

Atmosferas da Terra e de Marte: uma abordagem astrobiológica

Gustavo Santos Rodrigues e Anthony Henrique Perucci Mostaro

Universidade Federal de Juiz de Fora

Resumo

Este artigo compara as atmosferas da Terra e de Marte sob a perspectiva astrobiológica, examinando evolução, composição e processos que condicionam a habitabilidade. Para a Terra, discute-se a formação e a regulação climática por oceanos e sedimentação de CO_2 , o surgimento de uma atmosfera rica em O_2 (Grande Evento de Oxidação) e o papel de N_2 , O_2 e O_3 na manutenção da água líquida e da vida. Em Marte, analisam-se a atual atmosfera de baixa pressão dominada por CO_2 , a perda atmosférica e hídrica, a intensidade da irradiação superficial e a química oxidante do solo que comprometem a preservação de matéria orgânica. O texto enfatiza a complementaridade entre estudos atmosféricos e investigações do subsolo, onde refúgios subsuperficiais com menor dose de irradiação e oxidação química atenuada são identificados como os locais mais promissores para preservação de bioassinaturas. O artigo adota caráter didático a partir de uma abordagem integradora, apoiando a compreensão de estudantes e simpatizantes das áreas de astronomia e astrobiologia acerca dos processos-chave que regem a habitabilidade planetária.

Abstract

This article compares the atmospheres of Earth and Mars from an astrobiological perspective, examining their evolution, composition, and the processes that determine habitability. For Earth, it discusses formation and climate regulation by the oceans and the sequestration of CO_2 through sedimentation, the rise of an O_2 -rich atmosphere (the Great Oxidation Event, GOE), and the roles of N_2 , O_2 , and O_3 in maintaining liquid water and supporting life. For Mars, it analyzes the current low-pressure, CO_2 -dominated atmosphere, atmospheric and water loss, the intensity of surface irradiation, and the soil's oxidizing chemistry that compromise the preservation of organic matter. The text emphasizes the complementarity between atmospheric studies and subsurface investigations, identifying subsurface refugia, with lower irradiation doses and reduced chemical oxidation, as the most promising locations for biosignature preservation. The article adopts a didactic, integrative approach intended to help students and enthusiasts in astronomy and astrobiology understand the key processes that govern planetary habitability.

Palavras-chave: atmosferas planetárias; habitabilidade; perda atmosférica; radiação; astrobiologia.

Keywords: planetary atmospheres; habitability; atmospheric escape; radiation; astrobiology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7n1.51028](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7n1.51028)

1 Introdução

O termo “atmosfera” tem origem do latim *atmosphæra*. A palavra latina surgiu no começo do século XVII, a partir de um neologismo criado por Willebrord Snellius (1580–1626), astrônomo e matemático holandês conhecido pela Lei da Refração (ou Lei de Snell), na tradução de um trabalho cosmográfico de Simon Stevin (1548–1620), engenheiro e físico belga [1]. *Atmosphæra* passou por inúmeras mudanças de significado. No fim do século XVII a palavra era empregada de forma indefinida em áreas muito distintas, como cosmologia, botânica e medicina [1]. Atualmente,

“atmosfera” se refere à porção gasosa exterior a um corpo celeste, como planetas e luas, mantidas pela ação da gravidade.

O Sistema Solar se formou há cerca de 4,6 bilhões de anos, a partir do colapso e fragmentação de uma nuvem molecular [2,3], a chamada nebulosa solar [3]. Uma grande variedade de processos dinâmicos e físicos ocorreu até chegarmos ao atual estado do Sistema Solar [2,4].

Como resultado desses processos, cada planeta desenvolveu características próprias, incluindo sua atmosfera. As atmosferas podem variar quanto à composição química, temperatura e den-

sidade, entre outros aspectos que serão discutidos. Essas características ditam o clima e, conseqüentemente, a habitabilidade do corpo celeste.

Este artigo tem como objetivo comparar as principais características das atmosferas da Terra e de Marte, destacando composição, relevância e dinâmicas de forma didática e correlacionando esses aspectos com a habitabilidade do planeta. Além de apresentar uma revisão acessível e embasada de parte do atual conhecimento científico, este trabalho foi pensado para contribuir para o conhecimento de estudantes secundários, graduandos e simpatizantes das áreas de astronomia, astrobiologia e correlatas.

2 Atmosfera da Terra

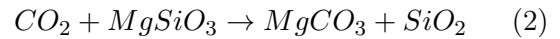
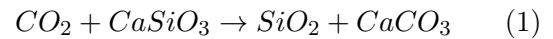
2.1 Evolução

Acredita-se que um dos mais importantes fatores, se não o mais importante, para o desenvolvimento da atmosfera da Terra foi a presença de grandes corpos d'água na superfície do planeta. Essa condição é dada à posição privilegiada do planeta no Sistema Solar, onde a energia do Sol não é suficiente para volatilizar as imensas massas líquidas [5].

Cerca de 60 milhões de anos após a formação da Terra [6], um planetesimal chamado Theia, que tinha dimensões de Marte, colidiu com nosso planeta. Essa grande colisão, além de originar a Lua, impactou a atmosfera da Terra primitiva, que era originalmente rica em H_2 , produzindo uma atmosfera secundária rica em CO_2 e vapor d'água [7]. Os grandes oceanos líquidos surgiram logo após, há cerca de 4,4 bilhões de anos [8]. A atmosfera terrestre passou a possuir, então, uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2) [9–11], ou seja, a Terra apresentava uma atmosfera mais densa que a atual e com maior retenção de calor.

Conforme o passar de centenas de milhões de anos, o dióxido de carbono atmosférico foi progressivamente se sedimentando principalmente em carbonato de cálcio ($CaCO_3$, reação (1)) e, em menor proporção, em carbonato de magnésio ($MgCO_3$, reação (2)) [12]. Esse processo diminuiu a densidade da atmosfera e, conseqüentemente, a pressão. A absorção do CO_2 pode ser

expressa através das reações de Urey:



Como curiosidade, se há 4,0 bilhões de anos todo carbonato presente nos dias de hoje estivesse na forma de CO_2 , a pressão atmosférica seria aproximadamente 70 vezes maior que a de hoje, isto é, uma pressão atmosférica de ≈ 70 bar [9]. Isso equivale à atual pressão atmosférica de Vênus [5]. Porém, conjuntos de fatores revelam que a concentração de CO_2 no Arqueano, período de 4,0 a 2,5 bilhões de anos atrás, não passava de 900 partes por milhão (ppm) [13], menos que três vezes a atual concentração.

Uma interessante observação é que o jovem Sol daquele momento ($\approx 4,0$ bilhões de anos atrás) não era tão brilhante quanto o atual – era em torno de 70% do que é hoje em termos de intensidade luminosa [13–15]. Levando isso em consideração, a primeira metade da existência da Terra deveria ser completamente congelada [13], incluindo os primeiros oceanos [16]. Porém, sabe-se que esse período não foi de gelo, já que evidências de água líquida e de vida nesse período são abundantes [13, 17]. Essa é uma das mais fundamentais questões da paleoclimatologia,¹ chamada de “problema do jovem Sol fraco”, que permanece sem uma resposta definitiva.

Outro grande agente para a evolução da atmosfera terrestre foi a liberação de quantidades massivas de gás oxigênio (O_2) há cerca de 2,32 a 2,4 bilhões de anos [18–20]. Esse acontecimento é chamado de Grande Evento de Oxidação (GOE, do inglês *Great Oxygenation Event*). A explicação frequentemente aceita para o GOE é a fotossíntese das cianobactérias, os primeiros organismos a realizar fotossíntese oxigenada. Porém, alguns modelos que explicam esse evento assumem que cianobactérias já eram abundantes antes do GOE, por isso atribuem o desencadeamento do Grande Evento de Oxigenação à alguma possível mudança física [20].

Todos esses fatores resultaram na atmosfera que conhecemos hoje, cuja composição é marcada por uma predominância de nitrogênio e oxigênio, além de outros gases em menores proporções.

¹Paleoclimatologia é um campo de estudo que busca entender as variações climáticas ao longo da história do planeta Terra.

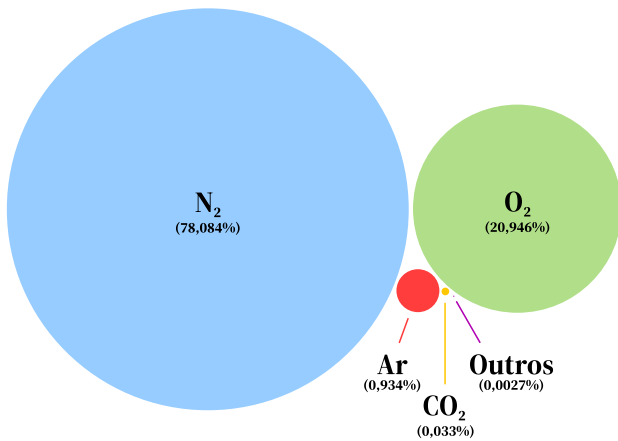


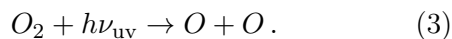
Figura 1: Constituintes atmosféricos não variáveis, isto é, que variam pouco em curtos períodos de tempo geológico, do planeta Terra. Dados da Ref. [22].

2.2 Composição atual

Atualmente, a atmosfera terrestre é dominada pelos gases nitrogênio N_2 (78%) e oxigênio O_2 (21%) (ver Figura 1). Observando essa proporção, pode-se afirmar que a pressão atmosférica é regulada essencialmente pelo N_2 [21].

2.2.1 Oxigênio

Em uma perspectiva biológica, a alta fração de gás oxigênio viabiliza a respiração aeróbica dos três domínios da vida (Figura 2) e promove a formação da camada de ozônio (O_3). A camada de O_3 é formada a partir das reações de Chapman [23], onde a incidência de radiação ultravioleta em moléculas de O_2 e, conseqüentemente, a quebra do O_2 em dois átomos de oxigênio, tal como a reação



Assim, o ozônio é formado a partir de uma reação de recombinação ternária [24,25], que pode ser dividida em dois passos para fins didáticos. No primeiro passo, há a obtenção da molécula metaestável O_3^* [26],



O segundo passo consiste na estabilização da molécula a partir da colisão dela com um elemento M [26],

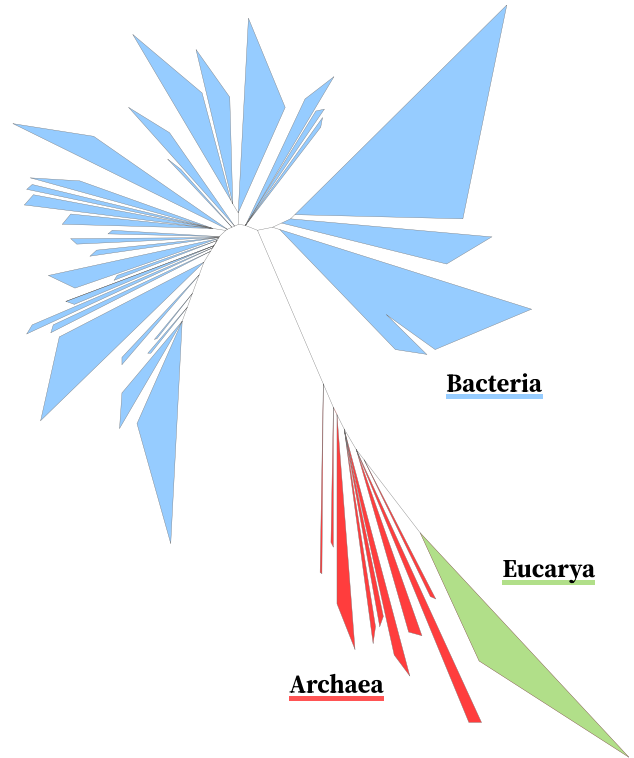
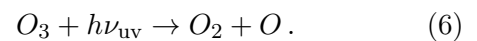


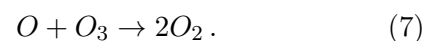
Figura 2: O sistema dos três domínios é um sistema de classificação que agrupa a vida em três grandes grupos: Bacteria (azul), Archaea (vermelho) e Eucarya (verde). Esse sistema foi proposto por Carl Woese (1928–2012), Otto Kandler (1920–2017) e Mark Wheelis em 1990 [27]. Embora amplamente utilizado, um modelo alternativo baseado em evidências filogenômicas modernas, no qual os eucariotos surgiriam de dentro de certas linhagens de Archaea (sistema dos dois domínios), tem ganhado apoio. A figura apresenta uma representação esquemática da filogenia universal, onde é interessante notar a proximidade que Eucarya tem com Archaea. O comprimento dos ramos indica distância genética relativa. Adaptado de [28,29].

Geralmente, M corresponde a N_2 ou O_2 [25], também podendo ser argônio (Ar) [26].

No mecanismo completo de Chapman, a formação do ozônio é contrabalançada por processos de destruição. O O_3 pode ser fotodissociado pela radiação ultravioleta,



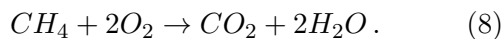
Além disso, pode ser removido por reações entre oxigênio atômico e ozônio,



Entre as funções da camada de ozônio, uma das mais importantes é de proteger os organismos da ação danosa da radiação ultravioleta (especialmente o dano ao DNA). O O_3 absorve toda a

radiação UVC, 90% da radiação UVB e pouquíssimo da radiação UVA [30–32]. Estimativas indicam que a cada redução de 1% do nível de ozônio, há aumento de 1–2% da penetração de UVB na superfície da Terra [32].

O acúmulo de O_2 na atmosfera tornou possível a formação da camada de ozônio (O_3), atenuando a irradiação ultravioleta em baixas altitudes. Isso somado à maior disponibilidade de oxigênio molecular intensificou a remoção de carbono da atmosfera a partir da oxidação de metano (CH_4) [5], conforme a reação



2.2.2 Nitrogênio

O nitrogênio é o principal constituinte da atmosfera da Terra desde o período Arqueano [33–35], embora sua disponibilidade fosse ligeiramente menor no passado quando comparamos com a presente abundância [11].

A concentração de N_2 revela características planetárias únicas. A Terra é o único planeta rochoso do Sistema Solar que tem o nitrogênio como principal gás atmosférico [36]. Além disso, a combinação de N_2 e O_2 em uma só atmosfera é única em todo Sistema Solar. Esses fatores estão intimamente ligados à existência de vida aeróbica [36, 37], isto é, organismos que podem usar o oxigênio em sua respiração, como a maioria dos animais e plantas, além de muitas bactérias, fungos e arqueias.

O nitrogênio é um elemento essencial para todos os seres vivos conhecidos. Ele é componente de aminoácidos, nucleotídeos, ATP,² entre outros. Porém, o N_2 atmosférico por si só não configura uma bioassinatura,³ já que é um gás inerte. Apesar disso, uma atmosfera dominada por N_2 combinada com presença de O_2 pode ser interpretada uma geo-bioassinatura para exoplanetas similares à Terra [35–37].

Adicionalmente, a grande quantidade de N_2 da atmosfera da Terra contribui para a regulação da

²Trifosfato de adenosina (ATP), muitas vezes chamada de “moeda energética das células”, armazena e transporta energia em suas ligações químicas para realização das atividades celulares.

³Uma bioassinatura é qualquer substância, elemento, isótopo ou molécula que sugira a presença de vida, passada ou presente, em um planeta ou em qualquer outro corpo celeste.

temperatura e pressão atmosférica, favorecendo a existência de água líquida na superfície do planeta [21]. Isso se dá a partir de um fenômeno chamado de *pressure broadening* (alargamento por pressão) [21, 38]. Como há uma densa quantidade de N_2 , ocorrem muitas colisões entre moléculas de N_2 e CO_2 e entre moléculas de N_2 e CH_4 . Isso gera perturbação nas linhas de absorção de CO_2 e CH_4 [21] (o efeito ocorre entre outras moléculas, sendo essas duas as principais), ampliando o perfil de absorção dessas moléculas. Isso resulta em maior absorção de radiação e maior captura de calor, aumentando o efeito estufa [38].

A origem do nitrogênio da atmosfera continua incerta [21, 36], mas há possibilidade do N_2 ter surgido da nebulosa solar [36]. No entanto, curiosamente, é possível que cerca de 5–10% do nitrogênio atual da Terra tenha chegado a partir de cometas [39].

3 Atmosfera de Marte

3.1 Composição atual

Como Terra e Marte se formaram de maneira similar, ao mesmo tempo e na mesma região da nebulosa solar [40], traçar comparações é inevitável (p. ex. Figura 3). Assim como a atmosfera da Terra primitiva, a atmosfera atual de Marte é principalmente constituída por CO_2 (ver Figura 4 e Tabela 1).

Tabela 1: Concentração de H_2O na atmosfera de Marte disposta em médias anuais, com exceção de ***, que mostra variações sazonais, expondo a grande variabilidade desse componente. * = média anual para latitude norte; ** = média anual para latitude sul. Concentrações dadas em pr- μm (partes por milhão em volume micrométrico).

| Componente | Concentração | Referência |
|------------|-------------------------------|------------|
| H_2O | 12–17 pr- μm | [41] |
| | 16–22 pr- μm^* | [42] |
| | 8–10 pr- μm^{**} | [42] |
| | 0–100 pr- μm^{***} | [42] |

Enquanto em nosso planeta o CO_2 é continuamente convertido em carbonato de cálcio ou de magnésio e armazenado na crosta (como nas re-

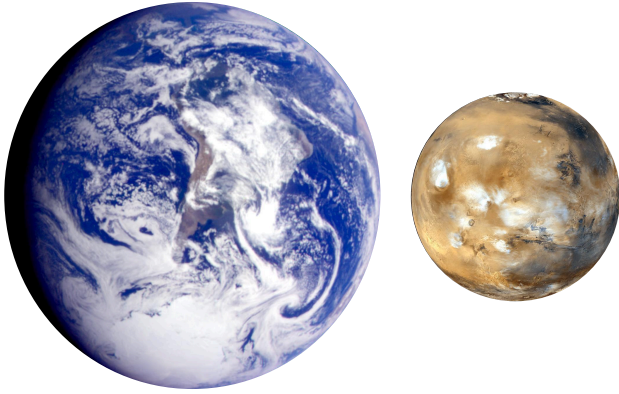


Figura 3: Terra e Marte lado a lado para melhor compreensão dos tamanhos relativos dos dois planetas. Imagem original: NASA/JPL-Caltech. Imagem modificada pelos autores: fundo removido e planetas ligeiramente aproximados.

ações (1) e (2)), em Marte a atual falta de água líquida superficial e a atividade tectônica limitada [43–45] interromperam esse processo.

A atmosfera de Marte é fina, envolve uma superfície seca [54–56] e tem pressão média equivalente a 0,6% da terrestre [56]. A atmosfera marciana possui características únicas. Marte apresenta o dióxido de carbono como principal constituinte atmosférico. O CO_2 está condensado nos polos do planeta [57] e na porção média da atmosfera em forma de nuvens de gelo [58, 59]. Esses fenômenos ilustram traços singulares do planeta.

3.2 H_2O e perda atmosférica

As evidências de água líquida no passado (como minerais hidratados, possíveis leitos de rios e outras evidências geológicas [60–64]) podem indicar que Marte primitiva já reuniu condições para a origem da vida, semelhantemente à Terra. Porém, a atual escassez de nitrogênio e nitratos em Marte [65], componentes essenciais para a vida que conhecemos, compromete significativamente a chance de existência de vida.

Além disso, atualmente é improvável existir água líquida duradoura na superfície de Marte devido à baixa pressão atmosférica e temperatura [66–70], ocasionada por perdas atmosféricas, que foram turbinadas pela falta de um campo magnético global [54, 71–73]. Tais características correspondem a um fator relevante para a inabitabilidade. Para se ter ideia da perda da atmosfera marciana, atualmente a quantidade de

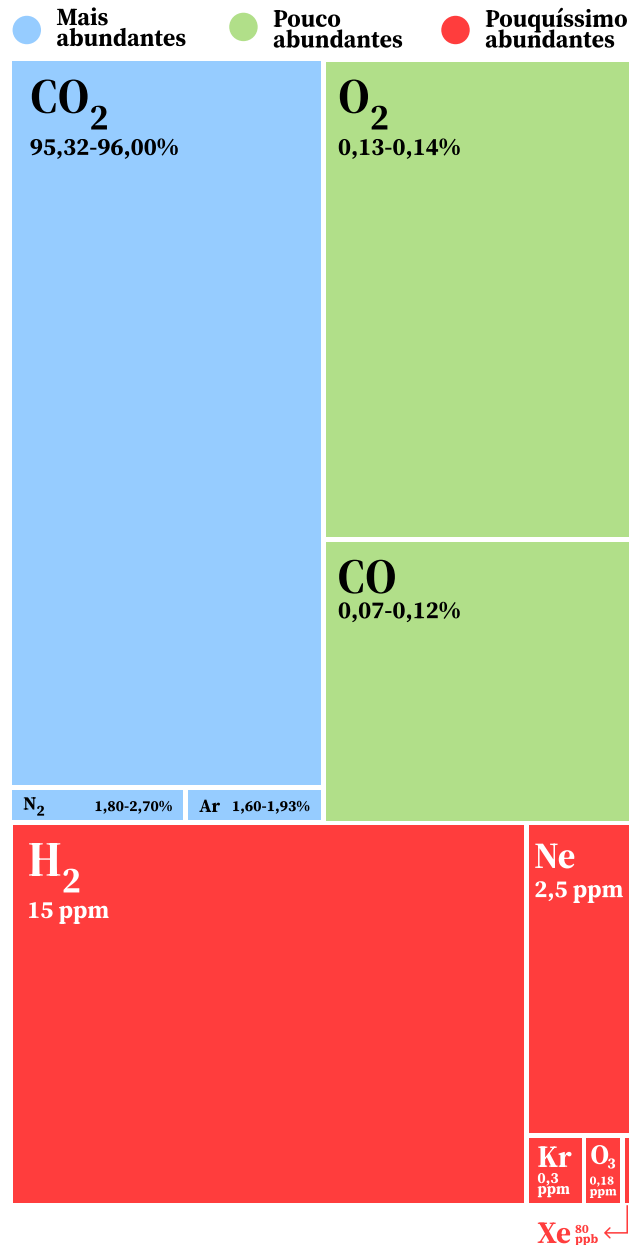


Figura 4: Concentração dos gases que constituem a atmosfera marciana. A abundância de algumas espécies varia significativamente com a estação e região, como O_2 e O_3 . Ainda não há consenso se o metano (CH_4) tem origem geológica ou biológica. Concentrações dadas em porcentagem, ppm (partículas por milhão), ppb (partículas por bilhão). Dados de [46–53].

hidrogênio e oxigênio perdida é equivalente a 2–3 kg por segundo [54]. Essa taxa possivelmente foi maior no passado, devido a uma maior atividade solar [54]. Ao longo de 4,5 bilhões de anos, a perda atmosférica marciana possivelmente removeu uma quantidade de H e O equivalente a uma camada global de água de 23 metros [54]. Estudos isotópicos indicam que, devido ao enriquecimento

da razão deutério/hidrogênio (D/H), Marte perdeu, no mínimo, 80-85% da água original para o espaço [71, 74].

3.3 Tipo de vida marciana

Se organismos existem ou existiram em Marte, é mais provável que compartilhem características bioquímicas semelhantes às da vida terrestre [75]. Isso se dá pelas semelhanças entre as histórias geológicas dos dois planetas, como as evidências de água (abordadas na seção anterior) e a composição atmosférica de Marte (rica em CO_2 , semelhante à Terra primitiva).

Apesar da ficção científica explorar formas de vida diferentes, como a famosa vida baseada em silício, a forma de vida mais plausível para Marte é a baseada em carbono, assim como temos no planeta Terra. O carbono forma ligações versáteis, duradouras e estáveis, essenciais para construir moléculas complexas, como proteínas e ácidos nucleicos [76, 77]. O silício, por outro lado, tem dificuldade em gerar polímeros estáveis,⁴ como proteínas, em ambientes aquosos, um obstáculo fundamental em um planeta onde a água possivelmente fluiu no passado. Ou seja, se a vida um dia emergiu em Marte, é esperado que ela tenha seguido um caminho similar ao da vida terrestre, explorando a água como solvente.

3.4 Altas taxas de radiação

Todos os corpos do Sistema Solar são sujeitos à influência de radiação externa. A fina atmosfera marciana, com pressão equivalente a menos que 1% da pressão da atmosfera terrestre, e a falta de um campo magnético global para desviar partículas energeticamente carregadas (prótons, por exemplo) [78] são os principais fatores que influenciam a taxa de irradiação marciana. A irradiação de Marte é complexa, já que envolve fontes múltiplas, como a radiação cósmica galáctica (GCR, do inglês *galactic cosmic radiation*) e seus produtos secundários resultados da interação dela com constituintes da atmosfera e do solo [], como nêutrons e radiação gama [80]. Além da GCR, partículas energéticas solares (SEP, do

inglês *solar energetic particles*) também atingem Marte [80], apesar de serem eventos esporádicos. A GCR é altamente energética e é composta principalmente por núcleos totalmente ionizados, dos quais 85–90% são prótons [81]. SEPs também são majoritariamente prótons [82–84].

A dose anual média de irradiação natural na Terra é de 2,4 mSv (reportado por UNSCEAR).⁵ Em Marte, a dose média está entre 223 e 232 mSv/ano [, 80], ou seja, quase 100 maior que na Terra. A 3 metros de profundidade, a dose de Marte diminui para $\approx 2,9$ mSv/ano, aproximando-se muito da média terrestre. Dessa forma, faz-se comparável à áreas de baixo risco para humanos [85], sugerindo que ecossistemas subsuperficiais poderiam teoricamente existir.

Como Marte não dispõe de uma camada de ozônio significativa, além de possuir atmosfera rarefeita, há um ambiente de elevada radiação ultravioleta (UV) (Tabela 2). Esse tipo de radiação é conhecido por degradar moléculas orgânicas, como o DNA, e inibir fotossíntese em plantas e em microrganismos. Grande parte da vida da Terra possui mecanismos para lidar com UVA e com baixos níveis de UVB, já que a camada de O_3 da Terra não absorve UVA e absorve 90% da radiação UVB. Contudo, esses mecanismos de defesa não conseguem lidar com a grande quantidade de UV que ocorre em Marte [86].

Tabela 2: Níveis médios de UV em um ângulo zenital 0° , isto é, Sol a pino. Valores expressos em potência por área (W/m^2) para as faixas UVC (200–280 nm), UVB (280–315 nm) e UVA (315–400 nm). A ausência de camada de ozônio em Marte resulta em exposição direta à radiação UVC, o que não ocorre na Terra. Adaptado de [86].

| Radiação UV na superfície (W/m^2) | Terra | Marte |
|---------------------------------------|-------------|-------|
| UVC (200-280 nm) | ≈ 0 | 3,4 |
| UVB (280-315 nm) | 2,0 | 7,9 |
| UVA (315-400 nm) | 56,8 | 26,6 |

A alta concentração de CO_2 na atmosfera marciana absorve radiações abaixo de 190 nm [87].

⁵O milisievert (mSv) é uma unidade de medida da dose de radiação absorvida pelo corpo e que pode afetar a saúde. Essa medida pode ser definida como a probabilidade de causar câncer induzido por radiação e danos genéticos.

⁴Polímeros são estruturas formadas por macromoléculas que, por sua vez, são formadas pela união de inúmeras unidades menores, chamadas monômeros. O policloreto de vinila (PVC) e a celulose são exemplos de polímeros.

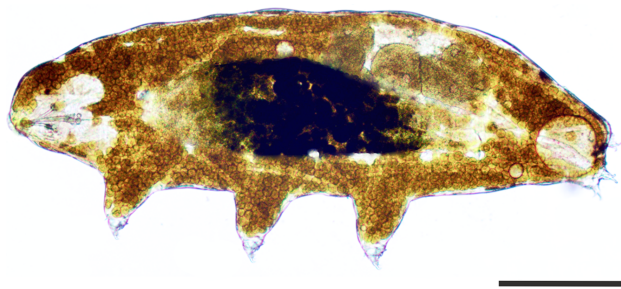


Figura 5: Imagem de microscopia óptica do tardígrado *Richtersius coronifer*. Imagem modificada pelos autores: legenda sobreposta removida. Barra de escala = 100 μm . Crédito da imagem: Halberg, Jørgensen e Møbjerg, 2013 [88].

Porém a ausência de camada de ozônio faz com que UVC e UVB atinjam a superfície de Marte intensamente. Cálculos teóricos mostram que a degradação de DNA é cerca de 900 vezes maior na superfície de Marte do que na superfície da Terra [86], e o maior responsável por essa diferença é a radiação UVC, ainda que a UVB contribua significativamente.

A sobrevivência e resistência de organismos terrestres em ambientes extremos propõe pistas sobre os limites da habitabilidade em ambientes como Marte. Tardígrados estão entre os seres mais resistentes à radiação [–]. Jönsson et al. [–] fizeram um trabalho com *Richtersius coronifer* (Figura 5) e *Milnesium tardigradum*, onde enviaram essas espécies de Tardigrada para órbita baixa da Terra (258-281 km acima do nível do mar) durante 10 dias e, conseqüentemente, expuseram ao vácuo e à radiação UV_{all} (116,5-400 nm, abrangendo do UVC ao UVA, presentes em Marte). Já se sabe que tardígrados são altamente resistentes ao vácuo [93], de maneira que não afeta a eclosão de seus ovos [–]. Os resultados foram que a mortalidade em *R. coronifer* foi de 100% e em *M. tardigradum*, próximo de 100%. Além disso, ovos expostos diretamente à radiação ultravioleta não eclodiram.

Para observar somente o efeito da radiação UV marciana em bactérias, Mancinelli e Klovstad [94] conduziram um estudo com esporos de *Bacillus subtilis*. Os resultados demonstraram que 90% dos esporos expostos a uma dose de UV equivalente aos comprimentos de onda mais críticos de Marte (220–254 nm), ou seja, UVC, foram eliminados em minutos quando desprotegidos. No entanto, quando cobertos por uma camada de 1

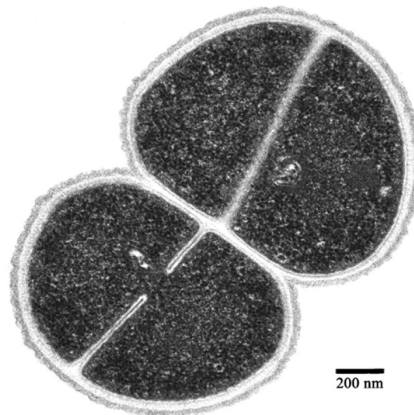


Figura 6: Imagem de microscopia eletrônica de transmissão de uma seção da bactéria *Deinococcus radiodurans* em forma tetrade, ou seja, organizada em grupos de quatro células. Crédito da imagem: Rothfuss et al., 2006 [99].

milímetro de poeira simulada de Marte, os esporos foram completamente protegidos da radiação.

Esses resultados reforçam a hipótese de que a vida em Marte – se já existiu ou existe – estaria restrita a nichos subsuperficiais ou a locais protegidos por camadas de poeira e solo. Ainda é incerto se o efeito cumulativo de UV, SEPs e GCRs é capaz de esterilizar camadas mais profundas.

Outra pesquisa relevante foi desenvolvida, dessa vez por Pavlov et al. [95] com a bactéria *Deinococcus radiodurans* (Figura 6), considerada a mais resistente conhecida, altamente riorresistente, principalmente contra radiação ultravioleta [96–98]. Os autores observaram como diferentes fontes de radiação (SEP, UV, GCR e a radiação natural do solo marciano) interagem com modelo de *D. radiodurans* dormente. Os resultados são listados na Tabela 3.

A fim de facilitar o entendimento das camadas citadas na Tabela 3, é possível obter a profundidade de cada camada em centímetros. Considerando a densidade do solo marciano nos primeiros 40 centímetros sendo $\approx 1,2 \text{ g/cm}^3$ [100], temos que a camada superficial corresponde de 0 a $\approx 16,7$ centímetros. Entre profundidades maiores, podemos adotar uma média de $\approx 1,5 \text{ g/cm}^3$ [101]. Dessa forma, a camada intermediária seria de $\approx 16,7$ centímetros a $\approx 4,7$ metros, enquanto a camada profunda $\gtrsim 4,7$ metros.

A análise dos dados da Tabela 3 fortalece a ideia da superfície de Marte ser extremamente hostil à sobrevivência de microrganismos, mesmo os mais resistentes, como *D. radiodurans*. Por ou-

Tabela 3: Tempos estimados para a esterilização do solo marciano em função da profundidade e da fonte de radiação. Na camada superficial (até 20 g/cm²), a ação combinada de SEP e radiação UV esteriliza microrganismos em estado de dormência em menos de 30 mil anos. Na camada intermediária (20–700 g/cm²), o GCR resulta na inativação em menos de 2 milhões de anos. Já na camada profunda (> 700 g/cm²), a radioatividade natural leva aproximadamente 40 milhões de anos para esterilizar o solo. Esses valores, baseados no modelo de *Deinococcus radiodurans*, podem variar conforme a densidade do solo marciano. Dados extraídos de [95].

| Nível da camada | Fonte | Esterilização em |
|-----------------|----------|----------------------|
| Superficial | SEP + UV | < 30 mil anos |
| Intermediária | GCR | < 2 milhões de anos |
| Profunda | Natural | ≈ 40 milhões de anos |

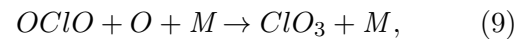
tro lado, na camada profunda, a radiação gerada pela radioatividade natural do solo leva aproximadamente 40 milhões de anos para esterilizar o ambiente. Esse tempo prolongado sugere que, em profundidades maiores, onde a radiação é substancialmente atenuada, podem existir condições mais favoráveis à preservação de bioassinaturas ou mesmo à manutenção de formas de vida passadas.

3.5 Oxidação do solo e radiação degradam moléculas orgânicas

Outro fator limitante é a oxidação do solo marciano que atua como um degradante de moléculas orgânicas, revelando mais um desafio do ambiente. Isso ocorre devido, principalmente, aos percloratos (ClO_4^- , potentes agentes oxidantes) e aos óxidos de ferro (Fe^{3+}) presentes no solo [102–105]. Além disso, como exposto anteriormente, a ausência de um campo magnético global e a presença de fina atmosfera permite que uma alta quantidade de radiação penetre em Marte, capaz de degradar moléculas orgânicas [106]. Esses são os fatores responsáveis pela grande falta de bioassinaturas no planeta. A carência de moléculas orgânicas na superfície do solo marciano (ver Tabela 4) dificulta a formação de aminoá-

cidos, por exemplo. Uma forma de contornar o efeito destrutivo da radiação é coletar amostras subsuperficiais, como pretende a missão ExoMars, planejada para 2028 [107]. Dessa forma, será possível observar precisamente a abundância de moléculas orgânicas. A título de curiosidade, a grande quantidade de Fe^{3+} no solo marciano é responsável pela cor vermelha do planeta.

Resumidamente, uma possível formação dos percloratos é iniciada pelos raios cósmicos galácticos que atingem o solo, conforme proposto por Wilson et al. [108]. Essa radiação quebra compostos que tenham cloro (Cl), gerando óxidos de cloro, como o dióxido de cloro ($OClO$). Esses óxidos gerados são voláteis e leves, por isso, sublimam (sólido → gás), incorporando-se à fina atmosfera marciana. Na atmosfera, usando o $OClO$ como exemplo, o dióxido de cloro reage com átomos de oxigênio e radicais de hidroxila (OH), a saber,



Essas reações exigem um agente estabilizador M , isto é, um terceiro corpo para a reação de associação ser mais eficiente. É possível que M seja o CO_2 , já que é o principal gás de Marte [108]. O produto dessas reações é o ácido perclórico ($HClO_4$), que é estável e precursor dos percloratos. O $HClO_4$ condensa e deposita-se na superfície do planeta, onde, ao longo de milhões de anos, pode originar sais de perclorato que se acumulam no solo [108].

4 Conclusão

A comparação entre as atmosferas da Terra e de Marte evidencia que características como densidade atmosférica, presença de camada de ozônio e existência de campo magnético global são fundamentais para definir a habitabilidade de um planeta. A Terra, com sua atmosfera rica principalmente em nitrogênio (N_2 , 78%) e oxigênio (O_2 , ≈ 21%) nos protege e sustenta a água na forma líquida. Por outro lado, Marte, que apresenta uma atmosfera rarefeita (0,6% da pressão terrestre, resultando em uma grande perda de água), predominantemente composta por dióxido de carbono (CO_2 , ≈ 95%) não protege sua superfície de

Tabela 4: Detecção de moléculas orgânicas e carbono em missões marcianas. A tabela resume os principais resultados, incluindo detecções indiretas de carbono orgânico (inferidas por reanálise de dados das sondas Viking), e moléculas específicas identificadas pelo astromóvel Curiosity (clorobenzeno, dicloroalcanos, tiofenos/aromáticos) e Perseverance (aromáticos via espectroscopia UV-Raman). A ausência de hidrocarbonetos apontada pelas missões Viking e Phoenix deve ser atribuídas a métodos de análise limitados (as duas missões utilizaram experimentos de pirólise). Valores quantitativos são apresentados em partes por milhão (ppm) ou partes por bilhão (ppb). O ExoMars, missão planejada para 2028, tem como objetivo analisar amostras subsuperficiais para evitar partes degradadas por radiação e oxidantes superficiais [107]. Tabela adaptada de [109].

| Missão | Ano | Molécula detectada | Quantidade | Referência |
|--------------|------|----------------------------------|-------------------------------|------------|
| Viking | 1975 | Sem traço de hidrocarbonetos | – | [110, 111] |
| | | Carbono orgânico (inferido) | 0,7–6,5 ppm | [] |
| Curiosity | 2011 | Sem traço de hidrocarbonetos | – | [113] |
| | | Clorobenzeno | 150–300 ppb | [114] |
| | | Dicloroalcanos (C2-C4) | ≤ 70 ppb | [114] |
| Perseverance | 2020 | Tiofenos, aromáticos | Detectados (qualitativamente) | [115] |
| | | Aromáticos (benzeno e naftaleno) | Detectados (qualitativamente) | [116] |

radiações extremamente danosas aos seres vivos. Apesar disso, a possibilidade de vida subsuperficial, onde a radiação é atenuada (2,9 mSv/ano a 3 m de profundidade), em Marte persiste.

A missão ExoMars, liderada pela Agência Espacial Europeia com participação da Agência Espacial Federal Russa, tem previsão para enviar um veículo de exploração espacial para Marte, o astromóvel Rosalind Franklin,⁶ em 2028. O veículo terá capacidade de perfurar o solo em até 2 metros em busca de materiais protegidos de radiação e oxidação [117]. A ExoMars tem como objetivo principal testar algumas hipóteses que foram discutidas ao longo deste texto, como refúgios subsuperficiais e a preservação de bioassinaturas em Marte [107].

Agradecimentos

Os autores agradecem a Victor Hugo Aquino, a Caio Augusto Carvalho e a Denilson Carvalho Resende pela leitura do trabalho e pelas discussões.

⁶Rosalind Franklin (1920–1958) foi uma química britânica cujos estudos de difração de raios X contribuíram significativamente para a compreensão da estrutura do DNA.

Sobre os autores

Gustavo Santos Rodrigues (gustavo.rodrigues@estudante.ufjf.br) é graduando do curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

Anthony Henrique Perucci Mostaro (anthony.perucci@estudante.ufjf.br) é graduando do curso de Licenciatura em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Membro do Grupo de Estudos e Pesquisas em Educação Ambiental (GEA/UFJF), com experiência e interesse na elaboração de materiais educativos.

Referências

- [1] C. Martin, *The invention of atmosphere, Studies in History and Philosophy of Science* **52**, 44 (2015).
- [2] D. Bockelée-Morvan et al., *Cometary Isotopic Measurements, Space Science Reviews* **197**, 47 (2015).
- [3] K. Mandt et al., *Constraints from Comets on the Formation and Volatile Acquisition*

- of the Planets and Satellites, *Space Science Reviews* **197**, 297 (2015).
- [4] C. Hayashi, *Structure of the Solar Nebula, Growth and Decay of Magnetic Fields and Effects of Magnetic and Turbulent Viscosities on the Nebula*, *Progress of Theoretical Physics Supplement* **70**, 35 (1981).
- [5] D. Grassi, *Atmospheric Physics and Atmospheres of Solar-System Bodies*, in *Astrophysics of Exoplanetary Atmospheres: 2nd Advanced School on Exoplanetary Science*, editado por V. Bozza, L. Mancini e A. Sozzetti (Springer International Publishing, Cham, 2018), 135–199.
- [6] M. Barboni et al., *Early formation of the Moon 4.51 billion years ago*, *Science Advances* **3**(1), e1602365 (2017).
- [7] L. Schaefer e B. Fegley, *Chemistry of atmospheres formed during accretion of the Earth and other terrestrial planets*, *Icarus* **208**(1), 438 (2010).
- [8] S. Wilde et al., *Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago*, *Nature* **409**, 175 (2001).
- [9] M. C. Denlinger, *The Origin and Evolution of the Atmospheres of Venus, Earth and Mars*, *Earth, Moon, and Planets* **96**(1), 59 (2005).
- [10] N. H. Sleep e K. Zahnle, *Carbon dioxide cycling and implications for climate on ancient Earth*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **106**(E1), 1373 (2001).
- [11] D. Catling e K. Zahnle, *The Archean atmosphere*, *Science Advances* **6**(9), eaax1420 (2020).
- [12] C. L. Blättler e J. A. Higgins, *Testing Urey’s carbonate–silicate cycle using the calcium isotopic composition of sedimentary carbonates*, *Earth and Planetary Science Letters* **479**, 241 (2017).
- [13] J. F. Kasting, *Faint young Sun redux*, *Nature* **464**, 687 (2010).
- [14] D. O. Gough, *Solar interior structure and luminosity variations*, *Solar Physics* **74**, 21 (1981).
- [15] M. Newman e R. Rood, *Implications of Solar Evolution for the Earth’s Early Atmosphere*, *Science* **198**(4321), 1035 (1977).
- [16] C. Sagan e G. Mullen, *Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures*, *Science* **177**(4043), 52 (1972).
- [17] B. Charnay et al., *Is the faint young Sun problem for Earth Solved?*, *Space Science Reviews* **216**(5), 90 (2020).
- [18] A. Bekker et al., *Dating the rise of atmospheric oxygen*, *Nature* **427**, 117 (2004).
- [19] J. Olejarz et al., *The Great Oxygenation Event as a consequence of ecological dynamics modulated by planetary change*, *Nature Communications* **12**, 3985 (2021).
- [20] J. F. Kasting, *What caused the rise of atmospheric O₂?*, *Chemical Geology* **362**, 13 (2013).
- [21] S. L. Olson et al., *Earth: Atmospheric Evolution of a Habitable Planet*, in *Handbook of Exoplanets*, editado por H. J. Deeg e J. A. Belmonte (Springer International Publishing, Cham, 2018), 1–37.
- [22] H. C. Urey, *The Atmospheres of the Planets*, in *Astrophysics III: The Solar System / Astrophysik III: Das Sonnensystem*, editado por S. Flügge (Springer, Berlin, Heidelberg, 1959), 363–418.
- [23] S. Chapman, XXXV. *On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **10**(64), 369 (1930).
- [24] M. Zauner-Wieczorek, J. Curtius e A. Kürten, *The ion-ion recombination coefficient α : comparison of temperature- and pressure-dependent parameterisations for the troposphere and stratosphere*, *Atmospheric Chemistry and Physics* **22**(18), 12443 (2022).

- [25] M. Mirahmadi et al., *Ozone Formation in Ternary Collisions: Theory and Experiment Reconciled*, [Physical Review Letters](#) **128**(10), 108501 (2022).
- [26] M. Mirahmadi e J. Pérez-Ríos, *Three-body recombination in physical chemistry*, [International Reviews in Physical Chemistry](#) **41**(3-4), 233 (2022).
- [27] C. R. Woese, O. Kandler e M. L. Wheelis, *Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya*, [Proceedings of the National Academy of Sciences](#) **87**(12), 4576 (1990).
- [28] M. Tsurumaki et al., *Importance of Candidate Phyla Radiation (CPR) Bacteria for the Origin of Life*, [Journal of Geography \(Chigaku Zasshi\)](#) **129**(6), 881 (2020).
- [29] L. A. Hug et al., *A new view of the tree of life*, [Nature Microbiology](#) **1**, 16048 (2016).
- [30] F. de Gruijl e J. Leun, *Environment and health: 3. Ozone depletion and ultraviolet radiation*, [Canadian Medical Association Journal](#) **163**(6), 851 (2000).
- [31] F. Sánchez C., *Consideraciones sobre la capa de ozono y su relación con el cáncer de piel*, [Revista Médica de Chile](#) **134**(9), 1185 (2006).
- [32] T. S. Balogh et al., *Proteção à radiação ultravioleta: recursos disponíveis na atualidade em fotoproteção*, [Anais Brasileiros De Dermatologia](#) **86**(4), 732 (2011).
- [33] D. C. Catling et al., *Why O₂ is required by complex life on habitable planets and the concept of planetary "oxygenation time"*, [Astrobiology](#) **5**(3), 415 (2005).
- [34] Y. Zhang e A. Zindler, *Distribution and evolution of carbon and nitrogen in Earth*, [Earth and Planetary Science Letters](#) **117**(3-4), 331 (1993).
- [35] H. Lammer et al., *The Role of N₂ as a Geobiosignature for the Detection and Characterization of Earth-like Habitats*, [Astrobiology](#) **19**(7), 927 (2019).
- [36] L. Spross et al., *Life as the Only Reason for the Existence of N₂-O₂-Dominated Atmospheres*, [Astronomy Reports](#) **65**, 275 (2021).
- [37] E. Schwieterman et al., *Detecting and Constraining N₂ Abundances in Planetary Atmospheres Using Collisional Pairs*, [The Astrophysical Journal](#) **810**(1), 57 (2015).
- [38] C. Goldblatt et al., *Nitrogen-enhanced greenhouse warming on early Earth*, [Nature Geoscience](#) **2**, 891 (2009).
- [39] C. Chen et al., *Late Delivery of Nitrogen to the Earth*, [The Astronomical Journal](#) **157**(2), 80 (2019).
- [40] R. Durham, R. B. Schmunk e J. W. Chamberlain, *Comparative analysis of the atmospheres of early Earth and early Mars*, [Advances in Space Research](#) **9**(6), 139 (1989).
- [41] M. D. Smith, *The annual cycle of water vapor on Mars as observed by the Thermal Emission Spectrometer*, [Journal of Geophysical Research: Planets](#) **107**(E11), 5115 (2002).
- [42] B. M. Jakosky e C. B. Farmer, *The seasonal and global behavior of water vapor in the Mars atmosphere: Complete global results of the Viking Atmospheric Water Detector Experiment*, [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#) **87**(B4), 2999 (1982).
- [43] W.-Y. Zhou et al., *High pressure-temperature phase equilibrium studies on Martian basalts: Implications for the failure of plate tectonics on Mars*, [Earth and Planetary Science Letters](#) **594**, 117751 (2022).
- [44] D. U. Wise, M. P. Golombek e G. E. McGill, *Tectonic evolution of Mars*, [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#) **84**(B14), 7934 (1979).
- [45] M. Zuber, *The crust and mantle of Mars*, [Nature](#) **412**(6843), 220 (2001).
- [46] T. Owen et al., *The composition of the atmosphere at the surface of Mars*, [Journal of Geophysical Research](#) **82**(28), 4635 (1977).

- [47] P. R. Mahaffy et al., *Abundance and Isotopic Composition of Gases in the Martian Atmosphere from the Curiosity Rover*, *Science* **341**(6143), 263 (2013).
- [48] P. Hartogh et al., *Herschel/HIFI observations of Mars: First detection of O₂ at sub-millimetre wavelengths and upper limits on HCl and H₂O₂*, *Astronomy & Astrophysics* **521**, L49 (2010).
- [49] V. A. Krasnopolsky, *Spectroscopic mapping of Mars CO mixing ratio: Detection of north-south asymmetry*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **108**(E2), 5010 (2003).
- [50] M. D. Smith et al., *The climatology of carbon monoxide on Mars as observed by NOMAD nadir-geometry observations*, *Icarus* **362**, 114404 (2021).
- [51] M. D. Smith et al., *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer observations of water vapor and carbon monoxide*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **114**(E2), E00D03 (2009).
- [52] S. Perrier et al., *Global distribution of total ozone on Mars from SPICAM/MEX UV measurements*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **111**(E9), E09S06 (2006).
- [53] V. A. Krasnopolsky e P. D. Feldman, *Detection of Molecular Hydrogen in the Atmosphere of Mars*, *Science* **294**(5548), 1914 (2001).
- [54] B. M. Jakosky et al., *Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time*, *Icarus* **315**, 146 (2018).
- [55] B. Jakosky et al., *The Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) Mission*, *Space Science Reviews* **195**, 3 (2015).
- [56] D. Banfield et al., *The atmosphere of Mars as observed by InSight*, *Nature Geoscience* **13**, 190 (2020).
- [57] S. L. Hess et al., *Meteorological results from the surface of Mars: Viking 1 and 2*, *Journal of Geophysical Research* **82**(28), 4559 (1977).
- [58] R. T. Clancy e B. J. Sandor, *CO₂ ice clouds in the upper atmosphere of Mars*, *Geophysical Research Letters* **25**(4), 489 (1998).
- [59] R. M. Haberle et al. (eds.), *The Atmosphere and Climate of Mars*, Cambridge Planetary Science (Cambridge University Press, Cambridge, 2017).
- [60] M. C. Malin e K. S. Edgett, *Evidence for Persistent Flow and Aqueous Sedimentation on Early Mars*, *Science* **302**(5652), 1931 (2003).
- [61] J. F. Mustard et al., *Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument*, *Nature* **454**(7202), 305 (2008).
- [62] L. Ojha et al., *Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars*, *Nature Geoscience* **8**(11), 829 (2015).
- [63] V. R. Baker, *Geomorphological Evidence for Water on Mars*, *Elements* **2**(3), 139 (2006).
- [64] M. Nazari-Sharabian et al., *Water on Mars—A Literature Review*, *Galaxies* **8**(2), 40 (2020).
- [65] J. C. Stern et al., *The nitrate/(per)chlorate relationship on Mars*, *Geophysical Research Letters* **44**(6), 2643 (2017).
- [66] P. Read, S. Lewis e D. Mulholland, *The physics of Martian weather and climate: A review*, *Reports on Progress in Physics* **78**(12), 125901 (2015).
- [67] M. H. Hecht, *Metastability of Liquid Water on Mars*, *Icarus* **156**(2), 373 (2002).
- [68] R. M. Haberle et al., *On the possibility of liquid water on present-day Mars*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **106**(E10), 23317 (2001).
- [69] M. T. Mellon e R. J. Phillips, *Recent gullies on Mars and the source of liquid water*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **106**(E10), 23165 (2001).

- [70] A. P. Ingersoll, *Mars: Occurrence of Liquid Water*, *Science* **168**(3934), 972 (1970).
- [71] B. M. Jakosky, *Atmospheric Loss to Space and the History of Water on Mars*, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **49**, 71 (2021).
- [72] H. Lammer et al., *Outgassing History and Escape of the Martian Atmosphere and Water Inventory*, *Space Science Reviews* **174**, 113 (2013).
- [73] S. Barabash et al., *Martian Atmospheric Erosion Rates*, *Science* **315**(5811), 501 (2007).
- [74] T. Owen et al., *Deuterium on Mars: The Abundance of HDO and the Value of D/H*, *Science* **240**(4860), 1767 (1988).
- [75] N. R. Pace, *The universal nature of biochemistry*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **98**(3), 805 (2001).
- [76] S. A. Benner, *Defining Life*, *Astrobiology* **10**(10), 1021 (2010).
- [77] R. Gobato et al., *The Possibility of Silicon-Based Life*, *Bulletin of Pure and Applied Sciences-Chemistry* **41**(1), 52 (2022).
- [78] M. H. Acuña et al., *Magnetic Field and Plasma Observations at Mars: Initial Results of the Mars Global Surveyor Mission*, *Science* **279**(5357), 1676 (1998).
- [79] D. Matthiä et al., *The radiation environment on the surface of Mars – Summary of model calculations and comparison to RAD data*, *Life Sciences in Space Research* **14**, 18 (2017).
- [80] D. M. Hassler et al., *Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover*, *Science* **343**(6169), 1244797 (2014).
- [81] J. A. Simpson, *Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays*, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **33**, 323 (1983).
- [82] H. V. Cane, I. G. Richardson e T. T. von Rosenvinge, *The Properties of Cycle 23 Solar Energetic Proton Events*, *AIP Conference Proceedings* **1216**(1), 687 (2010).
- [83] E. W. Cliver, *Solar energetic particles: Acceleration and transport*, *AIP Conference Proceedings* **516**(1), 103 (2000).
- [84] R. Mewaldt et al., *Energy Spectra, Composition, and Other Properties of Ground-Level Events During Solar Cycle 23*, *Space Science Reviews* **171**(1-4), 97 (2012).
- [85] J. H. Hendry et al., *Human exposure to high natural background radiation: what can it teach us about radiation risks?*, *Journal of Radiological Protection* **29**(2A), A29 (2009).
- [86] C. S. Cockell e A. L. Andrady, *The Martian and extraterrestrial UV radiation environment–1. Biological and closed-loop ecosystem considerations*, *Acta Astronautica* **44**(1), 53 (1999).
- [87] W. R. Kuhn e S. K. Atreya, *Solar radiation incident on the Martian surface*, *Journal of Molecular Evolution* **14**(1-3), 57 (1979).
- [88] K. A. Halberg, A. Jørgensen e N. Møbjerg, *Desiccation Tolerance in the Tardigrade *Richtersius coronifer* Relies on Muscle Mediated Structural Reorganization*, *PLoS ONE* **8**(12), e85091 (2013).
- [89] K. I. Jönsson, M. Harms-Ringdahl e J. Torrudd, *Radiation tolerance in the eutardigrade *Richtersius coronifer**, *International Journal of Radiation Biology* **81**(9), 649 (2005).
- [90] D. D. Horikawa et al., *Radiation tolerance in the tardigrade *Milnesium tardigradum**, *International Journal of Radiation Biology* **82**(12), 843 (2006).
- [91] K. I. Jönsson, *Radiation Tolerance in Tardigrades: Current Knowledge and Potential Applications in Medicine*, *Cancers* **11**(9), 1333 (2019).
- [92] K. I. Jönsson et al., *Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit*, *Current Biology* **18**(17), R729 (2008).

- [93] D. Persson et al., *Extreme stress tolerance in tardigrades: Surviving space conditions in low Earth orbit*, *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* **49**, 90 (2011).
- [94] R. L. Mancinelli e M. Klovstad, *Martian soil and UV radiation: Microbial viability assessment on spacecraft surfaces*, *Planetary and Space Science* **48**(11), 1093 (2000).
- [95] A. K. Pavlov, A. V. Blinov e A. N. Konstantinov, *Sterilization of Martian surface by cosmic radiation*, *Planetary and Space Science* **50**(7), 669 (2002).
- [96] J. R. Battista, A. M. Earl e M.-J. Park, *Why is Deinococcus radiodurans so resistant to ionizing radiation?*, *Trends in Microbiology* **7**(9), 362 (1999).
- [97] J. R. Battista, *Against All Odds: The Survival Strategies of Deinococcus radiodurans*, *Annual Review of Microbiology* **51**, 203 (1997).
- [98] K. S. Makarova et al., *Genome of the Extremely Radiation-Resistant Bacterium Deinococcus radiodurans Viewed from the Perspective of Comparative Genomics*, *Microbiology and Molecular Biology Reviews* **65**(1), 44 (2001).
- [99] H. Rothfuss et al., *Involvement of the S-layer proteins Hpi and SlpA in the maintenance of cell envelope integrity in Deinococcus radiodurans R1*, *Microbiology* **152**(9), 2779 (2006).
- [100] M. Grott et al., *Thermal Conductivity of the Martian Soil at the InSight Landing Site From HP3 Active Heating Experiments*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **126**(7), e2021JE006861 (2021).
- [101] T. Spohn et al., *The InSight-HP3 mole on Mars: Lessons learned from attempts to penetrate to depth in the Martian soil*, *Advances in Space Research* **69**(8), 3140 (2022).
- [102] D. Hunten, *Possible oxidant sources in the atmosphere and surface of Mars*, *Journal of Molecular Evolution* **14**, 71 (1980).
- [103] J. Lasne et al., *Oxidants at the Surface of Mars: A Review in Light of Recent Exploration Results*, *Astrobiology* **16**(12), 977 (2016).
- [104] R. C. Quinn et al., *The oxidation-reduction potential of aqueous soil solutions at the Mars Phoenix landing site*, *Geophysical Research Letters* **38**(14), L14202 (2011).
- [105] M. H. Hecht et al., *Detection of Perchlorate and the Soluble Chemistry of Martian Soil at the Phoenix Lander Site*, *Science* **325**(5936), 64 (2009).
- [106] A. A. Pavlov et al., *Degradation of the organic molecules in the shallow subsurface of Mars due to irradiation by cosmic rays*, *Geophysical Research Letters* **39**(13), L13202 (2012).
- [107] W. Goetz et al., *MOMA: The challenge to search for organics and biosignatures on Mars*, *International Journal of Astrobiology* **15**(3), 239 (2016).
- [108] E. H. Wilson et al., *Perchlorate formation on Mars through surface radiolysis-initiated atmospheric chemistry: A potential mechanism*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **121**(8), 1472 (2016).
- [109] A. Ansari, *Detection of organic matter on Mars, results from various Mars missions, challenges, and future strategy: A review*, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **10**, 1075052 (2023).
- [110] K. Biemann et al., *The search for organic substances and inorganic volatile compounds in the surface of Mars*, *Journal of Geophysical Research* **82**(28), 4641 (1977).
- [111] P. Mazur et al., *Biological implications of the Viking mission to Mars*, *Space Science Reviews* **22**(1), 3 (1978).
- [112] R. Navarro-González et al., *Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **116**(E8), E12010 (2010).

- [113] H. V. Lauer et al., *Thermal and Evolved Gas Analysis of Magnesium Perchlorate: Implications for Perchlorates in Soils at the Mars Phoenix Landing Site*, 40th Lunar and Planetary Science Conference 2196 (2009).
- [114] C. Freissinet et al., *Organic molecules in the Sheepbed Mudstone, Gale Crater, Mars*, *Journal of Geophysical Research: Planets* **120**(3), 495 (2015).
- [115] J. L. Eigenbrode et al., *Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars*, *Science* **360**(6393), 1096 (2018).
- [116] E. L. Scheller et al., *Aqueous alteration processes in Jezero crater, Mars—implications for organic geochemistry*, *Science* **378**(6624), 1105 (2022).
- [117] F. Altieri et al., *Investigating the Oxia Platum subsurface with the ExoMars rover and drill*, *Advances in Space Research* **71**(11), 4895 (2023).