

A nucleossíntese estelar e os elementos químicos essenciais para a vida

Luana R. da Conceição e Roberto Ortiz

A nucleossíntese estelar é o principal mecanismo formador dos elementos químicos no Universo. Diferentes tipos de reações nucleares de fusão ocorrem nas várias fases evolutivas das estrelas de diferentes massas. Neste artigo, descrevemos alguns dos principais mecanismos de síntese nuclear em estrelas e as abundâncias dos elementos formados. Em seguida, fazemos uma breve discussão sobre a formação e evolução terrestre e suas consequências para a abundância de elementos químicos na Terra e nos seres vivos. As moléculas da vida são formadas principalmente por hidrogênio, carbono, oxigênio e nitrogênio que, juntamente com o hélio, constituem-se nos elementos químicos mais abundantes no Sol e no Universo como um todo. Entre os 24 elementos químicos considerados essenciais para os organismos vivos, somente seis deles possuem $Z > 28$. Além de serem mais abundantes, hidrogênio, carbono, oxigênio e nitrogênio possuem características versáteis que favorecem a formação de diversas moléculas da vida, tais como aminoácidos, açúcares, ácidos graxos, etc. Os demais elementos essenciais para a vida ocorrem em concentrações bem menores, assim como sua disponibilidade no meio ambiente.

► astroquímica, abundâncias químicas, astrobiologia ◀

Recebido em 08/08/2023; aceito em 27/11/2023

Introdução

Com exceção dos elementos mais leves, como o hidrogênio, hélio, lítio, berílio e boro, os demais elementos químicos naturais são formados principalmente por meio da nucleossíntese estelar, isto é, reações nucleares que ocorrem nos núcleos das estrelas. O resultado desses processos é a síntese de novos elementos, os quais, posteriormente, podem formar moléculas orgânicas e inorgânicas.

A Figura 1 representa a abundância dos elementos químicos no Sol, em uma escala logarítmica, em função do número atômico (Z). Embora ela se refira a uma única estrela, pode-se dizer que ela representa razoavelmente bem a abundância típica dos elementos químicos encontrados no Universo. Essa figura mostra que: (1) de modo geral, à exceção de uns poucos elementos químicos muito leves, a abundância diminui em função do número atômico; (2) a abundância dos elementos de número atômico par é, em geral, maior do que aqueles de número atômico ímpar com Z semelhante; (3) há um aumento significativo das abundâncias químicas em torno do “pico do ferro” ($Z=26$) e uma notável diminuição da abundância de elementos além deste.

Nucleossíntese na Sequência Principal (SP)

O diagrama Hertzsprung-Russel (ou diagrama H-R, Figura 2) representa graficamente a luminosidade *versus* temperatura efetiva das estrelas. A sequência principal (SP) é uma faixa diagonal que atravessa o diagrama desde o seu canto superior esquerdo (onde estão as estrelas mais massivas, quentes e muito luminosas) até o canto inferior direito (onde estão as estrelas menos massivas, frias e pouco luminosas).

Enquanto a estrela estiver na SP, a transformação de hidrogênio em hélio no núcleo da estrela é o principal mecanismo de geração de energia. A uma temperatura mínima de cerca de 10^7 K, a sequência de reações nucleares que transforma quatro núcleos de hidrogênio em um núcleo de hélio é chamada de *ciclo próton-próton* (ou ciclo p-p):



A principal restrição à ocorrência de reações nucleares é a repulsão eletrostática: núcleos atômicos se repelem por possuírem carga positiva. Quanto maior for o número atômico Z , maior será a força de repulsão. Em estrelas de massa

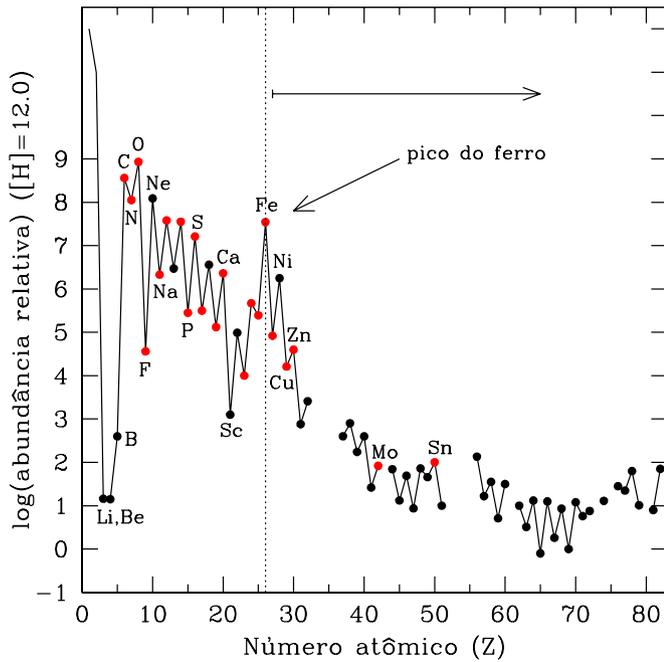


Figura 1: Abundância relativa dos elementos químicos no Sol, em escala logarítmica, em função do número atômico (Z) (Cox, 2000). A abundância do hidrogênio foi arbitrariamente fixada em $[H]=12,0$. Estão assinalados os intervalos de Z nos quais a nucleossíntese via reações-alfa, captura de nêutrons e a queima de carbono e oxigênio são mais significativas. Os elementos essenciais para a vida estão assinalados em vermelho.

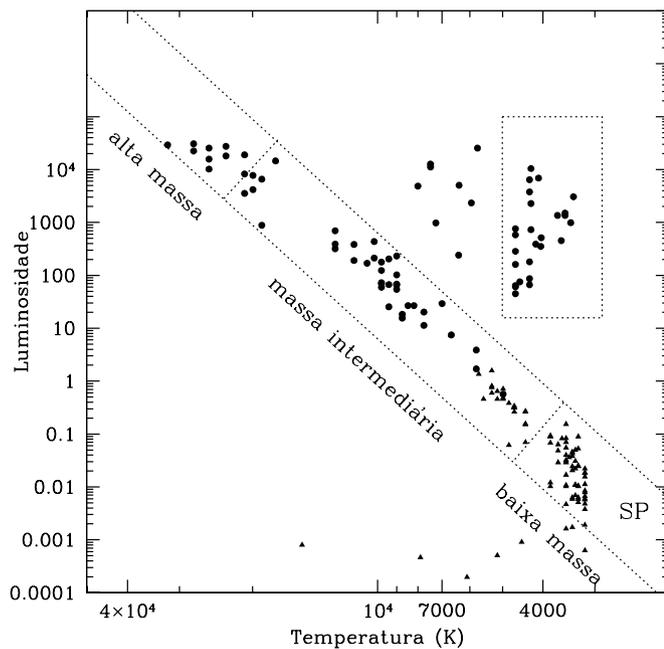


Figura 2: Diagrama Hertzsprung-Russel (H-R) contendo: as cem estrelas mais próximas do Sol (triângulos) e as cem estrelas mais brilhantes do céu (círculos) (Cox, 2000). As duas linhas pontilhadas delimitam a posição da sequência principal (SP). As regiões da SP onde estão localizadas as estrelas de alta massa, massa intermediária e baixa massa estão assinaladas, assim como o ramo das gigantes vermelhas.

intermediária e baixa ocorrem apenas alguns tipos de reações nucleares envolvendo núcleos mais leves (e menor carga elétrica), como o hidrogênio e o hélio. Por outro lado, em estrelas massivas, a temperatura no núcleo pode atingir cerca de 10^9 K, o que permite a ocorrência de reações nucleares envolvendo núcleos mais pesados, tais como:

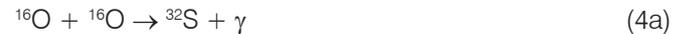


onde a letra γ representa a liberação de um fóton de alta energia no núcleo da estrela. As reações acima são genericamente chamadas de “reações-alfa” que são o principal mecanismo de formação dos elementos químicos de número atômico par até $Z=26$ (ferro).

Além das reações-alfa, há outras possibilidades. Em núcleos de estrelas massivas, se a temperatura superar 6×10^8 K, núcleos de carbono podem colidir entre si (Lang, 1999), formando diversos produtos, tais como:



Podem também ocorrer reações similares envolvendo o oxigênio, se $T > 10^9$ K:



Todas as reações acima são exotérmicas e são genericamente chamadas de “queima de carbono” e “queima de oxigênio”, respectivamente (Imanishi, 1968).

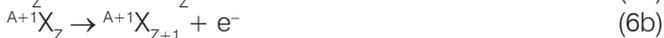
Além da sequência principal: nebulosas planetárias e supernovas

Em estrelas de massa intermediária ($0,8 < M/M_{\odot} < 8$), quando o ^4He se esgota no núcleo, este sofre uma contração devido ao peso das camadas superiores da estrela. Esse processo aumenta a pressão e a temperatura no núcleo da estrela, a qual pode atingir 10^8 K. Esta é a temperatura mínima para que ocorram as primeiras reações-alfa. A fusão de três núcleos de ^4He em um núcleo de ^{12}C é chamada de reação “triplo-alfa”, que pode ser resumida em:



Com o esgotamento do hidrogênio no núcleo da estrela, ela paulatinamente deixa a sequência principal do diagrama H-R e se desloca para o “ramo das gigantes vermelhas” (Figura 2). O raio e a luminosidade da estrela aumentam, enquanto a temperatura superficial diminui.

Durante a fase de gigante vermelha, ocorrem outros tipos de reações nucleares além do ciclo p-p. No processo de “captura lenta de nêutrons”, há a incorporação de um nêutron a um núcleo atômico, formando um isótopo mais pesado. Em seguida, esse isótopo emite um elétron (decaimento beta) e o núcleo converte o nêutron extra em um próton. Portanto, o elemento ${}^A X_Z$ “sobe” um degrau na escala de número atômico:



A maioria dos elementos de Z par possuem diversos isótopos, enquanto os de Z ímpar possuem somente um. Suponhamos um núcleo com Z par: a captura lenta de nêutrons vai paulatinamente gerando isótopos cada vez mais massivos deste elemento até que essa sequência atinja um isótopo radioativo. Quando isso ocorre, o núcleo sofre um decaimento beta, resultando no único isótopo (ímpar) de número atômico $Z+1$. Se este núcleo capturar um nêutron, ele se converterá em um isótopo radiativo (instável), que sofrerá um decaimento beta, gerando novamente um isótopo com $Z+2$, par e estável. Dessa maneira, assim como os “processos-alfa”, a captura lenta de nêutrons produz uma abundância maior de elementos químicos de número atômico par, porque estes possuem vários isótopos estáveis, enquanto os elementos de Z ímpar geralmente possuem apenas um. Juntos, os processos-alfa e a captura de nêutrons explicam o comportamento em “zig-zague” da curva de abundância mostrada na Figura 1, na qual a abundância de elementos com Z par é sempre maior que a de seus elementos vizinhos com $Z-1$ e $Z+1$.

Em estrelas de alta massa (*i. e.*, $M > 8 M_{\odot}$), a pressão das camadas superiores sobre o núcleo da estrela é tão alta que permite que ocorram reações nucleares que demandam temperatura mais alta (*e. g.*, equações 2, 3 e 4), até a formação do elemento ferro ($Z = 26$), que é o mais estável de todos os núcleos atômicos existentes na natureza. Devido à sua grande estabilidade nuclear, reações de fusão envolvendo esse elemento ou outros com $Z > 26$ são endotérmicas, ou seja, absorvem energia. A interrupção das reações-alfa em $Z = 26$ é o motivo do forte declínio das abundâncias dos elementos químicos além do “pico do ferro” observado na Figura 1. Quando o núcleo estelar cessa de gerar energia,

ele se torna incapaz de suportar o peso das camadas mais externas, que colapsam sob a ação do seu próprio peso. A queda brusca dessas camadas sobre o núcleo gera uma súbita expansão da estrela, em altíssima velocidade, entre 1000 e 1500 km/s. Essa brusca expansão do volume da estrela é frequentemente comparada a uma explosão e, devido ao súbito aumento de brilho, o evento é comumente chamado de “supernova”. Há registros históricos de supernovas que puderam ser observadas a olho nu mesmo durante o dia, durante semanas ou até meses.

A zona de habitabilidade

A Terra tem uma abundância de óxidos e silicatos consideravelmente superior à abundância dos planetas gasosos, como Júpiter e Saturno, os quais têm sua composição química mais parecida com a dos demais corpos celestes, como estrelas e nebulosas: majoritariamente hidrogênio e hélio. Essa diferença entre a abundância química nos planetas telúricos (*i. e.*, semelhantes à Terra) e nos gasosos (do tipo Júpiter) é consequência da depuração dos elementos químicos mais voláteis na região mais interna do Sistema Solar devido ao calor do Sol.

A velocidade quadrática média (V_{qm}) de um gás ideal pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$V_{qm} = \sqrt{3RT / M} \quad (7)$$

onde R é a constante dos gases perfeitos, T é a temperatura do gás (em kelvin) e M é a massa da partícula (átomo ou molécula), em kg/mol. Para um gás de número atômico A a uma temperatura T , a velocidade quadrática média (em m/s) pode ser calculada numericamente a partir da equação anterior, substituindo-se o valor da constante R :

$$V_{qm} = 157,9 \sqrt{\frac{T}{A}} \quad (8)$$

Temperaturas mais elevadas implicam em maior velocidade média dos átomos. A atmosfera dos planetas mais próximos do Sol tem maior temperatura e, portanto, maior velocidade quadrática média. A Tabela 1 apresenta as temperaturas médias das atmosferas planetárias e a velocidade quadrática média calculada para essa temperatura, supondo-se

Tabela 1: Semi-eixo maior da órbita do planeta, velocidade de escape (V_{esc}), temperatura média atmosférica ($\langle T_{atm} \rangle$) e a velocidade quadrática média (V_{qm}) calculada para $\langle T_{atm} \rangle$ e $A=1$.

Planeta	a (U. A.)	V_{esc} (km/s)	$\langle T_{atm} \rangle$ (°C)	$V_{qm} \sqrt{A}$ (km/s)
Mercúrio	0,4	4,3	–	–
Vênus	0,7	10,4	+ 460	4,3
Terra	1,0	11,2	+ 17	2,7
Marte	1,5	5,0	– 90 ~ –5	2,1 ~ 2,5
Júpiter	5,2	59,5	– 160	1,7
Saturno	9,5	35,5	– 190	1,4
Urano	19,2	21,3	– 220	1,1
Netuno	30,0	23,7	– 220	1,1

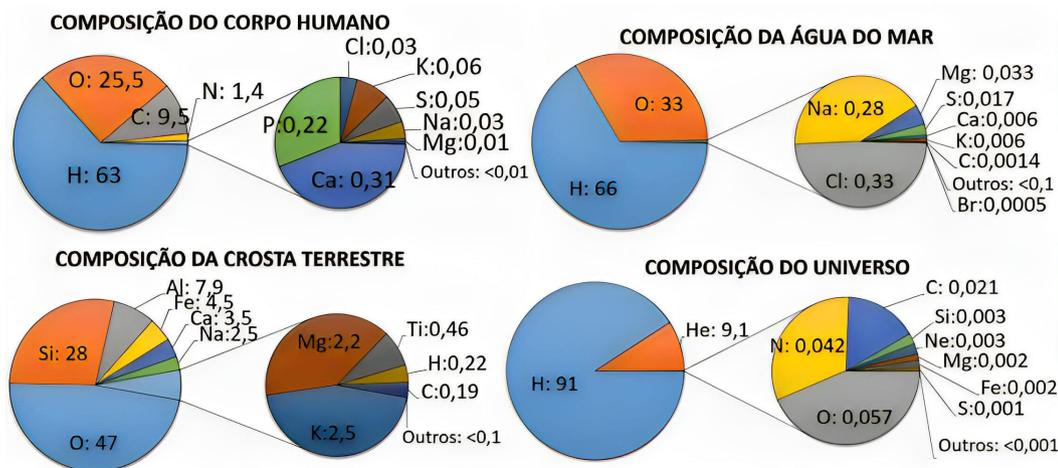


Figura 3: Porcentagem do número de átomos: do Universo, da crosta terrestre, da água marinha e do corpo humano (Frieden, 1972). A baixa abundância de elementos voláteis na Terra (H, He, etc.) foi ocasionada principalmente pelo calor do Sol. A predominância de hidrogênio e oxigênio no corpo humano se deve a sua composição majoritária de água.

o gás hidrogênio ($A = 1$). Esse valor pode ser extrapolado para outros gases, bastando dividi-lo por \sqrt{A} . A Tabela 1 também mostra a velocidade de escape V_{esc} , que representa o valor mínimo necessário para que uma partícula escape do campo gravitacional do planeta. Quando a velocidade de um átomo ou molécula supera a velocidade de escape do planeta, a partícula é lançada ao espaço. Na realidade, as partículas que conseguem escapar do planeta são aquelas com velocidade muito maior que a velocidade quadrática média, no extremo superior da distribuição maxwelliana de velocidades. Planetas como a Terra perderam praticamente todo o seu hidrogênio original (e também o hélio), que restou apenas em moléculas contendo outros átomos mais pesados.

Embora a nucleossíntese estelar e a posterior evolução planetária sejam determinantes para as abundâncias químicas, existem outras condições necessárias para o surgimento e a manutenção da vida. Chama-se “zona habitável” de um sistema planetário a um intervalo de distâncias da estrela dentro do qual existem tais condições físicas (Kasting *et al.*, 1993). Elas devem permitir que haja água líquida (ou, na falta desta, outro meio líquido com propriedades semelhantes) na qual a vida possa se desenvolver. Para tanto, a pressão atmosférica deve ser adequada para que exista uma fase aquosa. A luminosidade da estrela determina o fluxo de energia que chega à superfície do planeta, o que influencia fortemente sua temperatura. Portanto, a existência de água no estado líquido está limitada a intervalos bem definidos de temperatura e pressão na superfície do planeta ou em seu subsolo. No Sistema Solar, a zona de habitabilidade está situada entre as órbitas de Vênus e Marte (Zsom *et al.*, 2013), porém, além da zona de habitabilidade, algumas condições excepcionais podem favorecer a formação de um meio aquoso em um planeta ou satélite. Por exemplo, as recentes descobertas de oceanos abaixo de uma camada superficial de gelo em Europa e Encélado (satélites de Júpiter e Saturno, respectivamente) representam exceções à regra. Nesses casos, fontes internas de calor (*e. g.*, atrito gerado

por forças de maré) evitam que a água se congele no subsolo (Roberts e Nimmo, 2008).

Surgimento e evolução da vida na Terra

Evidências apontam que há 3,5 ~ 3,8 bilhões de anos, algumas formas de vida primitiva já haviam se desenvolvido na Terra (Zimmer, 2009). A partir das primeiras moléculas orgânicas simples foram produzidas biomoléculas mais complexas, as quais posteriormente formaram outras estruturas, tais como: membranas, biomoléculas com grandes cadeias químicas e polímeros estáveis que fizeram parte do ambiente primitivo da Terra e de sua evolução química (Cleaves II, 2012). Sabe-se que ocorreu uma associação entre moléculas proteicas em meio aquoso até o desenvolvimento dos primeiros coacervados (Cleaves II, 2012; Fitz, 2007). Para simular a química prebiótica em laboratório, são utilizados gases que reproduzem a atmosfera terrestre prebiótica. Por exemplo, a concentração de oxigênio (O_2) na Terra primitiva era baixa, e em seu lugar havia o CO_2 (dióxido de carbono), o CO (monóxido de carbono), o CH_4 (metano), o N_2 (nitrogênio), o H_2 (hidrogênio), H_2O (água em estado gasoso) e o H_2S (sulfeto de hidrogênio). Posteriormente, essas concentrações foram bastante alteradas, devido, principalmente, aos organismos fotossintéticos procariontes (Shaw, 2008).

Os principais elementos químicos da vida na Terra

Embora exista uma grande variedade de elementos, somente cerca de 1/3 deles são utilizados nas formas de vida conhecidas. Os quatro elementos mais abundantes em organismos vivos (hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio) são os menores e mais leves capazes de atingir a estabilidade eletrônica pela adição de um a quatro elétrons, formando moléculas estáveis. Esses elementos são os formadores, em geral, das moléculas que se associam para gerar os organismos conhecidos. Além desses quatro elementos, os próximos sete elementos essenciais para a

vida em mamíferos, em ordem decrescente de abundância química, são: cálcio, fósforo, potássio, enxofre, sódio, magnésio e cloro ($Z = 20, 15, 19, 16, 11, 12$ e 17 , respectivamente) (Frieden, 1972). Esses elementos auxiliam a desempenhar diversas funções vitais e constituem presença fundamental nos organismos vivos em quantidades variáveis. Por exemplo, o flúor e o cálcio ($Z = 9$ e 20 , respectivamente) são constituintes de dentes e ossos; o sódio e o potássio ($Z = 11$ e 19 , respectivamente) são os principais cátions extracelulares; o magnésio ($Z = 12$) é necessário para a atividade de muitas enzimas e para a clorofila; o cloro ($Z = 17$) é o principal ânion extracelular; o fósforo ($Z = 15$) desempenha importante atividade molecular, principalmente no que tange ao ATP (adenosina trifosfato), cuja função é fundamental para geração de energia química em processos celulares (Frieden, 1972). Outros elementos, apesar de se encontrarem em organismos vivos em concentrações muito baixas, são essenciais. O cromo ($Z = 24$) está relacionado à ação da insulina em animais vertebrados; o manganês, o zinco e o molibdênio ($Z = 25, 30$ e 42 , respectivamente) são elementos necessários para a atividade de diversas enzimas; o cobalto ($Z = 27$) é necessário para a atividade de várias enzimas e para a vitamina B12; o selênio ($Z = 34$) participa da função hepática no corpo humano.

Portanto, dentre os 92 elementos naturais, apenas 52 são considerados como potencialmente úteis para os organismos vivos (Frieden 1972). Dentre estes, cerca de 24 são elementos químicos realmente essenciais, porém apenas seis desses elementos tidos como fundamentais estão além do “pico do ferro”: cobre, zinco, selênio, molibdênio, estanho e iodo ($Z=29, 30, 34, 42, 50$ e 53 , respectivamente) (Frieden, 1972; Airoidi, 1994).

A ocorrência desses elementos químicos em seres vivos não é exclusivamente em função de sua capacidade de assimilação e utilização por esses organismos, mas também de sua considerável concentração no meio geológico e da facilidade em solubilizar os minerais em que estão presentes, além de suas inerentes propriedades químicas. Por exemplo, o silício é 146 vezes mais abundante que o carbono na crosta terrestre (Frieden, 1972) e possui diversas propriedades semelhantes a este, como seus quatro elétrons de valência. No entanto, a diferença fundamental que levou à preferência do carbono ($Z = 6$) em detrimento do silício ($Z = 14$) nos compostos orgânicos pode ser resumida em: (1) a grande estabilidade da molécula de dióxido de carbono, (2) sua alta solubilidade em água, (3) sua predominância monomérica, (4) e a capacidade do carbono de formar longas cadeias (inclusive anéis) estáveis com outros átomos e moléculas. Por outro lado, o silício é insolúvel em água e é capaz de formar apenas moléculas de cadeias curtas. Portanto, além de sua alta abundância relativa (Figura 1), a versatilidade dos átomos de carbono é tida como uma das principais responsáveis pelos milhões de compostos orgânicos encontrados na Terra atualmente, tornando essencial a existência desse elemento químico na natureza (Frieden, 1972).

Considerações finais

A nucleossíntese estelar é o principal mecanismo formador dos elementos químicos no Universo. *Grosso modo*, as abundâncias químicas diminuem com o número atômico Z . Reações-alfa, que se constituem na adição do núcleo de hélio a um núcleo atômico, favorecem a criação de elementos de número atômico par até $Z = 26$. A captura de nêutrons, por outro lado, é o principal mecanismo de produção dos elementos com $Z > 26$, e gera um predomínio de elementos com número atômico par devido ao maior número de isótopos estáveis destes. Há um pico de abundância do elemento ferro no Universo porque, sendo o núcleo mais estável que existe, reações nucleares de fusão que demandam este elemento são endotérmicas.

Os planetas situados até uma distância de 4 U. A. do Sol sofreram uma grande perda de átomos leves, principalmente hidrogênio (atômico) e hélio devido ao aquecimento proporcionado pelo Sol. A “zona de habitabilidade” do Sistema Solar (e de outros sistemas estelares análogos) é definida como o intervalo de distâncias da estrela dentro do qual há condições para a formação de água no estado líquido. Nos oceanos terrestres houve primeiramente a formação das moléculas orgânicas simples. A partir dessas moléculas simples foram produzidas biomoléculas mais complexas, que posteriormente evoluíram para formar outras estruturas, tais como peptídios, membranas, etc.

Os quatro elementos químicos mais abundantes em organismos vivos são: hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio. Juntamente com o hélio (que, sendo um gás nobre, não faz ligações químicas) estes são justamente os elementos químicos mais abundantes no Universo. Entre os 92 elementos químicos naturais, apenas 52 são considerados potencialmente úteis para os organismos vivos e, entre estes, somente 24 são essenciais para a vida. Destes últimos, apenas seis estão situados além do “pico do ferro” no diagrama de abundâncias químicas: Cu, Zn, Se, Mo, Sn e I.

Conclui-se que os elementos químicos que compõem as moléculas da vida são justamente aqueles que: (1) são mais abundantes no Universo; (2) estão mais disponíveis na crosta do planeta, após a segregação causada pelo aquecimento solar; (3) apresentam configuração eletrônica versátil, que permite uma grande variedade de ligações químicas; (4) formam compostos solúveis em água, favorecendo a formação de moléculas mais complexas em um meio aquoso. No que se refere ao planeta, são também condições essenciais para o surgimento da vida: (1) que ele (ou seu satélite) esteja situado na “zona de habitabilidade”; (2) que possua uma atmosfera que forneça proteção adequada contra impactos e radiação ionizante; (3) que possua um campo magnético capaz de fornecer proteção contra partículas elétricas com potencial nocivo, oriundas da estrela central. Essas condições podem ser utilizadas como critérios de seleção na busca de exoplanetas potencialmente habitáveis.

Agradecimentos

Esta publicação teve o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projeto de pesquisa #2023/05298-0.

Luana R. da Conceição (luanarc@usp.br), é licencianda em Ciências da Natureza pela Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH/USP). Atua como professora-estagiária no ensino de Ciências Naturais para alunos do programa nacional EJA (Ensino de Jovens e Adultos) e para alunos do Ensino Fundamental II da rede pública. Trabalha com Microbiologia de Alimentos

e possui experiência em análises físico-químicas na Indústria Brasileira de Bebidas e Alimentos, sendo este outro campo em que a estudante atua junto à prática docente. São Paulo, SP – Brasil. **Roberto Ortiz** (rortiz@usp.br), é Bacharel em Física, Mestre e Doutor em Astronomia pela Universidade de São Paulo. Entre 1998 e 2000 realizou Pós-Doutorado no Sterrewacht Leiden (Holanda). Entre 1994 a 2006 trabalhou como Professor Adjunto do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), onde implantou a Astrofísica como área de pesquisa naquela universidade. Foi coordenador do Observatório Astronômico da UFES e Diretor Científico do Planetário de Vitória (ES). Atualmente é Professor Livre-Docente na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da USP. É membro da International Astronomical Union (IAU) e de sua comissão H: “Interstellar Matter and the Local Universe”. São Paulo, SP – Brasil.

Referências

AIROLDI, C. Química inorgânica ou química da vida? *Química Nova*, v. 17, p.175-181, 1994.

CLEAVES II, H. J. Prebiotic chemistry: what we know, what we don't. *Evolution: Education and Outreach*, v. 5, p. 342-360, 2012.

COX, A. N. *Allen's astrophysical quantities*, 4a. ed. Dordrecht: Springer, 2000.

FITZ, D.; REINER, H. e RODE, B. M. Chemical evolution toward the origin of life. *Pure and Applied Chemistry*, v. 79, p. 2101-2117, 2007.

FRIEDEN, E. Chemical elements of life. *Scientific American*, v. 227, p. 52-64, 1972.

IMANISHI, B., Resonance energies and partial widths of quasimolecular states formed by the two carbon nuclei. *Physics Letters B*, v. 27, p. 267-270, 1968.

KASTING, J. F.; WHITMIRE, D. P.; REYNOLDS, R. T.

Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, v. 101, p. 108-118, 1993.

LANG, K.R. *Astrophysical Formulae*, 3a. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999

ROBERTS, J. H. e NIMMO, F. Tidal heating and the long-term stability of a subsurface ocean on Enceladus. *Icarus*, v. 194, p. 675-689, 2008.

SHAW, G. H. Earth's atmosphere – Hadean to early proterozoic. *Geochemistry*, v. 68, p. 235-264, 2008.

TRURAN, J. W. e ARNETT, W. D. Nucleosynthesis in explosive oxygen burning. *The Astrophysical Journal*, v. 160, p. 181-192, 1970.

ZIMMER, C. On the origin of eukaryotes. *Science*, v. 325, p. 666-668, 2009.

ZSOM, A.; SEAGER, S. e DE WIT, J. Towards the minimum inner edge distance of the habitable zone. *The Astrophysical Journal*, v. 778, p. 109-125, 2013.

Abstract: *Stellar nucleosynthesis and the essential chemical elements for life.* Stellar nucleosynthesis is the main mechanism that forms the chemical elements in the universe. Different types of nuclear reactions occur in each evolutionary phase of stars of various masses. In this paper, we describe some of the mechanisms of nuclear synthesis in stars and their chemical abundances. We also discuss briefly the terrestrial formation and evolution, as well as its consequences on the chemical abundances on earth and its life beings. The molecules of life are formed mainly by hydrogen, carbon, oxygen, and nitrogen, which are, together with helium, the most abundant elements in the sun and universe in general. Among the 24 chemical elements considered essential for life, only six have $Z > 28$. Besides being more abundant, hydrogen, carbon, oxygen, and nitrogen display highly versatile characteristics that favour the formation of various molecules of life, such as amino acids, sugars, fatty acids, etc. The remaining chemical elements essential for life occur in much lower concentrations, following their occurrence in nature.

Keywords: astrochemistry, chemical abundances, astrobiology