parecia perfeitamente possível, era afinal, impossível [14]. Muito famosa é a afirmação, atribuída a Auguste Comte, de que seria impossível saber a composição química das estrelas e planetas porque não podemos ir lá. De fato, Auguste Comte escreveu algo parecido em vários lugares (as obras dele são de domínio público e estão online [15]). Curiosamente, uns anos depois foi inventada a espectroscopia por Bunsen e Kirchhoff, a qual permite saber a composição de um material sem ir até ele.

Mas voltando à região do espectro eletromagnético mais conhecida (o espectro visível), observando o Sol, notou-se a presença de linhas de emissão desconhecidas, e foi assim que se descobriu o elemento químico hélio. A distribuição é proporcional à temperatura e segue uma lei conhecida com *radiação de corpo negro*, que é válida em muitas outras situações, como ferros em brasa ou nós mesmos (descobriu-se que os astronautas perdiam calor por radiação e portanto uma parte fundamental dos seus trajes é o isolamento em relação à reflexão da radiação). Algumas partes do espectro são diferentes devido ao dióxido de carbono e água na atmosfera, por exemplo. Por outro lado, hoje em dia, podem detectar-se muitos outros elementos e algumas moléculas no Sol. O hidrogênio, o elemento mais abundante no universo, absorve em regiões características. Em Coimbra, há muitos anos que registram a evolu-

ção das manchas solares e outros dados sobre o Sol com base no espectro do hidrogênio [16].

Na região da radiação visível é possível observar muitas coisas, como a galáxia de Andrômeda (a que está mais perto de nós), mas o espectro de micro-ondas ou de infravermelho dão informações precisas sobre a temperatura. Por exemplo, pode usar-se a distribuição dos isótopos 12 e 13 do carbono no monóxido de carbono para medir esta temperatura. Por isso se faz necessário conhecer com muita precisão a diatômica e o seu espectros vibracional-rotacional [17]. Conhecendo bem os espectros podemos estender a nossa visão e conhecimento sobre o universo.

Já foram detectadas centenas de compostos (ver [18, 19] e as referências neles contidas; ou, mais recentes, por exemplo, [12, 20, 21]). Alguns destes compostos são pouco usuais (ver, por exemplo, [22]), mas outros são muito comuns no planeta Terra, como a água, o amoníaco (a primeira molécula a ser detectada no espaço) ou a acetona (ver a Tabela 1). Pensa-se no espaço como sendo uma grande fonte de moléculas orgânicas e relacionadas com a vida [19, 23–28] e todo esse conhecimento pode ser usado nas salas de aulas do ensino fundamental e médio (básico e secundário em Portugal) [18, 29]. É curioso que, embora tenha sido sugerido e que os encontremos em cometas e asteroides, ainda não se encontraram aminoácidos no espaço interestelar (encontrá-los, significa, de forma geral, encontrar alguns dos seus isômeros que sejam precursores). Fazemos isso por dois caminhos, apontando os telescópios e calculando ou simulando. A mecânica quântica e a mecânica estatística têm nesta última fase um papel fundamental. Os métodos de extrapolação da energia de correlação para a base infinita são, nesse contexto, muito importantes ([30, 31]).

Os desafios colocados pela identificação das moléculas e das reação químicas que lhe dão origem podem ser enfrentados utilizando os métodos de cálculo de estrutura eletrônica [11, 28, 32–35]. Embora seja necessário meios de cálculo muito precisos, podemos também fazer alguns desses cálculos através de programas disponíveis na internet [36], sem termos os programas instalados, ou com objetivos educacionais (ver, por exemplo, [35]).

No que concerne os satélites, sondas e jipes espaciais, há um conjunto de instrumentos de aná-

Tabela 1: Compostos encontrados no espaço (adaptado de [18] e [19] - moléculas não presentes em [18] aparecem em **negrito**).

#	Moléculas ou íons
2	H ₂ , CO, CSi, CP, CS, NO, NS, SO, HCl, NaCl, KCl, AlCl, AlF, PN, SiN, SiO, SiS, NH, OH, C ₂ , CN, HF, FeO, LiH, CH, CH ⁺ , CO ⁺ , SO ⁺ , SH, N ₂ , O ₂ , CF⁺ , ArH⁺
3	H ₂ O, H ₂ S, HCN, HNC, CO ₂ , SO ₂ , MgCN, MgNC, NaCN, N ₂ O, NH ₂ , OCS, CH ₂ , HCO, C ₃ , C ₂ H, C ₂ O, C ₂ S, AlNC, HNO, SiCN, SiC ₂ , HCO ⁺ , HSO ⁺ , H ₃ ⁺ , OCN ⁻ , H₂Cl⁺
4	NH ₃ , H ₂ CO, H ₂ CS, C ₂ H ₂ , HNCO, HNCS, H ₃ O ⁺ , SiC ₃ , C ₃ S, H ₂ CN, C ₃ H, HCCN, CH ₃ , C ₂ CN, C ₃ O, HCNH ⁺ , HOCO ⁺ , PH₃
5	CH ₄ , SiH ₄ , CH ₂ NH, NH ₂ CN, CH ₂ CO, HCOOH, HC ₃ N, HC ₂ NC, C ₃ H ₂ , CH ₂ CN, H ₂ COH, C ₄ Si, C ₅ , HNC ₃ , C ₄ H, CH₃Cl
6	CH ₃ OH, CH ₃ SH, C ₂ H ₄ , H(C ₂) ₂ H, CH ₃ CN, CH ₃ NC, HC(O)NH ₂ , HC ₃ (O)H, HC ₃ NH ⁺ , HC ₄ N, C ₅ N, C ₅ H, H ₂ C ₄ , C ₂ H ₂ C(O), H ₂ C ₂ NH, CH₅S
7	HC(O)CH ₃ , C ₂ H ₄ O, CH ₂ CH(OH), CH ₃ C ₂ H, CH ₃ NH ₂ , CH ₂ CH(CN), H(C ₂) ₂ CN, C ₆ H, NH₂CH₃
8	CH ₃ CO ₂ H, HC(O)OCH ₃ , HOCH ₂ C(O)H, CH ₃ C ₃ N, H ₂ C ₆ , H(C ₂) ₃ H, C ₂ H ₃ C(O)H, C ₇ H, H ₂ C ₃ H(CN), (NH₂)₂CO
9	(CH ₃) ₂ O, CH ₃ CH ₂ OH, CH ₃ CH ₂ CN, CH ₃ C ₄ H, HC ₇ N, C ₈ H, CH ₃ C(O)NH ₂
10	(CH ₃) ₂ CO, HOCH ₂ CH ₂ OH, C ₂ H ₅ C(O)H, CH ₃ (C ₂) ₂ CN, (CH₂OH)₂
11	HC ₉ N, CH₃C₆H , CH₂H₅OCHO
12	C ₆ H ₆ , C₃H₅N , C₂H₅OCH₃
13	HC ₁₁ N, C₆H₅CN
24	C₁₄H₁₀
60	C₆₀ , C₆₀⁺ ,
70	C₇₀

lise química que é importante considerar. Por exemplo, na sonda Rosetta que aterrisou no co-

menta 67P (Churyumov-Gerasimenko), há muitos instrumentos de que se destacam: Alice (Ultraviolet Imaging Spectrometer), COSIMA (Cometary Secondary Ion Mass Analyser), MIDAS (Micro-Imaging Dust Analysis System), OSIRIS (Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System), ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis), os quais se baseiam em vários métodos de análise química espectroscópica e de espectrometria de massa. Muitas dessas tecnologias estão em desenvolvimento e acabam por encontrar utilidades aqui na Terra. Um exemplo são os métodos de identificação automática de rochas em fábricas de cimento ou minas.

Nas muitas sondas e satélites enviadas a Marte, nomeadamente a Viking (1976), Mars Pathfinder (1997), Sojourner (1997), Opportunity (2004), Spirit (2004), Phoenix (2008), Curiosity (2012-2016 e outras datas), Insight (2018 e outras datas), é usado um espectrômetro de partículas alfa (Alpha Particle X-ray Spectrometer, APXS). As várias sondas e satélites usam uma grande diversidade de equipamentos operados de forma remota ou autônoma que fazem identificação química, e.g., Chemistry and Mineralogy (CheMin), X-ray powder diffraction and fluorescence, Sample Analysis at Mars (SAM), Quadrupole Mass Spectrometer (QMS), Gas Chromatograph (GC) e Tunable Laser Spectrometer (TLS), que são usados nos laboratórios químicos ou encontram o seu caminho para estes. A ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) detectou, por exemplo, os compostos H_2O , HO_2 , NO_2 , N_2O , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , H_2CO , HCN , H_2S , OCS , SO_2 , HCl , CO e O_3 , na atmosfera de Marte.

Por outro lado, as condições espaciais podem ser simuladas em termos experimentais e teóricas. No caso do Sol, verificou-se por observação e cálculo que se poderia detectar água vibracionalmente excitada, mas não dissociada, nas manchas solares [37–39]. Os espectros obtidos têm sido calculados de forma bastante rigorosa e completa, confirmando a existência de água no Sol [38, 39]! Confirmamos que há água no Sol, mas encontra-se água em muitos locais no universo, em atmosferas planetárias [40] e na Lua [41], por exemplo. A existência de superfícies de energia potencial de grande precisão que permitam calcular esses espectros é muito importante [42].

Embora seja bastante difícil obter o rigor re-

querido, cálculos relativamente simples podem ser realizados hoje em dia com facilidade. Há algum tempo que realizei uma palestra educacional que sugere a realização de cálculos da estrutura eletrônica online para determinar as estruturas e prever os espectros rotacionais e vibracionais de moléculas, muitas delas pouco estáveis, usando a ferramenta WebMO [36].

Embora o termo “astroquímica” seja usado há cerca de 40 anos [43], nos últimos 20 anos o número de trabalhos sobre este tema está em grande crescimento. Cristina Puzzarini [44] reviu há pouco tempo os desafios que se colocam à astroquímica e à química envolvendo o espaço.

A busca por vida em outros planetas e no espaço resume-se essencialmente a encontrar assinaturas químicas da vida. Por isso, de vez em quando, aparecem notícias de que foi encontrada uma determinada molécula importante para a existência de vida no espaço - a último foi a fosfina (PH_3) [45]. Além de vida no espaço (a denominada astrobiologia), é de notar que não foram ainda identificados aminoácidos no espaço. O que tem sido feito em relação ao aminoácido mais simples, a glicina, e outras moléculas importantes para a vida, foi revisto recentemente na referência [46].

A construção de satélites e naves espaciais vai congrega a tecnologia existente e por vezes originar tecnologias novas, como os hidrogéis. Muitas tecnologias aperfeiçoadas para o espaço acabam por ser usadas na Terra, como já citei. Mas não exageremos, o teflon (marca e nome comum do politetrafluoretileno, PTFE), por exemplo, não foi inventado pela NASA! Essa tecnologia já existia e era usado como antiaderente de frigideiras antes mesmo da fundação da agência espacial estadunidense.

2 Conclusões

Não há dúvida de que a química é necessária quando nos referimos à composição, processos e reações no espaço. Mas, para entendermos a origem da vida, por exemplo, na astrobiologia, é fundamental conhecermos a química dos processos envolvidos.

Agradecimentos

O Centro de Química de Coimbra (CQC) é apoiado pela Fundação para Ciência e a Tecnologia (FCT), Portugal, através dos projetos UIDB/00313/2020 e UIDP/00313/2020.

Sobre o autor

Sérgio Paulo Jorge Rodrigues (spjrodrigues@ci.uc.pt) é Doutor em Química e professor no Departamento de Química da Universidade de Coimbra, Portugal. A sua área de investigação é a química teórica e computacional e as suas aplicações em química ambiental, astroquímica e química medicinal. Tem também interesse pelo ensino e história da química, assim como pela divulgação e comunicação científica.

Referências

- [1] J. C. Villanueva, *How many atoms are there in the universe?*, Universe Today (2019). Disponível em <https://www.universetoday.com/36302/atoms-in-the-universe/>, acesso em jun. 2021.
- [2] P. Kirkpatrick e C. Ellis, *Chemical space*, *Nature* **432**, 823 (2004).
- [3] G. Berthier, F. Pauzat e T. Yuanqui, *Quantum astrochemistry: prospects and examples*, *J. Molec. Struct: TEOCHEM* **107**, 39 (1984).
- [4] A. G. G. M. Tielens, *The Physics and Chemistry of Interstellar Media* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
- [5] R. Carbo e A. Ginebreda, *Interstellar chemistry*, *J. Chem. Educ.* **62**, 832 (1985).
- [6] A. Arnau, I. Tuñón e E. Silla, *The discovery of the chemistry among the stars*, *J. Chem. Educ.* **72**, 776 (1995).
- [7] E. Herbst, *Chemistry in the interstellar medium*, *Annu. Rev. Phys. Chem.* **46**, 27 (1995).
- [8] K. Lodders, *Solar system abundances and condensation temperatures of the elements*, *Astrophys. J.* **591**, 1220 (2003).
- [9] E. K. Jacobsen, *JCE resources for chemistry and the atmosphere: An update*, *J. Chem. Educ.* **67**, 158 (2009).
- [10] A. J. C. Varandas e C. M. R. Rocha, C_n ($n = 2 - 4$): *current status*, *Phil. Trans. R. Soc. A* **376**, 20170145 (2018).
- [11] C. M. R. Rocha, *Bridging the gap between laboratory astrophysics and quantum chemistry: the concept of potential energy surfaces*, *Proc. Int. Astro. Union* **15**(S350), 61 (2019).
- [12] J. K. Jørgensen, A. Belloche e R. T. Garrod, *Astrochemistry during the formation of stars*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **58**(1), 727 (2020).
- [13] J. A. F. Pacheco, *Vida no Universo* (Edusp, São Paulo, 2020).
- [14] J. D. Barrow, *Impossibility: The limits of science and the science of limits* (Oxford University Press, New York, 1998).
- [15] A. Comte, *Cours de philosophie positive* (Libraires-éditeurs, Paris, 1830). Disponível em <https://www.gutenberg.org/ebooks/author/35532>, acesso em jul. 2021.
- [16] A. Lourenço, S. Carvalho et al., *Solar observations at the Coimbra Astronomical Observatory*, *Open Astron.* **28**, 165 (2019).
- [17] A. J. C. Varandas, S. P. J. Rodrigues e V. M. O. Batista, *Direct fit of extended Hartree-Fock approximate correlation energy model to spectroscopic data*, *Chem. Phys. Lett.* **424**, 425 (2006).
- [18] R. L. Hudson, *Astrochemistry examples in the classroom*, *J. Chem. Educ.* **83**, 1611 (2006).
- [19] C. R. Arumainayagam, R. T. Garrod et al., *Extraterrestrial prebiotic molecules: photochemistry vs. radiation chemistry of interstellar ices*, *Chem. Soc. Rev.* **48**(8), 2293 (2019).
- [20] S. Iglesias-Groth, A. Manchado et al., *A search for interstellar anthracene towards the Perseus anomalous microwave emission region*, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **407**(4), 2157 (2010).

- [21] B. A. McGuire, R. A. Loomis et al., *Detection of two interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons via spectral matched filtering*, *Science* **371**(6535), 1265 (2021).
- [22] A. Arnau, I. Tuñón et al., *HC_nN: The largest molecules in the interstellar medium*, *J. Chem. Educ.* **67**, 905 (1990).
- [23] *The organic universe*, *Nature Astron.* **1**(10), 641 (2017).
- [24] E. Herbst e E. F. van Dishoeck, *Complex organic interstellar molecules*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **47**(1), 427 (2009).
- [25] Z. Martins, H. Cottin et al., *Earth as a tool for astrobiology — A European perspective*, *Space Sci. Rev.* **209**, 43 (2017).
- [26] E. Herbst, *The synthesis of large interstellar molecules*, *Int. Rev. Phys. Chem.* **36**(2), 287 (2017).
- [27] S. A. Sandford, M. Nuevo et al., *Prebiotic astrochemistry and the formation of molecules of astrobiological interest in interstellar clouds and protostellar disks*, *Chem. Rev.* **120**(11), 4616 (2020).
- [28] C. Puzzarini e V. Barone, *A never-ending story in the sky: The secrets of chemical evolution*, *Phys. Life Rev.* **32**, 59 (2020).
- [29] J. S. Huebner, R. A. Vergenz e T. L. Smith, *Astronomy matters for chemistry teachers*, *J. Chem. Educ.* **73**(11), 1073 (1996).
- [30] A. J. C. Varandas e F. N. N. Pansini, *Optimal diffuse augmented atomic basis sets for extrapolation of the correlation energy*, *Int. J. Quantum Chem.* **120**, e26135 (2020).
- [31] A. J. C. Varandas, *Canonical and explicitly-correlated coupled cluster correlation energies of sub-kJmol⁻¹ accuracy via cost-effective hybrid-post-CBS extrapolation*, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **23**, 9571 (2021).
- [32] R. C. Fortenberry, *Quantum astrochemical spectroscopy*, *Int. J. Quantum Chem.* **117**(2), 81 (2017).
- [33] M. Biczysko, J. Bloino e C. Puzzarini, *Computational challenges in astrochemistry*, *WIRES Comput. Mol. Sci.* **8**(3), e1349 (2018).
- [34] C. Puzzarini e V. Barone, *The challenging playground of astrochemistry: an integrated rotational spectroscopy – quantum chemistry strategy*, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **22**, 6507 (2020).
- [35] J. A. M. Porto e S. P. J. Rodrigues, *Análise computacional da estabilidade de compostos atípicos de carbono aplicada à astroquímica*, *Cad. Astr.* **2**(1), 149 (2021).
- [36] J. R. Schmidt e W. F. Polik, *WebMO enterprise*. Disponível em www.webmo.net, acesso em jun. 2021.
- [37] L. Wallace, P. Bernath et al., *Water on the Sun*, *Science* **268**(5214), 1155 (1995).
- [38] O. Polyansky, N. F. Zobov et al., *Water on the Sun: Line assignments based on variational calculations*, *Science* **277**(5324), 346 (1997).
- [39] J. Tennyson e O. L. Polyansky, *Water on the Sun: the Sun yields more secrets to spectroscopy*, *Contemporary Phys.* **39**(4), 283 (1998).
- [40] G. Tinetti, A. Vidal-Madjar et al., *Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet*, *Nature* **448**, 169 (2007).
- [41] C. I. Honniball, P. G. Lucey et al., *Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA*, *Nature Astr.* **5**, 121 (2021).
- [42] B. R. L. Galvão, S. P. J. Rodrigues e A. J. C. Varandas, *Energy-switching potential energy surface for the water molecule revisited: A highly accurate singled-sheeted form*, *J. Chem. Phys.* **129**(4), 044302 (2008).
- [43] D. Buhl e L. E. Snyder, *From radio astronomy towards astrochemistry*, *Technol. Rev.* **73**, 54 (1971).
- [44] C. Puzzarini, *Grand challenges in astrochemistry*, *Front. Astron. Space Sci.* **7**, 19 (2020).
- [45] J. S. Greaves, A. M. S. Richards et al., *Phosphine gas in the cloud decks of Venus*, *Nature Astron.* **5**, 655 (2021).

- [46] A. Rimola, S. Ferrero et al., *Computational surface modelling of ices and minerals of interstellar interest—insights and perspectives*, [Minerals](#) **11**(1), 26 (2021).