

Habitabilidade cósmica e a possibilidade de existência de vida em outros locais do universo

Cosmic habitability and the possibility of life existence in other places of the universe

Frederico Vieira^{*1}, Dinelsa Machaieie^{1,2}, Karin Fornazier¹, Lia Corazza¹, Manuel Castro¹, José Williams Vilas-Boas¹, José Roberto Cecatto¹, Carlos Alexandre Wuensche¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

²Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique

Recebido em 26 de Outubro, 2017. Revisado em 30 de Abril, 2018. Aceito em 03 de Maio, 2018.

Este artigo aborda alguns aspectos relacionados ao conceito de vida como a conhecemos e explora a relação entre a evolução química do Universo e a produção dos elementos básicos da química prebiótica. Baseando-se no Modelo Cosmológico Padrão, são descritas as condições cosmológicas que levaram ao surgimento desses elementos e são mostradas evidências de que o Universo, em seus estágios primordiais, dispunha de elementos capazes de produzir substâncias orgânicas. É feita uma breve abordagem de como a química em ambientes astrofísicos leva à formação de compostos que fazem parte da cadeia de reações que conduz à formação dos "tijolos da vida". Finalmente, levantamos a hipótese que o universo poderia ter zonas habitáveis a partir dos primeiros 30 milhões de anos e que a condição de habitabilidade tem estreita relação com a sua evolução química, mesmo quando se leva em consideração a hipótese de diferentes universos.

Palavras-chave: Habitabilidade Cósmica, Astrobiologia, Astroquímica.

This article discusses some aspects related to the concept of life as we know it and explores the relationship between the chemical evolution of the Universe and the production of the basic elements of prebiotic chemistry. Based on the Standard Cosmological Model, the cosmological conditions that led to the appearance of these elements are described and evidences are shown that the Universe, in its primordial stages, had elements capable of producing organic substances. Next section gives a short overview on how chemistry in astrophysical environments leads to the formation of compounds that are part of the chain of reactions that leads to the formation of the "bricks of life." Finally, we mention that the universe could have habitable zones from the first 30 million years and that the habitability condition has a close relation with its chemical evolution, even when one takes into account the hypothesis of different universes.

Keywords: Cosmic Habitability, Astrobiology, Astrochemistry.

1. Introdução

A existência de vida no Universo tem permeado o pensamento humano desde os primórdios da civilização. Os avanços científicos do século XX, particularmente a partir da década de 1950, com a exploração do espaço exterior, permitiram um estudo mais aprofundado sobre uma série de fenômenos astronômicos que ampliaram, em muito, a compreensão do Universo. O cenário construído a partir dessas observações, em paralelo com avanços teóricos e modelos computacionais, indica que vivemos num Universo com cerca de 14 bilhões de anos, cuja composição inclui ~ 96% de matéria e energia escuras, de origem ainda desconhecida, e ~ 4% de matéria ordinária (basicamente constituída de prótons, nêutrons e elétrons) que deu origem às estrelas e galáxias, observadas principalmente através da emissão de radiação eletromagnética. Uma cronologia da evolução do modelo padrão, bem

como uma descrição atualizada e didática do "status" da cosmologia atual pode ser encontrada em [1–7].

Esse cenário descreve o "Modelo Cosmológico Padrão" (doravante MCP), também conhecido como "Big Bang". O MCP prevê que a formação das primeiras estrelas ocorreu quando o Universo tinha de 100 a 200 milhões de anos. Estudos recentes sugerem, inclusive, que as condições para formação das primeiras populações de estrelas começaram antes dos primeiros 100 milhões de anos do Universo [8–10], quando o Universo primordial era composto, essencialmente, de Hidrogênio atômico (H) e Hélio (He). Elementos químicos mais pesados foram produzidos durante o ciclo de reações nucleares das primeiras gerações de estrelas, com massas de dezenas a centenas de vezes a massa do Sol.

A perda de massa por ventos estelares e explosões de supernovas [11–13] foram os principais responsáveis pelo enriquecimento do meio interestelar e fizeram com que as gerações de estrelas formadas posteriormente fossem

*Endereço para correspondência: fredsvieira@gmail.com

produzidas em ambientes cuja composição química foi gradualmente enriquecida por elementos mais pesados do que o *He*. A consequência natural deste processo foi a síntese de moléculas cada vez mais complexas, em nuvens de gás e poeira cósmica (doravante “nuvens GP”), através de processos químicos na fase gasosa ou reações na superfície dos grãos de poeira [14–16].

As nuvens GP são regiões adequadas para a observação de moléculas de interesse bioquímico contendo, entre outras, moléculas de metanol (CH_3OH), formaldeído (H_2CO) e ácido fórmico ($HCOOH$) [17–19]. Estas nuvens são também “berçários estelares”. Seu interior frio favorece o colapso gravitacional de regiões que se fragmentam e podem formar estrelas. No caso de estrelas com massas $M \lesssim 1 - 1,5 M_\odot$ ¹, o colapso gravitacional dá origem a discos proto-planetários e a todos os objetos que compõem este sistema. O cenário acima permite descrever a formação do Sistema Solar, explicando a origem dos planetas rochosos e das condições físico-químicas necessárias para o surgimento da “vida como a conhecemos” (ver, e.g., [20–22]).

A transição de sistemas não vivos para sistemas vivos é, desde sempre, uma das maiores questões não respondidas da Ciência. Não existe ainda uma definição de vida que não apresente alguma falha, embora exista uma concordância sobre diversas características comuns aos sistemas vivos conhecidos, tais como ausência de equilíbrio termodinâmico; a presença de metabolismo; complexidade e organização; a existência de mecanismos de reprodução; capacidade de desenvolvimento; evolução e autonomia.

A evolução de sistemas químicos complexos é baseada nas propriedades de átomos e moléculas, bem como nas leis da termodinâmica (e.g., [23]). Ao estudar a origem da vida, porém, é necessário lidar com o paradoxo decorrente do fato de sistemas vivos serem compostos de estruturas químicas, inanimadas, extremamente organizadas. Uma forma coerente de tentar explicar o surgimento dos sistemas vivos é, partindo do “Big Bang”, analisar a dinâmica e a evolução química do Universo com base no ciclo de formação e evolução estelar, que inclui o conhecimento das reações nucleares que produzem elementos mais pesados do que o *He*. O passo seguinte é explorar a relação entre essa evolução e a química que possibilitou a formação de sistemas planetários e organismos vivos. Essa abordagem é uma das linhas de ação da Astrobiologia, disciplina que estuda a origem, evolução, distribuição e destino da vida no Universo [24–26].

O objetivo deste artigo é apresentar o cenário mais aceito da evolução química do Universo e sua relação com a origem dos sistemas vivos como os conhecemos, sob a ótica da Astrobiologia. Um segundo objetivo é sugerir um roteiro que possa ser usado em sala de aula, a partir do ensino médio, para a introdução da disciplina de astrobiologia no ensino de ciências com uma abordagem transdisciplinar. Como sugestão para professores, além

dos artigos de revisão citados ao longo do texto, artigos em português [27–30] e textos completos [31–37] podem ser utilizados como material básico para um abordagem formal ao tema.

Este artigo está dividido em 6 seções. A seção 2 apresenta o modelo cosmológico padrão e o processo de formação das primeiras estruturas, levando à geração inaugural de estrelas. O papel do meio interestelar e das nuvens cósmicas de gás e poeira na formação de moléculas complexas e sistemas protoplanetários é discutido na seção 3. A seção 4 trata das chamadas zonas habitáveis e discute o conceito de habitabilidade. O conceito de vida e a evolução química necessária ao surgimento da mesma são abordados na seção 5 enquanto as considerações finais são apresentadas na seção 6.

2. Condições cosmológicas e astrofísicas para o surgimento de sistemas vivos

O modelo cosmológico que melhor descreve o Universo em grande escala é conhecido como o “Modelo Cosmológico Padrão”, também conhecido como modelo Λ CDM (ver, e.g., [5, 6, 38]). Ele pode ser descrito pelos parâmetros cosmológicos primários: as densidades de matéria escura fria (Ω_c) e de matéria bariônica (Ω_b); a densidade de energia escura (Ω_Λ); a constante de Hubble (H_0); a amplitude das flutuações de matéria, responsável pela formação das estruturas cósmicas (σ_8) e a profundidade óptica (τ) na época da formação dos átomos de *H* e *He* neutros. Uma descrição atualizada dos parâmetros cosmológicos pode ser encontrada, por exemplo, em [7, 38].

As medidas desses parâmetros vêm sendo feitas desde a década de 1990 e foram bastante refinadas com os resultados das observações dos satélites WMAP [4], Planck [5, 6] e dos experimentos Atacama Cosmology Telescope [39–42] e South Pole Telescope [43–45]. Elas são complementadas pelas observações das estruturas em grande escala no Universo, constituídas por aglomerados e super aglomerados de galáxias, cujas referências bibliográficas recomendadas podem ser encontradas nos sites dos levantamentos “Sloan Digital Sky Survey” [46], “APM Survey” [47], “2dF Survey” [48] e “6dF Survey” [49].

O quadro geral que emerge do modelo Λ CDM é de um Universo com cerca de 14 bilhões de anos, constituído de $\sim 69\%$ de energia escura, $\sim 27\%$ de matéria escura e $\sim 4\%$ de matéria bariônica, em expansão acelerada. Sua evolução é adequadamente descrita pela Teoria Geral da Relatividade e governada pela contribuição das componentes do tensor matéria-energia, que interagem através da força gravitacional. As grandes estruturas hoje observadas foram formadas hierarquicamente, com estrelas interagindo gravitacionalmente para formar aglomerados estelares, em seguida galáxias e posteriormente, aglomerados de galáxias e estruturas ainda maiores.

De acordo com o modelo Λ CDM, estima-se que de poucos segundos à 20 min (~ 1000 s) após o Big Bang, a

¹ M_\odot equivale à massa do Sol, cerca de 2×10^{30} kg

As condições físico-químicas do MI, também chamadas fases, são bastante heterogêneas, com a temperatura e densidade do gás variando de ~ 10 a $\sim 10^6$ K e de $\sim 10^{-4}$ a $\gtrsim 10^8$ cm^{-3} , respectivamente. Regiões de gás e poeira com temperaturas ~ 10 K e densidades maiores que 10^3 cm^{-3} , comumente chamadas de nuvens moleculares, são ambientes apropriados para a formação de moléculas e poeira com mantos de gelos (ver, e.g., [17]). Um resumo das características das diferentes fases do MI encontra-se na Tabela 1 e uma descrição bastante detalhada de suas propriedades e processos físicos foi feita por A. Tielens [14].

3.2. Formação de compostos simples

O reprocessamento de elementos químicos em nuvens moleculares (NM), durante os inúmeros ciclos de evolução estelar, é um requisito essencial para a formação de moléculas prebióticas, que são os principais constituintes dos organismos vivos. A síntese de moléculas nas NM's ocorre por reações químicas na fase gasosa ou nos mantos que se acumulam sobre a superfície dos grãos de poeira cósmica². Embora os grãos de poeira constituam apenas 1% da massa do MI, eles são bastante importantes porque propiciam a associação dos átomos de H, na sua superfície, para formar o H_2 que é o principal constituinte das NM's. Além disso, a poeira juntamente com o H_2 bloqueiam a radiação ultravioleta e visível, protegendo dessa forma, as moléculas das regiões mais internas das nuvens de serem dissociadas [17, 54]. Também favorecem a hidrogenação de algumas moléculas e a ocorrência de reações químicas que levam à formação de substâncias cada vez mais complexas, como os aminoácidos, importantes para o desenvolvimento da vida.

Moléculas contendo C são importantes nessa discussão uma vez que o carbono é essencial para a existência da vida, e o elemento estruturante da química orgânica. Essa importância decorre das seguintes propriedades do C: ele é o quarto elemento mais abundante no Universo; é extremamente versátil quimicamente (comparado, p.ex., com o Silício, Si); possui a capacidade de realizar ligações covalentes com elementos com valência um, dois, três ou quatro; não é dissolvido ou reage com ácidos ou água; é capaz de formar cadeias muito longas (nenhum outro

elemento é capaz de formar tantas ligações tão fortes), além de permitir uma grande variedade de combinações de cadeias carbônicas, o que o torna o componente primário das macromoléculas.

3.3. Moléculas no Meio Interestelar e discos protoplanetários

A primeira linha espectral de uma substância química observada no MI data de 1904 [55] com a detecção no visível do ion de Ca^+ no sistema f-Orionis. As primeiras observações das moléculas CN, CH e CH^+ foram feitas por volta de 1940 e, em 1951, foi detectado H neutro através de uma linha de comprimento de onda de 21 cm [56, 57], no espectro de rádio. Na década de 60 foram observadas no MI linhas espectrais das moléculas de água e amônia [58, 59]. No entanto, foi a observação, no MI, de uma linha espectral em 115 GHz da molécula de CO [60] que impulsionou o estudo sobre a possibilidade de formação de moléculas orgânicas nesse meio. Desde então, as observações têm mostrado a presença de quase todos os tipos de representantes das famílias da química orgânica: hidrocarbonetos, alcoois, ácidos, aldeídos, acetaldeídos, cetonas, aminas, éteres e açúcares [15, 55, 61, 62]. Uma cronologia das observações de moléculas no MI pode ser encontrada em http://www.astrochymist.org/astrochymist_ism.html.

Até recentemente, quase 200 moléculas foram observadas no MI ou em envoltórios circunstelares, sendo boa parte delas orgânica (contém pelo menos um -CH). A maior parte delas foi detectada em nuvens moleculares, onde a presença de gás denso e grãos de poeira impede a penetração da radiação UV que tende a dissociá-las [17]. Uma lista das moléculas já observadas no espaço, com as respectivas referências, pode ser encontrada no site <https://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules>.

O colapso de regiões em uma nuvem molecular leva, frequentemente, à formação de glóbulos e discos, dando posteriormente origem a sistemas protoestelares. Estes sistemas, constituídos de disco protoplanetário e protoestrela contém, além da composição química original, novas moléculas formadas durante o colapso. Excelentes discussões sobre a evolução química das nuvens interestelares e sua contribuição para a formação de discos protoplanetários podem ser encontradas em [63, 64].

Os estágios primordiais de formação de um sistema protoplanetário são representados na Figura 2, com o

Tabela 1: Síntese das propriedades das fases do MI

Fase	Dimensões típicas (pc) ^a	n_0^b (cm^{-3})	T^c (K)	Estado do gás H
Nuvens moleculares	80	>200	10	molecular
Meio frio neutro	100 – 300	50	80	neutro (atômico)
Meio morno neutro	300 – 400	0,5	8000	neutro (atômico)
Meio morno ionizado	1000	0,1	8000	ionizado
Regiões HII	70	$10^2 - 10^4$	10^4	ionizado

^a 1 pc = $3,086 \times 10^{18}$ cm.

^b Densidade típica do gás para cada fase.

^c Temperatura típica do gás para cada fase.

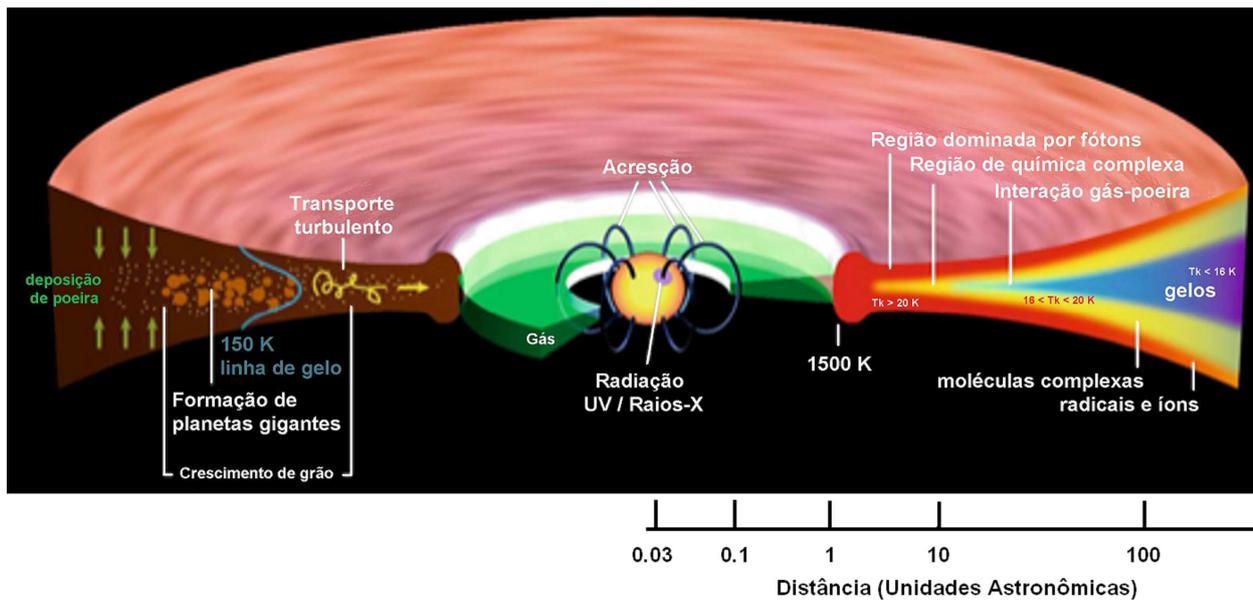


Figura 2: Esquema dos estágios primordiais de formação um sistema protoplanetário (Adaptado de [17, 64])

lado direito contendo as indicações da distribuição de temperatura dentro do disco, locais de formação de moléculas complexas, bem como as regiões onde se encontram íons e radicais, em função da distância à protoestrela central. No lado esquerdo são indicadas as regiões de formação dos planetas gigantes, a região de transporte turbulento de matéria para o centro do disco e a região de deposição das partículas de poeira e mantos de gelos. A linha azul, denominada linha de gelo, corresponde à posição em que as moléculas de água e amônia formam gelos na superfície dos grãos de poeira cósmica.

A análise do gás e poeira ejetados de cometas mostram que 30% dos grãos de poeira contidos nesses corpos celestes são dominados pelos elementos *CHONPS*. Muitas espécies químicas de importância prebiótica foram detectadas em cometas. Como exemplo, no cometa *Hyakutake*, foram observadas amônia (NH_3), metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), acetonitrila (CH_3CN) e isocianeto de hidrogênio (HNC). No Cometa *Hale – Bopp* também se observou CH_4 , C_2H_2 , ácido fórmico ($HCOOH$), HCN , HNC , ácido cianico ($HNCO$), cianoacetileno (HC_3N) e tioformaldeído (H_2CS) [18].

A presença dessas moléculas em cometas formados no disco protoplanetário sugere que estes podem ter sido uma importante fonte de moléculas orgânicas, incluindo aminoácidos, para a Terra primitiva [65].

Reações químicas na superfície de grãos de poeira cósmica e suas interações com a fase gasosa têm sido estudadas através de simulações numéricas considerando centenas de reações químicas. Uma descrição detalhada do processo de simulação das reações pode ser encontrada em [16, 66]. Os resultados de Garrod [16] mostram que mantos de gelo na superfície dos grãos, sob a ação de raios cósmicos, podem ser um ambiente propício para a formação de moléculas de importância prebiótica.

A Figura 3 mostra a evolução temporal da fração de abundância de espécies químicas selecionadas, produzidas em um modelo de nuvem interestelar em colapso, para formar um sistema protoplanetário, constituído de estrela central e disco protoplanetário. Nesse modelo, por conta do colapso, a temperatura da nuvem varia gradativamente de 20 K a 400 K, numa escala de tempo de um milhão de anos. Os gelos mais abundantes nesse ambiente são formados de água (H_2O), seguido de monóxido de carbono (CO), amônia (NH_3) e metano (CH_4). Somente a partir de 100 K é que a abundância dessas espécies no estado gasoso é maior do que no estado sólido.

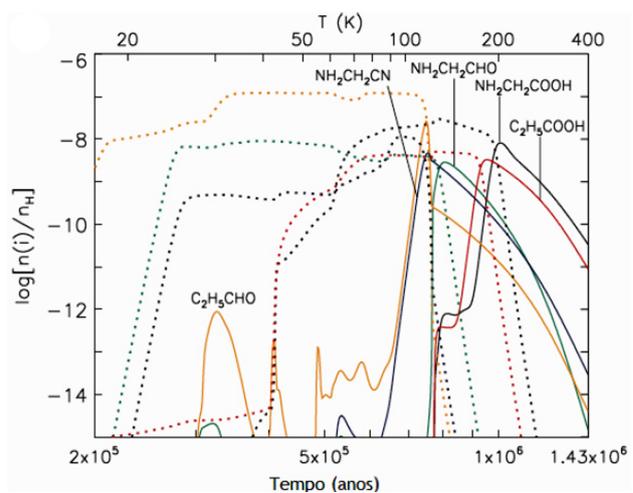


Figura 3: Fração de abundância do aminoácido glicina e de várias outras espécies similares ou parentes em função do tempo. A linha sólida indica espécies na fase gasosa e as linhas pontilhadas da mesma cor indicam mantos de gelo da mesma espécie. (Adaptado de [67]).

Há evidências que a glicina, um dos vinte aminoácidos ligados à vida, é produzido na superfície dos grãos sob a forma de gelo quando a temperatura do meio é de 30 a 200 K [67]. Acima dessa temperatura ela passa ao estado gasoso. Várias outras moléculas de importância prebiótica são produzidas nas nuvens de gás e poeira cósmica da mesma maneira e, de acordo com esses resultados, espera-se que as reações na superfície dos grãos definam a abundância de glicina nas nuvens cósmicas.

A dinâmica peculiar a cada sistema e a ocorrência de processos aleatórios devem ter sido responsáveis pelas diferenças entre os sistemas planetários distintos. Acredita-se que a evolução desse sistema dinâmico caótico levou à formação da primeira forma de vida na Terra e foi capaz de mantê-la durante bilhões de anos e possibilitar sua evolução.

4. Zona Habitável e Habitabilidade

A definição de Zona Habitável (ZH) foi introduzida em 1959 [68] como sendo a região ao redor de uma estrela em que o ciclo de fusão de H em He seja estável por alguns bilhões de anos, permitindo que um planeta possa manter água, no estado líquido, em sua superfície. A estrela fornece a energia e a água funciona como um solvente eficiente que participa ativamente das reações químicas.

Posteriormente foi introduzida a ideia de uma Zona Habitável Galáctica, definida como a região mais provável da vida emergir em uma galáxia (ver, e.g., [69–71]). Nessa região o enriquecimento químico contém abundância adequada de $CHONPS$ e a quantidade de eventos catastróficos capazes de interromper o processo de formação de vida (ou sua sobrevivência) é baixa comparada com a escala de tempo evolutivo terrestre. Lineweaver e colaboradores [69] modelaram a evolução da nossa Galáxia e identificaram como a ZHG uma região entre 7 e 9 kiloparsecs distante do centro, cujo raio varia com o tempo, composta por estrelas formadas entre 4 e 8 bilhões de anos atrás. Eles estimaram que cerca de 75% das estrelas nessa ZHG são mais velhas do que o Sol, aumentando a probabilidade de existência de vida nessa região. Nela também há baixa ocorrência de supernovas e a idade das estrelas seria suficiente para produzir o enriquecimento químico necessário à formação de planetas terrestres e à possível evolução biológica.

O conceito de ZH e sua relação com a química da vida pode ser flexibilizado de forma a incluir outros solventes e, hipoteticamente, outros elementos-base para formar uma bioquímica alternativa. Embora essa flexibilidade saia da abordagem padrão, é interessante explorar algumas possibilidades com a matéria prima disponível no Universo. Por exemplo, W. Bains [72] argumenta que outros fluidos podem ser abundantes em diferentes locais do Universo e a natureza química desses fluidos como solventes poderia modelar um ambiente que favoreceria a evolução de uma bioquímica não terrestre.

Outros processos químicos podem satisfazer o impulso termodinâmico para o surgimento da vida através de mecanismos alternativos, consequentemente produzindo assinaturas químicas diferentes da bioquímica terrestre.

4.1. Habitabilidade

Habitabilidade, no contexto astrofísico, é definida pelo conjunto de características que permitem um planeta rochoso abrigar vida. Isso não significa, necessariamente, que o planeta tenha que abrigar vida ou que ele apresente as características necessárias para isso. Somente podemos considerar habitabilidade do ponto de vista do sucesso na Terra, portanto dentro desse conjunto devem estar, entre outras condições: a) a presença de uma fonte de energia necessária para o metabolismo, b) os elementos químicos para formar as biomoléculas ($CHONPS$), c) a existência de um planeta rochoso que possa abrigar essas biomoléculas e d) um solvente para viabilizar as reações químicas (como descrito, por exemplo, em [73, 74]).

Deve ser ressaltado que condições geofísicas e geológicas foram também essenciais para a habitabilidade na Terra, tais como a presença de campo magnético, a tectônica de placas e a presença de escudos naturais como a Lua e Júpiter. Essas condições não serão discutidas neste artigo.

Estrelas com massa muito maior do que $\sim 1,5 M_{\odot}$ tem uma vida menor que 3 bilhões de anos, evoluindo para o estágio de anã branca após a fase de nova. Isso faz com que elas não se adequem ao item a), pois espera-se que estrelas que sejam uma fonte de energia estável para possibilitar a evolução da vida permaneçam na Sequência Principal por, pelo menos, o tempo aproximado que o Sol permanece - cerca de 10 bilhões de anos.

O item b) é contemplado pela química da nuvem que dá origem aos sistemas protoplanetários, possivelmente baseada nos $CHONPS$. Ela determina a condição de habitabilidade de um determinado nicho em função da abundância, versatilidade de combinação e pelo fato de formar as estruturas fundamentais da vida como a conhecemos. Quanto mais próximo da data atual, mais enriquecido quimicamente deve ser o meio que formará o disco e, provavelmente, permitirá a formação de planetas rochosos, o que leva ao item c). Planetas rochosos apresentam a interface sólido-líquido necessária à diversidade de condições evolutivas que eventualmente surgirão. Do ponto de vista químico, a água é considerada o candidato mais adequado ao papel de solvente, atendendo ao item d). Essa escolha deve-se a diversas características, entre elas a de ser uma molécula bastante abundante no Universo, permanecer no estado líquido durante um intervalo de temperatura muito maior do que o de outros solventes e permitir um bom isolamento térmico e elétrico no meio celular e intercelular.

A descoberta sistemática de novos exoplanetas já contabiliza, na data da redação deste artigo, 3672 planetas (sendo 12 do tipo terrestre), 2752 sistemas planetários e

616 sistemas com múltiplos planetas, e tem possibilitado uma melhor compreensão, e mesmo reavaliações, do conceito de ZH, à luz da dinâmica planetária e da energética disponível em estrelas de massa menor que $\sim 1 M_{\odot}$. Os exoplanetas do tipo terrestre encontrados permitem especular um futuro promissor para atender ao critério c) listado no parágrafo anterior. Condições muito diversas das encontradas no nosso Sistema Solar exigem uma reanálise das possibilidades de formação e estabilidade de órbitas planetárias, implicando em grande diversidade de condições atmosféricas para os exoplanetas do tipo terrestre.

Modelos evolutivos da atmosfera terrestre, considerando fatores como oceanos, desertos, vegetação e cobertura de nuvens são usados para obter as características ambientais planetárias cuja assinatura espectral possa ser usada para deduzir condições de habitabilidade ou fornecer indicações da presença de vida (ver, e.g., [74,75]). Situações particulares que permitam a existência de água líquida fora da ZH devem ser consideradas, como é o caso de Europa, satélite de Júpiter, ou Encelado, satélite de Saturno onde a água é mantida líquida pelo aquecimento de seu interior devido às forças de maré. O estudo de exoplanetas é uma área em que alguns grupos no Brasil vem mantendo uma atividade regular há mais de 10 anos, em particular com forte participação do INPE e da Universidade Presbiteriana Mackenzie [76–86].

Há diversos autores que consideram o Universo como um “ambiente biofílico” dentro do contexto Λ CDM, com base no argumento de que os CHONPS necessários para o aparecimento de compostos biológicos existem desde que o Universo tinha ~ 100 milhões de anos, conforme recentemente apresentado em [87]. Outros autores ([8,9,88]) consideram que estes elementos podem ter sido produzidos quando o Universo era ainda mais jovem (com cerca de 30 milhões de anos) e sugerem um enriquecimento de C em estrelas de baixa massa (tipos espectrais K e M), as chamadas “CEMP stars” [89]. Eles também argumentam que, a menos que a habitabilidade em torno de estrelas de baixa massa seja suprimida, a probabilidade de existência de vida, daqui a 10 trilhões de anos, será maior ao redor de estrelas com cerca de $0,1 M_{\odot}$. Nesse contexto a habitabilidade cósmica seria possível logo depois da formação da primeira geração de estrelas, após o Big Bang, e terminaria somente cerca de 10 trilhões de anos depois, quando todas as estrelas terão esgotado seu ciclo na Sequência Principal.

Recentemente, Adams e colaboradores [90,91] analisaram a influência dos valores da constante de estrutura gravitacional (definida como $\alpha_G \equiv Gm_p^2/\hbar c$) e da constante de estrutura fina $\alpha \equiv e^2/\hbar c$, sobre as condições de habitabilidade do Universo, e concluíram que essas condições são preservadas mesmo variando os parâmetros por algumas ordens de grandeza. Análise similar foi feita considerando a influência de variações na amplitude das flutuações de densidade primordial (Q) sobre a formação de estrelas, concluindo que a habitabilidade em outros

universos é mais favorável e mais diversificada do que se imaginava.

Um Universo “viável”, em termos de Habitabilidade, é definido pelo intervalo de valores de G que permite a existência de reações nucleares para formar estrelas e planetas habitáveis. Apesar de Adams analisar somente duas constantes físicas, α e G , e de ser desconhecida a distribuição de probabilidades a partir da qual os possíveis universos “escolhem” os valores dessas constantes, elas podem variar de ordens de grandeza, dentro do espaço de parâmetros permitidos, e ainda permitir Universos “viáveis”. Mesmo considerando-se um conjunto grande de vínculos restritivos, ainda assim o limite encontrado de $\alpha_G/\alpha \simeq 10^{-34}$ sugere que Universos habitáveis podem existir dentro uma grande hierarquia de intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética.

5. Considerações sobre a vida

Uma definição operacional ou uma teoria que descreva o fenômeno da vida é essencial para a distinção de formas de vida diferentes das observadas na Terra. Particularmente, a importância cresce à medida que novas missões para estudar corpos do sistema solar em busca de evidências de vida são propostas pelas agências espaciais de todo o mundo. Cleland e Chyba [92] evidenciam essa importância: “*À medida que a ciência progride na compreensão da origem da vida na Terra (...) e com a atenção concentrando-se na astrobiologia e na busca pela vida em Marte e em Europa, lua de Júpiter, aumenta a necessidade de uma definição geral de vida*”.

Até o momento, não há uma definição que seja aceita pela comunidade ligada à Astrobiologia, independentemente do foco da disciplina envolvida [93], e a dificuldade é objeto de estudo de vários programas em andamento no mundo todo. Discussões mais detalhadas sobre as dificuldades dessa definição e as implicações que ela traria à comunidade podem ser encontradas, e.g., em [94,95]. Não havendo uma teoria geral sobre a natureza de sistemas vivos, nenhuma das definições de vida fornece uma resposta satisfatória. Assim, é recomendável utilizar uma abordagem científica cautelosa e ao mesmo tempo flexível, que auxilie sua identificação minimizando as chances de excluir outros sistemas vivos muito diferentes dos existentes na Terra. Algumas características parecem ser comuns a praticamente todos os sistemas vivos conhecidos e tem sido alvo de estudos durante as últimas décadas para sua melhor determinação, como descrito por Szostak e colaboradores [96].

Como exemplo, Koshland [97] propõe que sejam utilizados princípios termodinâmicos e cinéticos essenciais para que um sistema vivo, tal como o conhecemos, possa existir. Eles foram denominados “pilares da vida” e agrupados sob o acrônimo PICERAS, que significa: Programa; Improvisação; Compartimentalização; Energia; Regeneração; Adaptabilidade; e Isolamento (*Seclusion*). Ainda assim, nem sempre o que é vivo apresenta todos essas

características e nem sempre todas elas correspondem a algo vivo.

No Programa da NASA de Estudos dos Limites da Vida Orgânica em Sistemas Planetários [98] foram adotadas as seguintes características para tentar caracterizar um sistema vivo, a saber: ausência de equilíbrio termodinâmico; dependência da manutenção da taxa de variação da entropia (com valores negativos indicando o aumento de organização); manutenção de seu estado organizado, aumentando a entropia da vizinhança; presença de metabolismo, complexidade e organização; a existência de mecanismos de reprodução; e capacidade de desenvolvimento, evolução e autonomia. Essas características são responsáveis pelas funções básicas observadas nos sistemas vivos terrestres: adquirir energia do meio e convertê-la para a forma química; possuir uma rede de reações químicas, envolvendo os *building blocks* em solvente apropriado, que sintetizam os compostos necessários para manutenção, crescimento e auto-replicação; e utilização de compostos químicos capazes de armazenar grandes quantidades de informação para que o sistema tenha condições de se auto-replicar e auto-perpetuar.

5.1. Dos átomos aos sistemas vivos

Desde o início do Universo, a matéria tem evoluído na direção de formas mais complexas. Nos instantes iniciais foram produzidos H e He e posteriormente, outros elementos emergiram em decorrência da evolução das estrelas. Apesar de terem sido formados mais de 100 elementos químicos, os elementos C, H, O e N compõem boa parte dos compostos químicos observados no Universo, devido à facilidade com que elas formam ligações covalentes, produzindo uma grande variedade de moléculas no meio interestelar.

As primeiras moléculas orgânicas formadas continham um pequeno número de átomos, mas tinham a capacidade de formar compostos diferentes através de várias reações. As transformações de HCN (ácido cianídrico) em cianoacetileno HC₃N e cianamida CH₂N₂ e daí em aminoácidos e bases nucleicas é semelhante à transformação de formaldeído CH₂O em açúcar. O experimento de S. Miller mostrou que uma atmosfera contendo as moléculas CH₄, NH₃, H₂ e vapor d'água, submetida a descargas elétricas formam glicina, α-alanina e β-alanina [99]. Experimentos posteriores realizados por S. Fox [100, 101] mostraram que o fluxo de CH₄ através de uma solução concentrada de NH₄OH incidindo sobre uma superfície similar à lava vulcânica ou sílica, com temperatura de 1000° C levou à formação de 12 aminoácidos (ácido aspártico, ácido glutâmico, glicina, alanina, valina, leucina, isoleucina, serina, treonina, prolina, tirosina e fenilalanina), potenciais percussores do RNA [102–104].

As análises de amostras obtidas em experimentos similares [105], com uma mistura de CH₄, H₂S, NH₃, e CO₂, mostraram a formação de 23 aminoácidos e 4 aminas, incluindo 7 compostos organosulfurados. As

abundâncias medidas nesse experimento são compatíveis com medidas em alguns meteoritos do tipo condritos carbonáceos. De acordo com Parker [105], os resultados sugerem que a mistura de gases, incluindo H₂S, deve ter ajudado na síntese de aminoácidos e aminas na Terra primitiva e durante o processo de formação do Sistema Solar. Já o ambiente contendo H₂S utilizado por Miller em seu experimento parece não ter sido comum na Terra primitiva, embora fosse possível encontra-lo próximo a vulcões.

Apesar dos organismos celulares possuírem sofisticada capacidade metabólica, a origem de sua rede de reações é pouco conhecida [106]. A estrutura central das redes metabólicas é similar em todos os organismos conhecidos estudados [107, 108] levando a crer que estes mecanismos surgiram nos primórdios da evolução celular. Uma hipótese sobre a origem do metabolismo é que as redes de reação estabeleceram-se na Terra prebiótica como consequência do ambiente físico e químico do local onde a vida emergiu pela primeira vez, reforçando a hipótese de Bains [72] de que o solvente disponível molda a química necessária à vida. Com base nesses argumentos, pode-se imaginar que a sequência de reações químicas principais no metabolismo atual (glicólise e reações pentoses-fosfato) deve ser muito semelhante à do primeiro organismo vivo [108–110].

De acordo com Keller e colaboradores [111] a sequência de reações que constituem o metabolismo central do C poderia ser restringida pelo ambiente do oceano rico em ferro do Arqueano, indicando que os primeiros processos metabólicos poderiam ter se originado no mundo prebiótico. Esses resultados sugerem que compostos prebióticos complexos, como aminoácidos e *proteínóides*, poderiam fazer parte de uma rede complexa de reações químicas alimentada pela energética presente na atmosfera primitiva da Terra, levando à formação de proteínas e ao conjunto de reações que compõem o metabolismo central das células atuais.

A possibilidade de que essa química pode ter começado na nuvem protoestelar fica evidente nas observações atuais de moléculas complexas nas nuvens de gás e poeira no meio interestelar, como mostrado nas seções 3.2 e 3.3, e na composição química dos meteoritos condritos carbonáceos, como o meteorito de Murchison [112]. Dessas moléculas são formados os vinte aminoácidos, cinco bases nucleicas (nucleobases), dois açúcares, glicerol, um aminoálcool (colina) e um ácido graxo (ácido palmítico) necessários para formar um sistema vivo [23].

A transição de sistemas **não-vivos** → **vivos** a partir de processos físico-químicos ainda é desconhecida e provavelmente ocorreu em sistemas muito pouco autopoieticos³ e fora da homeostase⁴. Mesmo que essa

³autopoietico - capaz de reproduzir a si próprio

⁴homeostase - capacidade do organismo vivo de apresentar uma situação físico-química característica e constante, dentro de determinados limites, mesmo diante de alterações impostas pelo meio ambiente.

transição tenha ocorrido mais de uma vez, ou muitas vezes, devido às alterações ambientais extremas que ocorreram na Terra jovem, em algum momento ela se estabeleceu definitivamente, dando origem às formas de vida observadas hoje. Elas tem relação direta com as condições de habitabilidade no disco protoplanetário e, mais remotamente, com as condições biofílicas geradas após o surgimento das primeiras estrelas. Novamente, usando a argumentação acima e a visão proposta por Bains [72], diferentes condições de habitabilidade, particularmente “locais”, derivadas da formação do disco protoplanetário, podem, eventualmente, dar origem a formas de vida distintas da que conhecemos, caso elas sejam capazes de emergir dos processos físico-químicos locais.

6. Considerações finais

O modelo Λ CDM é o melhor cenário para descrever a formação das primeiras estruturas do Universo e indica que os elementos fundamentais à vida (*CHONPS*) foram criados no Universo por volta de 100 milhões de anos. Em decorrência da expansão, resfriamento e interação gravitacional, as flutuações primordiais de densidade de matéria condensaram-se, formando imensas nuvens de gás, possibilitando a formação das primeiras estrelas, o início do processo de enriquecimento químico do Universo e a subsequente formação de poeira e moléculas complexas. Observações astronômicas, aliadas a simulações numéricas da química do meio interestelar, indicam que moléculas orgânicas complexas foram criadas em nuvens moleculares e sugerem que os compostos necessários ao surgimento da vida, como a conhecemos, estão disponíveis e espalhados no Universo há vários bilhões de anos. Entretanto, o passo para formar o primeiro sistema vivo a partir de um conjunto de moléculas complexas ainda é desconhecido.

A combinação das condições de habitabilidade apresentadas na seção 4 permitiram que a Terra abrigasse um primeiro sistema vivo (ou diversos?) que conseguiu sobreviver e evoluir, tanto no aspecto de complexidade, no caso dos eucariontes, quanto no aspecto de adaptabilidade, no caso de bactérias e arqueobactérias. Há diversas evidências geológicas e geofísicas no sentido de que estes foram os passos para o surgimento e evolução da vida na Terra. Embora a compreensão do(s) mecanismo(s) de transição de um sistema não-vivo para vivo a partir de processos físico-químicos locais seja um tema bastante desafiador, um dos principais pontos deste artigo é argumentar que as condições físico-químicas necessárias (e, talvez, suficientes) para o aparecimento da vida, tal como a conhecemos, são comuns e remontam à formação das primeiras estrelas e ao enriquecimento químico do Universo como um todo.

É perfeitamente aceitável especular que a química da vida não seja necessariamente baseada em *C* e *H₂O*, porém outras possibilidades dependem do mesmo processo

de enriquecimento químico universal. Mesmo que o *Si* seja menos abundante e menos versátil quimicamente, e que os solventes mencionados na subseção 4.1 sejam menos versáteis, do ponto de vista termodinâmico, a enorme quantidade de exoplanetas encontrados até o momento e a escala de tempo evolutivo de outros sistemas planetários, em comparação com o Sistema Solar, permite aceitar que as condições consideradas como prebióticas na Terra existam em vários outros pontos do Universo.

Por fim, é importante destacar que este artigo resultou das discussões ocorridas durante a disciplina “Fundamentos de Astrobiologia”, ministrada no programa de pós-graduação em Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2016 e é parte do esforço de alguns dos autores em oferecer um enfoque “astrobiológico” a determinados projetos de pesquisa ligados ao programa.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem o revisor deste artigo pelos comentários e sugestões que melhoraram significativamente a redação do manuscrito, e também ao Dr. Isaac Joukhadar pelas incontáveis horas de discussão durante a seção sobre a definição de vida.

Referências

- [1] G.F. Smoot, C.L. Bennett, A. Kogut, E.L. Wright, J. Aymon, N.W. Boggess, E.S. Cheng, G. de Amici, S. Gulkis, M.G. Hauser et al., *Astrophys. J.* **396**, L1 (1992).
- [2] C.L. Bennett, A. Kogut, G. Hinshaw, A.J. Banday, E.L. Wright, K. Gorski, D.T. Wilkinson, R. Weiss, G.F. Smoot, S.S. Meyer et al., *Astrophys. J.* **436**, 423 (1994).
- [3] C.L. Bennett, R.S. Hill, G. Hinshaw, M.R.olta, N. Odegard, L. Page, D.N. Spergel, J.L. Weiland, E.L. Wright, M. Halpern et al., *Astrophys.J.* **148**, 97 (2003).
- [4] C.L. Bennett, D. Larson, J.L. Weiland, N. Jarosik, G. Hinshaw, N. Odegard, K.M. Smith, R.S. Hill, B. Gold, M. Halpern et al., *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 20 (2013).
- [5] P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, F. Atrio-Barandela, J. Aumont, C. Baccigalupi, A.J. Banday, R.B. Barreiro et al., *Astron. Astrophys* **571**, A16 (2014).
- [6] P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A.J. Banday, R.B. Barreiro, J.G. Bartlett, N. Bartolo et al., *Astron. Astrophys.* **594**, A13 (2016).
- [7] C. Patrignani, K. Agashe, G. Aielli, C. Amsler, M. Antonelli, D.M. Asner, H. Baer, S. Banerjee, R.M. Barnett, T. Basaglia et al., *Chinese Physics C.* **40**, 100001 (2016).
- [8] A. Loeb, *International Journal of Astrobiology* **13**, 337 (2014).
- [9] A. Loeb, *ArXiv:1606.08926* (2016).
- [10] S. Naoz, S. Noter e R. Barkana, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **373**, L98 (2006).
- [11] K. Nomoto, C. Kobayashi e N. Tominaga, *Ann. Rev. Astron. Astrophys* **51**, 457 (2013).

- [12] U. Maio e E. Tescari, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **453**, 3798 (2015).
- [13] G. Kulkarni, J.F. Hennawi, E. Rollinde e E. Vangioni, *Astrophys. J.* **787**, 64 (2014).
- [14] A. Tielens, *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
- [15] E. Herbst e E.F. van Dishoeck, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 427 (2009).
- [16] R.T. Garrod, *Astrophys. J.* **765**, 60 (2013).
- [17] P. Caselli e C. Ceccarelli, *The Astron. Astrophys. Rev.* **20**, 56 (2012).
- [18] P. Ehrenfreund e S.B. Charnley, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **38**, 427 (2000).
- [19] E.F. van Dishoeck e G.A. Blake, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 317 (1998).
- [20] S.R. Taylor, *Solar System Evolution: a New Perspective* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
- [21] A.N. Youdin e S.J. Kenyon *From Disks to Planets* (Springer Netherlands, Dordrecht, 2013).
- [22] J.P. Williams e L.A. Cieza, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **49**, 67 (2011).
- [23] M. Olomucki, *The Chemistry of Life* (McGraw-Hill, Poughkeepsie, 1993).
- [24] H. Cottin, J.M. Kotler, K. Bartik, H.J. CleavesII, C.S. Cockell, J.P.P. de Vera, P. Ehrenfreund, S. Leuko, I.L.T. Kate, Z. Martins et al., *Space Science Reviews* **209**, 1 (2015).
- [25] C.M.D. Santos, L.P. Alabi, A.C.S. Friça e D. Galante, *International Journal of Astrobiology* **15**, 251 (2016).
- [26] G. Horneck, N. Walter, F. Westall, J.L. Grenfell, W.F. Martin, F. Gomez, S. Leuko, N. Lee, S. Onofri, K. Tsiganis et al., *Astrobiology* **16**, 201 (2016).
- [27] J. Quillfeldt, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27**, 685 (2010).
- [28] A.D. Neto, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27**, 641 (2010).
- [29] I.G. Paulino-Lima e C.A.S. Lage, *Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira* **29**, 14 (2010).
- [30] J.A.F. Pacheco, *Revista Ciência Hoje* **318**, 35 (2014).
- [31] G. Zubay, *Origins of life on the Earth and in the Cosmos* (Academic Press, San Diego, 2000).
- [32] J. Lunine, *Astrobiology: a multi-disciplinary approach* (Pearson Addison Wesley, Boston, 2004).
- [33] A. Shaw, *Astrochemistry: From Astronomy to Astrobiology* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2006).
- [34] G. Horneck e P. Rettberg, *Complete Course in Astrobiology* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2008).
- [35] C. Cockell *Astrobiology: understanding life in the cosmos* (Wiley-Blackwell, Londres, 2015).
- [36] A. Longstaff, *Astrobiology: An Introduction* (CRC Press, Flórida, 2015).
- [37] D. Galante, E.P. da Silva, F. Rodrigues, J.E. Horvath e M.G.B. de Avellar, *Astrobiologia: uma ciência emergente* (Tikinet, São Paulo, 2016).
- [38] E. Calabrese, R.A. Hložek, J.R. Bond, M.J. Devlin, J. Dunkley, M. Halpern, A.D. Hincks, K.D. Irwin, A. Kosowsky, K. Moodley et al., *Phys. Rev. D.* **95**, 063525 (2017).
- [39] J. Dunkley, E. Calabrese, J. Sievers, G.E. Addison, N. Battaglia, E.S. Battistelli, J.R. Bond, S. Das, M.J. Devlin, R. Dünner et al., *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2013**, 025 (2013).
- [40] R. Hložek, J. Dunkley, G. Addison, J.W. Appel, J.R. Bond, C.S. Carvalho, S. Das, M.J. Devlin, R. Dünner, T. Essinger-Hileman et al., *Astrophys. J.* **749**, 90 (2012).
- [41] J.L. Sievers, R.A. Hložek, M.R. Nolta, V. Acquaviva, G.E. Addison, P.A.R. Ade, P. Aguirre, M. Amiri, J.W. Appel, L.F. Barrientos et al., *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **10**, 060 (2013).
- [42] R.R. Lindner, P. Aguirre, A.J. Baker, J.R. Bond, D. Crichton, M.J. Devlin, T. Essinger-Hileman, P. Gallardo, M.B. Gralla, M. Hilton et al., *Astrophys. J.* **803**, 79 (2015).
- [43] C.L. Reichardt, L. Shaw, O. Zahn, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang, H.M. Cho, T.M. Crawford et al., *Astrophys. J.* **755**, 70 (2012).
- [44] E. Shirokoff, C.L. Reichardt, L. Shaw, M. Millea, P.A.R. Ade, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang et al., *Astrophys. J.* **736**, 61 (2011).
- [45] K.T. Story, C.L. Reichardt, Z. Hou, R. Keisler, K.A. Aird, B.A. Benson, L.E. Bleem, J.E. Carlstrom, C.L. Chang, H.M. Cho et al., *Astrophys. J.* **779**, 86 (2013).
- [46] <http://www.sdss.org/collaboration/citing-sdss/>, acessado em 09/07/2017.
- [47] S.J. Maddox, G. Efsthathiou, W.J. Sutherland e J. Loveday, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **243**, 692 (1990).
- [48] <http://www.2dfgrs.net/>, acessado em 09/07/2017.
- [49] <http://www.6dfgrs.net/>, acessado em 09/07/2017.
- [50] A.G.G.M. Tielens, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1021 (2013).
- [51] A. Loeb e S. Furlanetto, *The First Galaxies in the Universe*. (Princeton University Press, Princeton, 2013).
- [52] S. Wilson, P.F. Bernath e R. McWeeny's, *Handbook of Molecular Physics and Quantum Chemistry, 3 Volume Set* (Wiley, Bognor Regis, 2003).
- [53] W. Short e I. Cairns, in *Proceedings from 8th Australian Space Science Conference* (National Space Society of Australia Ltd, Sydney, 2009).
- [54] D. Hollenbach e E.E. Salpeter, *Astrophys. J.* **163**, 155 (1971).
- [55] R. Pagni, *Journal of Chemical Education* **84**, 233 (2007).
- [56] H.I. Ewen e E.M. Purcell, *Nature* **168**, 356 (1951).
- [57] H.C. van de Hulst, *Astron. J.* **56**, 144 (1951).
- [58] A.C. Cheung, D.M. Rank, C.H. Townes, D.D. Thornton e W.J. Welch, *Physical Review Letters* **21**, 1701 (1968).
- [59] A.C. Cheung, D.M. Rank, C.H. Townes, D.D. Thornton e W.J. Welch, *Nature* **221**, 626 (1969).
- [60] R.W. Wilson, K.B. Jefferts e A.A. Penzias, *Astrophys. J. Lett.* **161**, L43 (1970).
- [61] S. Kwok, *Astrophys. Space Science* **319**, 5 (2009).
- [62] S. Kwok, *Organic Matter in the Universe* (Wiley, Weinheim, 2011).
- [63] E. Van Dishoeck, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 119167 (2004).
- [64] T. Henning e D. Semenov, *Chemical Reviews* **113**, 9016 (2013).
- [65] A. Brack, *Chemistry & Biodiversity* **4**, 665 (2007).
- [66] Y. Aikawa, E. Herbst, H. Roberts e P. Caselli, *Astrophys. J.* **620**, 330 (2005).
- [67] R.T. Garrod, *Astrophys. J.* **778**, 158 (2013).
- [68] S.S. Huang, *Publ. of the Astr. Soc. of the Pacific* **71**, 421 (1959).
- [69] C.H. Lineweaver, Y. Fenner e B.K. Gibson, *Science* **303**, 59 (2004).

- [70] P. Ward e D. Brownlee, *Sós no Universo? Porque a vida inteligente é impossível fora do planeta Terra*. (Campus, São Paulo, 2000).
- [71] G. Gonzalez, D. Brownlee e P. Ward, *Icarus* **152**, 185 (2001).
- [72] W. Bains, *Astrobiology* **4**, 137 (2004).
- [73] S.D. Domagal-Goldman, K.E. Wright, K. Adamala, L.A. de la Rubia, J. Bond, L.R. Dartnell, A.D. Goldman, K. Lynch, M.E. Naud, I.G. Paulino-Lima et al., *Astrobiology* **16**, 561 (2016).
- [74] L. Kaltenegger, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **55**, 433 (2017).
- [75] L. Kaltenegger, W.A. Traub e K.W. Jucks, *Astrophys. J.* **658**, 598 (2007).
- [76] E. Martioli, *Exoplanetas: o que são e como detectá-los..* Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2006).
- [77] A. Gould, S. Dong, B.S. Gaudi, A. Udalski, I.A. Bond, J. Greenhill, R.A. Street, M. Dominik, T. Sumi, M.K. Szymański et al., *Astrophys. J.* **720**, 1073 (2010).
- [78] K.H. Hwang, J.Y. Choi, I.A. Bond, T. Sumi, C. Han, B.S. Gaudi, A. Gould, V. Bozza, J.P. Beaulieu, Y. Tsapras et al., *Astrophys. J.* **778**, 55 (2013).
- [79] N. Kains, R.A. Street, J.Y. Choi, C. Han, A. Udalski, L.A. Almeida, F. Jablonski, P.J. Tristram, U.G. Jørgensen, M.K. Szymański et al., *Astron. Astrophys.* **552**, A70 (2013).
- [80] R.A. Street, J.Y. Choi, Y. Tsapras, C. Han, K. Furusawa, M. Hundertmark, A. Gould, T. Sumi, I.A. Bond, D. Wouters et al., *Astrophys. J.* **763**, 67 (2013).
- [81] C. Han, A. Udalski, J.Y. Choi, J.C. Yee, A. Gould, G. Christie, T.G. Tan, M.K. Szymanski, M. Kubiak, I. Soszynski et al., *Astrophys. J. Lett.* **762**, L28 (2013).
- [82] L.A. Almeida, F. Jablonski e C.V. Rodrigues, *Astrophys. J.* **766**, 11 (2013).
- [83] C.B. Henderson, H. Park, T. Sumi, A. Udalski, A. Gould, Y. Tsapras, C. Han, B.S. Gaudi, V. Bozza, F. Abe et al., *Astrophys. J.* **794**, 7 (2014).
- [84] L.R.M. Tusnski e A. Valio, in *Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets*, editado por N. Haghighipour, (Cambridge University Press, Cambridge, 2014).
- [85] J. Skowron, I.G. Shin, A. Udalski, C. Han, T. Sumi, Y. Shvartzvald, A. Gould, D. Dominis Prester, R.A. Street, U.G. Jørgensen et al., *Astrophys. J.* **804**, 33 (2015).
- [86] A. Valio, R. Estrela, Y. Netto, J.P. Bravo e J.R. de Medeiros, *Astrophys. J.* **835**, 294 (2017).
- [87] L.C. Corazza, *The Role of Population II and III Stars in the Cosmic Chemical Evolution*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2017).
- [88] A. Loeb, R.A. Batista e D. Sloan, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **8**, 040 (2016).
- [89] N. Mashian e A. Loeb, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **460**, 2482 (2016).
- [90] F.C. Adams, K.R. Coppess e A.M. Bloch, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **9**, 030 (2015).
- [91] F.C. Adams, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **02**, 042 (2016).
- [92] C.E. Cleland e C.F. Chyba, *Orig. Life Evol. Biosph.* **32**, 387 (2002).
- [93] E.N. Trifonov, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics* **29**, 647 (2012).
- [94] M.A. Bedau e C.E. Cleland, *The Nature of Life* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
- [95] S. Benner, *Astrobiology* **10**, 1021 (2010).
- [96] J.W. Szostak, J.C. Wheeler, S.A. Benner, J.A. Berry, R. Blake, W.M. Calvin, M.J. Daly, K.H. Freeman, J.P. Gogarten, J.F. Kasting et al., *The Astrophysical Context of Life* (National Research Council, Washington, 2005).
- [97] D.E. Koshland, *Science* **295**, 2215 (2002).
- [98] L. Hays, *NASA Astrobiology Strategy* (NASA, Washington, 2015).
- [99] S.L. Miller, *Science* **117**, 528 (1953).
- [100] S.W. Fox e K. Dose, *Molecular Evolution and the Origin of Life* (W.H. Freeman & Co Ltd, San Francisco, 1972).
- [101] S.W. Fox e K. Harada, *Science* **128**, 1214 (1958).
- [102] J.L. Bada, *Earth and Planetary Science Letters* **226**, 1 (2004).
- [103] M.W. Powner, B. Gerland e J.D. Sutherland, *Nature* **459**, 239 (2009).
- [104] N.V. Hud, B.J. Cafferty, R. Krishnamurthy e L.D. Williams, *Chem. Biol.*, **20**, 466 (2013).
- [105] E.T. Parker, H.J. Cleaves, J.P. Dworkin, D.P. Glavin, M. Callahan, A. Aubrey, A. Lazcano e J.L. Bada, *PNAS* **108**, 5526 (2011).
- [106] P.L. Luisi, *Chemistry & Biodiversity*, **9**, 2635 (2012).
- [107] H. Jeong, B. Tombor, R. Albert, Z.N. Oltvai e A.L. Barabási, *Nature* **407**, 651 (2000).
- [108] R. Braakman e E. Smith, *Phys Biol* **10**, 011001 (2013).
- [109] R. Shapiro, *IUBMB Life* **49**, 173 (2000).
- [110] H. Huber, M.J. Hohn, R. Rachel, T. Fuchs, V.C. Wimmer e K.O. Stetter, *Nature* **417**, 63 (2002).
- [111] M.A. Keller, A.V. Turchyn e M. Ralser, *Molecular Systems Biology* **10**, 725 (2014).
- [112] P. Schmitt-Kopplin, Z. Gabelica, R.D. Gougeon, A. Fekete, B. Kanawati, M. Harir, I. Gebefuegi, G. Eckel e N. Hertkorn, *PNAS* **107**, 2763 (2010).