
ASTROBIOLOGIA: DESCOBRINDO NOVOS PLANETAS

AS ASTROCIENTISTAS

Beatriz B. Siffert

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Duque de Caxias,
Duque de Caxias, 25.240-005, Brasil,
beatriz@caxias.ufrj.br

RESUMO

Neste trabalho apresentaremos uma breve revisão sobre a procura por planetas fora do Sistema Solar, os chamados “exoplanetas”, no contexto da astrobiologia. Estudaremos o conceito de habitabilidade e definiremos a zona habitável estelar, região em torno de uma estrela na qual é possível ter água no estado líquido na superfície de um planeta rochoso. Comentaremos sobre os principais métodos de detecção de exoplanetas, sobre as características daqueles que já foram descobertos e apresentaremos exemplos de exoplanetas com particular interesse astrobiológico. Finalizaremos descrevendo brevemente as evidências da presença de vida, as chamadas *bioassinaturas*, atualmente consideradas mais promissoras e as missões presentes e futuras com maior potencial para novas descobertas na área da astrobiologia.

Palavras-chave astrobiologia, exoplanetas, habitabilidade

1 Introdução

Atualmente, conhecemos quase 5000 planetas fora do Sistema Solar, os chamados “exoplanetas”, distribuídos em mais de 3600 sistemas planetários. A descoberta dos primeiros exoplanetas ocorreu em 1992, com a detecção de dois exoplanetas orbitando o pulsar PSR 1257+12 [1]. Em 1995, foi descoberto o primeiro exoplaneta orbitando uma estrela do tipo solar, 51 Pegasi [2]. Essa descoberta rendeu aos pesquisadores o Prêmio Nobel de física em 2019. Desde então, a taxa de descobertas de exoplanetas vem crescendo com o aperfeiçoamento da instrumentação e das técnicas de detecção e, recentemente, foi anunciada a descoberta do primeiro candidato a exoplaneta fora da Via Láctea [3].

A primeira técnica a ter um grande sucesso na identificação de exoplanetas foi a detecção nos espectros estelares de variações nas velocidades radiais das estrelas hospedeiras. Atualmente, a técnica de detecção de exoplanetas mais bem sucedida é a de trânsito planetário, utilizada no passado pela missão *Kepler* [4], que revolucionou a área, com a descoberta de milhares de exoplanetas, e atualmente pela missão TESS (*The Transiting Exoplanet Survey Satellite*) [5], lançada em 2018, ambas da agência espacial americana, a NASA. Existem também outras técnicas, como as de imageamento direto e microlenteamento gravitacional que, embora tenham produzido poucos resultados, permanecem promissoras.

A aplicação desse arsenal de técnicas permitiu a identificação de exoplanetas com uma grande gama de tamanhos, massas e órbitas, em torno de diferentes tipos de estrelas. De acordo com a base de dados exoplanet.eu, estes exoplanetas têm raios variando entre $0,3 R_{\oplus}$ até $\sim 6,5$ vezes o raio de Júpiter, e massas de $0,02 M_{\oplus}$ até 67 vezes a massa de Júpiter. São encontrados a diferentes distâncias de suas estrelas hospedeiras, desde $0,0026 \text{ UA}$ ¹ até mais de 6000 UA.

No futuro próximo, com o lançamento de novas missões espaciais e o uso de instrumentação cada vez mais precisa, será possível a detecção de planetas cada vez menores e sua melhor caracterização.

Neste artigo, apresentaremos uma breve revisão sobre exoplanetas e habitabilidade, do ponto de vista de físicos e astrônomos.

¹A unidade astronômica (UA) equivale à distância média entre a Terra e o Sol, com $1 \text{ UA} = 149597870700 \text{ m}$

2 O conceito de habitabilidade

O atual conceito de habitabilidade planetária se baseia no fato de que a vida, nos moldes em que a conhecemos, está intimamente relacionada à existência de água no estado líquido. Na Terra, a água funciona como um solvente para a troca e o transporte de substâncias no interior dos seres vivos e entre eles e o ambiente externo. A molécula de água é composta por dois elementos extremamente abundantes, visto que o hidrogênio corresponde a mais de 70% da matéria bariônica conhecida, e o oxigênio é o terceiro elemento mais abundante no Universo. Assim, é razoável imaginar que água seja de fato uma molécula presente em muitos outros planetas.

A chamada zona habitável (ZH) estelar é classicamente definida como a região em torno de um estrela na qual um corpo rochoso como a Terra pode sustentar água no estado líquido em sua superfície. Planetas e luas que estejam próximos demais da estrela seriam quentes demais para sustentar água líquida superficial e aqueles que estejam distantes demais da estrela seriam frios demais para tal. Notem que essa definição pode ser considerada limitada, porém é um ótimo ponto de partida, com o conhecimento que temos atualmente, para procuras em larga escala. Além disso, podemos sempre ampliar nossas buscas quando necessário.

Notem que, ao limitarmos a definição à existência de água líquida na superfície de um corpo rochoso, não estamos considerando a possibilidade da existência de água líquida subterrânea ou sob uma camada de gelo, como acreditamos existir em luas do Sistema Solar, por exemplo, que se encontram em regiões consideradas frias demais de acordo com a definição clássica da ZH.

Além disso, ao consideramos a zona habitável como uma propriedade da estrela, em vez de aplicar o conceito de habitabilidade a cada planeta individualmente, estamos também desconsiderando as características dos planetas que podem influenciar na sua habitabilidade. Em sistemas planetários compactos como aqueles de estrelas anãs M, por exemplo, mesmo estando dentro da ZH, planetas podem estar em rotação síncrona com suas estrelas, de forma que uma de suas faces esteja sempre recebendo radiação estelar enquanto a outra permaneça sempre escura, situação que pode afetar de forma negativa a habitabilidade de um planeta. Além disso, a temperatura de um planeta pode ser afetada por outras fontes de calor além da radiação da estrela, como fontes internas e o calor proveniente de efeitos de maré, por exemplo, e também pela presença de uma atmosfera. Apesar de certamente relevante, enquanto não tivermos acesso a informações mais detalhadas sobre as características dos exoplanetas, teremos que nos contentar com estimativas baseadas na definição clássica da ZH.

Em [6] e nos trabalhos subsequentes [7] e [8], são apresentados métodos para o cálculo dos limites da ZH levando em consideração o efeito estufa em uma atmosfera planetária composta por N_2 , CO_2 e H_2O e descrita por um modelo climático unidimensional. O limite interno da ZH (mais próximo da estrela) pode ser definido pelo início do efeito estufa úmido (*moist-greenhouse effect*), quando a atmosfera se torna úmida, ou pelo início do processo de efeito estufa descontrolado (*runaway greenhouse effect*), quando há perda da água do planeta. O limite externo pode ser definido pelo chamado limite de primeira condensação, em que nuvens de CO_2 começam a se formar em escalas de tempo geologicamente rápidas, e pelo ponto em que ocorre o efeito estufa máximo, em que há o máximo aquecimento possível devido a uma atmosfera de CO_2 . Os autores obtêm também limites menos conservadores para a ZH baseados em evidências geológicas de que Vênus não teve água líquida em sua superfície ao menos nos últimos 1 bilhão de anos (que dá origem ao limite para borda interna conhecido como “Vênus recente”) e de que Marte teve água líquida em sua superfície 3,8 bilhões de anos atrás (que dá origem ao limite para a borda externa conhecido como “Marte antigo”).

Por fim, vale a pena mencionar também que existem atualmente estudos que visam determinar o análogo galáctico da ZH, ou seja, determinar a região da Via Láctea na qual é mais provável o surgimento de vida (ver, por exemplo, [9]). No entanto, o conceito de zona habitável galáctica não é ainda tão bem estabelecido como o de zona habitável estelar.

2.1 Habitabilidade no Sistema Solar

Até o momento, a Terra é o único planeta que sabemos possuir água no estado líquido de forma permanente. No entanto, existem evidências que apontam para a possível existência atual ou passada de água em outros planetas e luas do Sistema Solar, mesmo que na forma de vapor ou gelo. A evidência mais recente é a de que possa existir grande quantidade de água subterrânea na região de Marte conhecida como *Valles Marineris* [10], obtida com o instrumento FREND [11] a bordo da missão *ExoMars Trace Gas Orbiter* [12].

Em [8], são calculados os limites da ZH do Sistema Solar, de acordo com o modelo climático unidimensional de [6], sem nuvens, atualizado em [7]. Os resultados, que podem ser vistos na Figura 3 de [8], mostram que apenas a Terra e Marte se encontram dentro da ZH do Sistema Solar, mesmo usando as definições menos conservadoras.

No entanto, sabemos que outros corpos rochosos do Sistema Solar apresentam interesse astrobiológico, como as luas de Saturno Encélado e Titã, e a lua Europa, de Júpiter.

A possibilidade da existência de um oceano de água líquida com mais água do que a Terra, sob uma camada de gelo em Europa foi descoberta pela missão *Galileo*² da NASA, no final da década de 90. A missão *Cassini*³, também da NASA, foi a responsável por detectar erupções de plumas de gelo e vapor de água em Encélado, em 2005, também indicação de um possível oceano sob uma camada superficial de gelo. A missão *Cassini* também foi responsável por estudar pela primeira vez a superfície de Titã, a qual descobriu ser coberta por corpos de hidrocarbonetos líquidos, além de ter encontrado evidências para a possível existência de água líquida subterrânea.

A potencial habitabilidade destas luas motivou o desenvolvimento de novas missões espaciais previstas para a próxima década, como a *Europa Clipper*⁴ da NASA, que orbitará Júpiter, a *Dragonfly*⁵, também da NASA, que enviará um drone para sobrevoar Titã, e a JUICE⁶ da ESA, que estudará Júpiter e suas três maiores luas.

3 Planetas fora do Sistema Solar

Mais da metade dos exoplanetas até o momento confirmados foi descoberta pela missão espacial *Kepler*, que esteve em operação entre 2009 e 2018, incluindo o período em que foi substituída pela missão K2 [13], após falha mecânica que impediu o prosseguimento da missão original. A missão *Kepler* observou um total de ~ 150000 estrelas distantes (de 600 a 3000 anos luz de distância), em uma área de $\sim 115 \text{ deg}^2$.

Atualmente, a missão espacial TESS, também da NASA, deve observar um total de ~ 200000 estrelas próximas (até 200 anos luz de distância) no céu todo.

3.1 Métodos de detecção de exoplanetas

Apesar de outros sistemas planetários serem aparentemente muito comuns, ao menos na Via Láctea, o imageamento de exoplanetas é ainda um fenômeno relativamente raro, visto que, além de estarem muito distantes e não emitirem luz própria, a radiação emitida pelas estrelas ofusca o brilho muito menor dos respectivos exoplanetas. De fato, até o momento, medidas indiretas foram responsáveis pela detecção da grande maioria dos exoplanetas conhecidos. Vamos descrever brevemente os dois principais métodos de detecção de exoplanetas utilizados até o momento, o do trânsito primário e o da velocidade radial, e comentar sobre outros métodos que também têm tido êxito nos últimos anos.

O método do trânsito planetário primário, utilizado pelas missões *Kepler* e TESS, dentre outras, foi o responsável pela descoberta de mais de 70% dos exoplanetas atualmente confirmados. Este método consiste na detecção da diminuição do brilho das estrelas quando ocorre um trânsito planetário, ou seja, quando o exoplaneta cruza em frente da estrela, do nosso ponto de vista, como ilustrado na Figura 1. Para que a variação do brilho de uma estrela seja percebida, é necessário que ela seja observada periodicamente, de modo a produzir uma curva de luz detalhada. De fato, tipicamente, os trânsitos detectados ocorrem em um intervalo de tempo da ordem de horas e, para detectá-los, a missão *Kepler*, por exemplo, monitorava o brilho de milhares de estrelas selecionadas com uma cadência de minutos.

A observação do trânsito de um planeta permite que sejam medidos o seu período orbital e o seu raio, pois este é proporcional à diminuição do brilho da estrela (a rigor, a diminuição do brilho é proporcional ao raio ao quadrado). Quanto menor o semi-eixo maior da órbita do planeta, menor é o seu período de translação e mais frequentes serão os trânsitos, fazendo com que esse método de detecção preferencialmente detecte planetas grandes que orbitem próximo a estrelas menos luminosas.

O método da velocidade radial, diferentemente do método do trânsito primário, é sensível à massa do planeta, mas não ao seu raio. De fato, neste método, a massa do planeta é um parâmetro degenerado com a inclinação da sua órbita e é possível estimar somente a sua massa mínima, admitindo uma inclinação de 90° . Este método consiste na detecção espectroscópica do movimento discreto da estrela em torno do centro de massa do sistema planetário, ilustrado na Figura 2, cuja amplitude é maior para planetas massivos que orbitam mais próximos a estrelas com baixa massa. Por isso, a sua utilização também tende a detectar planetas massivos próximos a estrelas menores e de baixa luminosidade.

Como esses dois métodos foram aqueles responsáveis pelas primeiras detecções de exoplanetas, foram inicialmente descobertos muitos planetas da classe dos chamados “Júpiteres quentes” (*hot Jupiters*), planetas grandes que orbitam próximo às suas estrelas, com períodos orbitais de horas ou poucos dias, incluindo 51 Pegasi b.

²<https://solarsystem.nasa.gov/missions/galileo>

³https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/main

⁴<https://europa.nasa.gov/>

⁵<https://www.nasa.gov/dragonfly>

⁶<https://sci.esa.int/web/juice>

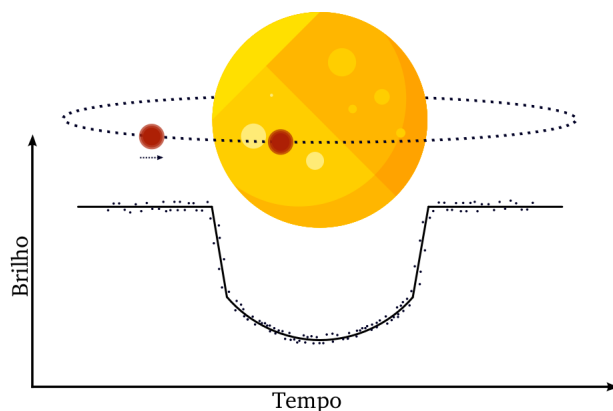


Figura 1: Ilustração do comportamento da curva de luz de uma estrela durante o trânsito de um planeta. Crédito: Raquel Gomes Gonçalves Farias.

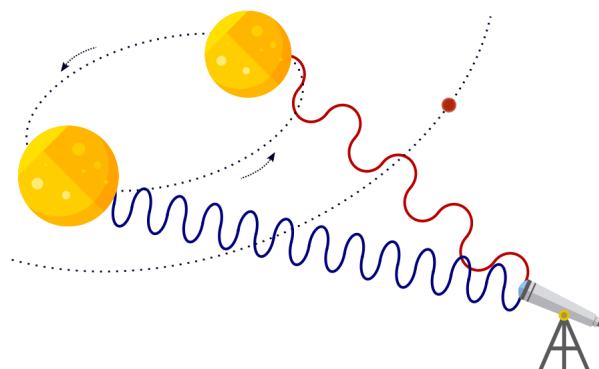


Figura 2: Ilustração do efeito Doppler observado na emissão de uma estrela que orbita o centro de massa do sistema planetário, em dois diferentes pontos da órbita de um de seus planetas, representado em vermelho. Crédito: Raquel Gomes Gonçalves Farias.

O método responsável pelo terceiro maior número de detecções de exoplanetas é o de microlenteamento gravitacional, no qual a observação de uma pequena variação no brilho de uma estrela distante indica que a estrela que faz o papel de lente possui um planeta, como ilustrado na Figura 3.

De acordo com a base de dados *online* exoplanet.eu, ~70% dos exoplanetas atualmente confirmados foram descobertos pelo método de trânsito primário, ~20% pelo método da velocidade radial, ~3% por microlenteamento e ~3% por imageamento direto. O restante das detecções foi realizado com métodos promissores mas ainda pouco produtivos, tais como os métodos de variação temporal (*timing variation*), que detectam exoplanetas através da observação de variações nos trânsitos de outro exoplaneta do mesmo sistema planetário.

3.2 Características dos exoplanetas conhecidos

Devido aos *bias* observacionais já mencionados, as primeiras detecções de exoplanetas já apontavam para um cenário muito diferente do que vemos no Sistema Solar, onde os planetas gigantes estão mais distantes do Sol e não existem Júpiteres quentes. Sabemos hoje em dia, que a frequência desse tipo de planeta não é alta nas nossas vizinhanças [14]. Mesmo assim, a descoberta de outros sistemas planetários têm revelado a existência de diferentes tipos de planetas que não são encontrados no Sistema Solar.

Dentre os diferentes tipos de classificação existentes na literatura, podemos destacar os planetas com massas entre a da Terra e a de Netuno, que ficaram conhecidos como super Terras e mini Netunos. Apesar de não haver consenso com relação aos limites de massa que definem as transições entre planetas do tipo Terra e super Terras e entre as super Terras e os mini Netunos, acredita-se que super Terras sejam planetas rochosos, enquanto que mini Netunos teriam composição similar à dos gigantes de gelo do Sistema Solar. Acredita-se que esses tipos de planetas sejam relativamente comuns na nossa galáxia, correspondendo a aproximadamente 10 % dos exoplanetas conhecidos atualmente.

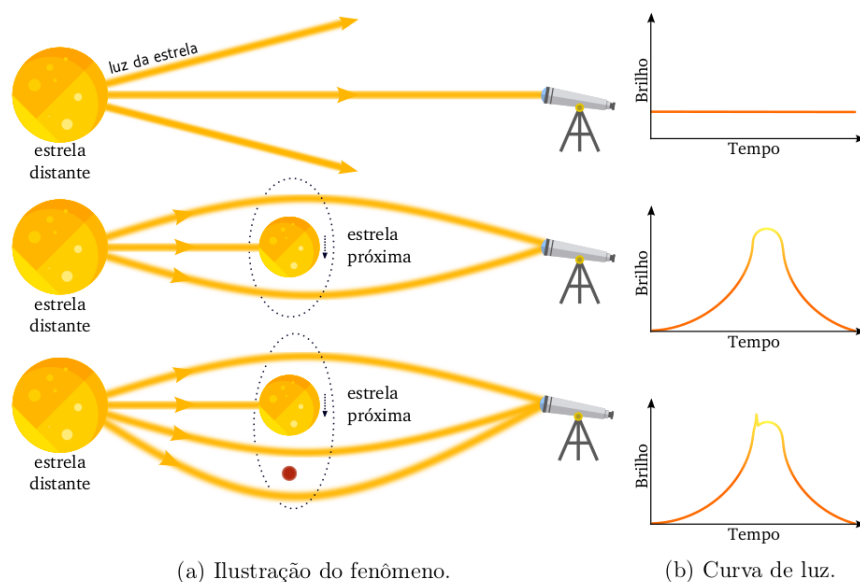


Figura 3: Ilustração da detecção de um exoplaneta pelo método de microlenteamento gravitacional. Nas imagens da esquerda, a luz de uma estrela distante é lenteada pela passagem de uma estrela mais próxima (que faz o papel de lente) na sua frente. Durante a passagem, o brilho da estrela mais distante sofre um aumento e, quando há um planeta orbitando a estrela mais próxima, a curva de luz da estrela mais distante apresenta um pico característico, como pode ser visto nas imagens da direita. Crédito: Raquel Gomes Gonçalves Farias.

Recentemente, foi proposta também uma subcategoria de planetas habitáveis dentro da categoria dos mini Netunos: os chamados planetas do tipo *hycean* (nome formado pelas palavras *hydrogen* e *ocean*) [15]. Estes planetas, com densidades menores do que as super Terras rochosas e maiores do que os mini Netunos maiores, possuiriam grandes oceanos sob uma atmosfera rica em H_2 .

Com relação ao raio do planeta, em [16] são propostas quatro categorias para sistemas planetários com estrelas do tipo solar: rochosos (com raio $< 2 R_{\oplus}$), de água (com $2 R_{\oplus} < \text{raio} < 4 R_{\oplus}$), transitórios (*transitional planets*, com $4 R_{\oplus} < \text{raio} < 10 R_{\oplus}$) e gigantes gasosos (com raio $> 10 R_{\oplus}$). Os planetas em cada categoria apresentariam diferentes composições, com diferentes proporções de silicatos, metais, água, gelos e gases.

A Figura 4 mostra o raio como função da massa (ou massa mínima) para 927 exoplanetas que possuem esses parâmetros medidos, na base de dados *NASA Exoplanet Archive* [7] em janeiro de 2022. Os pontos azul e vermelho representam a Terra e Júpiter respectivamente. É possível ver que planetas gigantes são a maioria dos exoplanetas detectados até o momento e que os limites superiores para raio e massa são muito maiores do que aqueles que encontramos no Sistema Solar. Os pontos verdes e laranjas representam exoplanetas potencialmente habitáveis (ver seção 4).

4 Exoplanetas de interesse astrobiológico

Consideramos um exoplaneta interessante do ponto de vista astrobiológico quando ele é rochoso e se encontra dentro da ZH de sua estrela. Quanto mais semelhante à Terra, em termos de tamanho, massa e radiação recebida da estrela, mais interessante ele se torna.

De acordo com o *The Habitable Exoplanets Catalog* [8] mantido pela Universidade de Porto Rico em Arecibo, até dezembro de 2021 conhecemos um total de 59 exoplanetas potencialmente habitáveis (representados em verde e laranja na Figura 4) com raios entre $0,5 R_{\oplus}$ e $2,5 R_{\oplus}$ e massa (ou massa mínima) entre $0,1 M_{\oplus}$ e $10 M_{\oplus}$. Destes, 21 têm maior probabilidade de serem rochosos (representados em verde na Figura 4), pois apresentam raios entre $0,5 R_{\oplus}$ e $1,6 R_{\oplus}$ e massas entre $0,1 M_{\oplus}$ e $3 M_{\oplus}$.

Dentre os 21 exoplanetas com maior probabilidade de serem rochosos, podemos destacar os planetas do sistema TRAPPIST-1 [17]. Este sistema planetário, primeiramente descoberto em 2016 pelo telescópio *Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope* (TRAPPIST) [18], localizado no Chile, contém 7 planetas rochosos orbitando uma estrela anã M. Suas massas variam

⁷<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

⁸<https://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

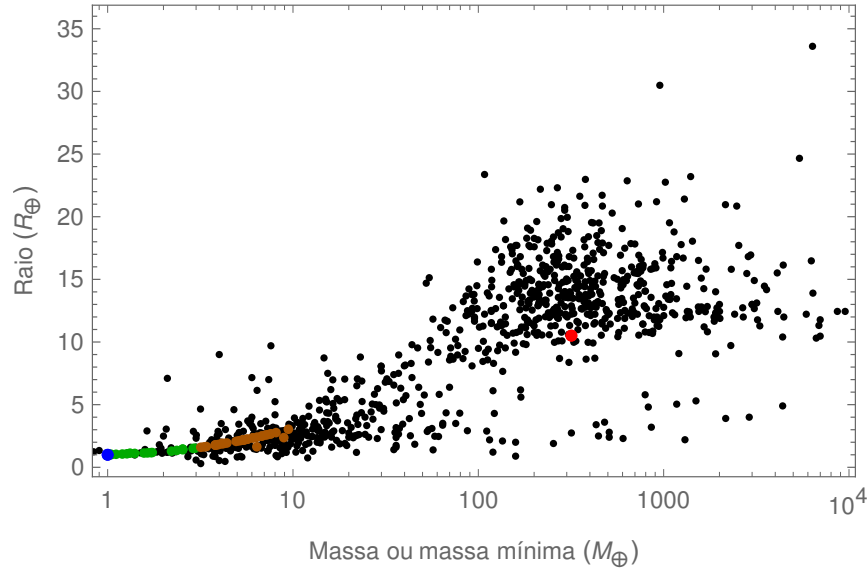


Figura 4: Raio como função da massa (ou massa mínima) para 927 exoplanetas que apresentam medidas desse parâmetros em janeiro de 2022. Os dados foram retirados da base de dados NASA Exoplanet Archive. O ponto azul representa a Terra e o vermelho representa Júpiter. Os pontos verdes e laranjas representam planetas potencialmente habitáveis.

entre $\sim 0,3M_{\oplus}$ e $\sim 1,4M_{\oplus}$ e seus raios variam entre $\sim 0,7R_{\oplus}$ e $\sim 1,1R_{\oplus}$. Destes 7 planetas, 4 estão dentro da ZH, de acordo com o *The Habitable Exoplanets Catalog* e recebem radiação da sua estrela correspondente entre 0,25 e 1,12 vezes a recebida na Terra pelo Sol. No entanto, estes planetas orbitam tão próximos à sua estrela (com órbitas com raios entre $\sim 0,01$ UA e $\sim 0,06$ UA), que espera-se que estejam em rotação síncrona com ela. [19] apresenta uma revisão sobre esse sistema planetário e considerações sobre a sua habitabilidade.

É interessante mencionar também que Proxima Centauri b, que se encontra no sistema planetário mais próximo do Sistema Solar, tem raio estimado de $1,08 R_{\oplus}$, massa mínima de $1,27 M_{\oplus}$ e se encontra dentro da ZH de sua estrela.

Podemos utilizar o índice de similaridade com a Terra (*Earth Similarity Index*, ESI) [20], que varia entre 0 e 1, para quantificar o nível de semelhança entre um planeta e a Terra. Quanto mais próximo de 1 for o ESI de um planeta, maior é a semelhança entre ele e a Terra. De acordo com o *The Habitable Exoplanets Catalog*, que calcula este índice levando em consideração o raio, a densidade, a velocidade de escape e a temperatura superficial do exoplaneta, Proxima Centauri b possui ESI de 0,87 e os planetas dentro da ZH do sistema TRAPPIST-1 possuem ESI entre 0,58 e 0,91.

De acordo com o mesmo procedimento, o exoplaneta atualmente com maior índice ESI é o Teegarden's Star b, com ESI de 0,95. Este planeta, que orbita a estrela anã vermelha de Teegarden, possui raio estimado de $1,02 R_{\oplus}$, massa mínima de $1,05 M_{\oplus}$ e recebe de sua estrela aproximadamente 1,15 vezes o fluxo solar recebido pela Terra. Em seguida, vêm os exoplanetas TOI-700 d e Kepler-1649 c, que também orbitam estrelas anãs vermelhas e possuem ESI de 0,93 e 0,92 respectivamente. TOI-700 d foi o primeiro planeta rochoso dentro da ZH descoberto pela missão TESS e recebe de sua estrela aproximadamente 87% da radiação recebida pela Terra do Sol. No entanto, assim como os planetas do sistema TRAPPIST-1, ele está em rotação síncrona com sua estrela. O exoplaneta Kepler-1649 c, por sua vez, foi descoberto apenas em 2020, durante uma reanálise dos dados obtidos pela missão *Kepler*.

5 Perspectivas

Até aqui, tratamos da detecção e caracterização de exoplanetas e do conceito de zona habitável estelar. No entanto, claramente, estar dentro da zona habitável não garante que um planeta seja habitável e, por sua vez, ser habitável não garante que o planeta seja habitado. O conceito de ZH auxilia na seleção de planetas a serem estudados de forma mais detalhada, mas a procura por sinais de vida em si é feita através da procura pelas chamadas “bioassinaturas”.

Bioassinaturas podem ser observadas a partir da análise da emissão da atmosfera dos exoplanetas, visto que algumas moléculas, como o ozônio e o metano, estão associadas à vida na Terra. A hipótese da existência de vida nas nuvens de Vênus, baseada na detecção da molécula de fosfina [21], seria um exemplo deste tipo de bioassinatura.

Outras bioassinaturas também podem indicar a existência de vida em outros planetas, como por exemplo a variação sazonal do seu albedo, que pode estar relacionada a variações na cobertura vegetal do planeta em diferentes estações do ano ou até mesmo variações entre dia e noite.

É importante mencionar também o programa SETI⁹ que desde a década de 80 procura por sinais de rádio emitidos por civilizações extraterrestres, intencionais ou não, usando radiotelescópios em diferentes continentes.

Espera-se que, com o recente lançamento do telescópio espacial *James Webb* [22], em breve sejamos capazes de caracterizar as atmosferas de exoplanetas próximos. Além disso, com o advento de espectrógrafos cada vez mais precisos, como por exemplo o CODEX (*COsmic Dynamics and EXo-earth experiment*) [23], que será instalado no ELT¹⁰ (Extremely Large Telescope) com previsão para iniciar operação em 2025, e futuras missões espaciais como a PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars, prevista para 2026, com participação brasileira) [24], esperamos que se inicie uma nova fase no estudo dos exoplanetas e na procura por vida fora da Terra. Quem sabe, em breve, detectaremos ambientes favoráveis às formas de vida mais robustas, como os extremófilos encontrados na Terra ou, de forma mais ambiciosa, até mesmo sinais de vida fotossintética através da observação da assinatura espectroscópica simultânea do ozônio, vapor de água e metano na atmosfera planetária [25].

Existe também, grande expectativa para a descoberta de luas fora do Sistema Solar, as chamadas exoluas. Sabemos que no Sistema Solar existem mais de 200 satélites naturais ao redor dos planetas, sendo, portanto, razoável, acreditar que o mesmo fenômeno ocorra ao menos em alguns dos milhares de sistemas planetários já descobertos. Apesar de nenhuma exlua ter sido ainda confirmada, existe grande expectativa de que técnicas como as análises de pequenas variações na periodicidade e duração dos trânsitos planetários - TTV (*Transit Timing Variation*) e TDV (*Transit Duration Variation*) [26] - possam gerar resultados na próxima década.

Como a astrobiologia é uma área de pesquisa extremamente vasta, não foi possível aqui aprofundar todos os seus aspectos fascinantes: exploração espacial, a procura pelos vestígios das primeiras formas de vida na Terra, o estudo dos organismos extremófilos e a própria discussão acerca do conceito do que é vida, dentre outros. Para uma perspectiva mais ampla sobre as diferentes frentes de estudo da astrobiologia e aprofundamento nos temas aqui discutidos, recomendamos os artigos de revisão [27], [28], [29], [30], [31] e [32].

Agradecimentos

A autora gostaria de agradecer os membros do grupo de pesquisa RioAstrobio, em particular à doutoranda Raquel Gomes Gonçalves Farias que, gentilmente, preparou as três primeiras figuras deste trabalho, e ao Prof. Gustavo Porto de Mello, pela revisão do texto.

Referências

- [1] A. Wolszczan and D. A. Frail. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355(6356):145–147, January 1992.
- [2] Michel Mayor and Didier Queloz. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555):355–359, November 1995.
- [3] Rosanne Di Stefano, Julia Berndtsson, Ryan Urquhart, Roberto Soria, Vinay L. Kashyap, Theron W. Carmichael, and Nia Imara. A possible planet candidate in an external galaxy detected through X-ray transit. *Nature Astronomy*, 5:1297–1307, October 2021.
- [4] William J. Borucki, David Koch, Gibor Basri, Natalie Batalha, Timothy Brown, Douglas Caldwell, John Caldwell, Jørgen Christensen-Dalsgaard, William D. Cochran, Edna DeVore, Edward W. Dunham, Andrea K. Dupree, Thomas N. Gautier, John C. Geary, Ronald Gilliland, Alan Gould, Steve B. Howell, Jon M. Jenkins, Yoji Kondo, David W. Latham, Geoffrey W. Marcy, Søren Meibom, Hans Kjeldsen, Jack J. Lissauer, David G. Monet, David Morrison, Dimitar Sasselov, Jill Tarter, Alan Boss, Don Brownlee, Toby Owen, Derek Buzasi, David Charbonneau, Lurance Doyle, Jonathan Fortney, Eric B. Ford, Matthew J. Holman, Sara Seager, Jason H. Steffen, William F. Welsh, Jason Rowe, Howard Anderson, Lars Buchhave, David Ciardi, Lucianne Walkowicz, William Sherry, Elliott Horch, Howard Isaacson, Mark E. Everett, Debra Fischer, Guillermo Torres, John Asher Johnson, Michael Endl, Phillip MacQueen, Stephen T. Bryson, Jessie Dotson, Michael Haas, Jeffrey Kolodziejczak, Jeffrey Van Cleve, Hema Chandrasekaran, Joseph D. Twicken, Elisa V. Quintana, Bruce D. Clarke, Christopher Allen, Jie Li, Haley Wu, Peter Tenenbaum, Ekaterina Verner, Frederick Bruhweiler, Jason Barnes, and Andrej Prsa. Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results. *Science*, 327(5968):977, February 2010.

⁹<https://www.seti.org/>

¹⁰<https://elt.eso.org/>

- [5] George R. Ricker, Joshua N. Winn, Roland Vanderspek, David W. Latham, Gáspár Á. Bakos, Jacob L. Bean, Zachory K. Berta-Thompson, Timothy M. Brown, Lars Buchhave, Nathaniel R. Butler, R. Paul Butler, William J. Chaplin, David Charbonneau, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Mark Clampin, Drake Deming, John Doty, Nathan De Lee, Courtney Dressing, Edward W. Dunham, Michael Endl, Francois Fressin, Jian Ge, Thomas Henning, Matthew J. Holman, Andrew W. Howard, Shigeru Ida, Jon M. Jenkins, Garrett Jernigan, John Asher Johnson, Lisa Kaltenegger, Nobuyuki Kawai, Hans Kjeldsen, Gregory Laughlin, Alan M. Levine, Douglas Lin, Jack J. Lissauer, Phillip MacQueen, Geoffrey Marcy, Peter R. McCullough, Timothy D. Morton, Norio Narita, Martin Paegert, Enric Pallé, Francesco Pepe, Joshua Pepper, Andreas Quirrenbach, Stephen A. Rinehart, Dimitar Sasselov, Bun'ei Sato, Sara Seager, Alessandro Sozzetti, Keivan G. Stassun, Peter Sullivan, Andrew Szentgyorgyi, Guillermo Torres, Stéphane Udry, and Joel Villaseñor. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1:014003, January 2015.
- [6] James F. Kasting, Daniel P. Whitmire, and Ray T. Reynolds. Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus*, 101(1):108–128, January 1993.
- [7] Ravi Kumar Kopparapu, Ramses Ramirez, James F. Kasting, Vincent Eymet, Tyler D. Robinson, Suvrath Mahadevan, Ryan C. Terrien, Shawn Domagal-Goldman, Victoria Meadows, and Rohit Deshpande. Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates. *The Astrophysical Journal*, 765(2):131, March 2013.
- [8] Ravi Kumar Kopparapu, Ramses M. Ramirez, James SchottelKotte, James F. Kasting, Shawn Domagal-Goldman, and Vincent Eymet. Habitable Zones around Main-sequence Stars: Dependence on Planetary Mass. *The Astrophysical Journal Letters*, 787(2):L29, June 2014.
- [9] G Gonzalez. The galactic habitable zone: Galactic chemical evolution. *Icarus*, 152(1):185–200, Jul 2001.
- [10] I. Mitrofanov, A. Malakhov, M. Djachkova, D. Golovin, M. Litvak, M. Mokrousov, A. Sanin, H. Svedhem, and L. Zelenyi. The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of valles marineris on mars. *Icarus*, 374:114805, 2022.
- [11] I. Mitrofanov, A. Malakhov, B. Bakhtin, D.D. Golovin, A. Kozyrev, Maxim Litvak, M. Mokrousov, A. Sanin, V. Tretyakov, A. Vostrukhin, A. Anikin, L. Zelenyi, Jordanka Semkova, S. Malchev, B. Tomov, Y. Matviichuk, P. Dimitrov, Rositza Koleva, Tsvetan Dachev, and Vyacheslav Shurshakov. Fine resolution epithermal neutron detector (frend) onboard the exomars trace gas orbiter. *Space Science Reviews*, 214, 07 2018.
- [12] Jorge Vago, Olivier Witasse, H. Svedhem, P. Baglioni, A. Haldemann, G. Gianfiglio, Thierry Blancquaert, D. McCoy, and R. Groot. Esa exomars program: The next step in exploring mars. *Solar System Research*, 49:518–528, 12 2015.
- [13] Steve B. Howell, Charlie Sobeck, Michael Haas, Martin Still, Thomas Barclay, Fergal Mullally, John Troeltzsch, Suzanne Aigrain, Stephen T. Bryson, Doug Caldwell, William J. Chaplin, William D. Cochran, Daniel Huber, Geoffrey W. Marcy, Andrea Miglio, Joan R. Najita, Marcie Smith, J. D. Twicken, and Jonathan J. Fortney. The K2 Mission: Characterization and Early Results. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 126(938):398, April 2014.
- [14] J. T. Wright, G. W. Marcy, A. W. Howard, John Asher Johnson, T. D. Morton, and D. A. Fischer. The frequency of hot jupiters orbiting nearby solar-type stars. *The Astrophysical Journal*, 753(2):160, Jun 2012.
- [15] Nikku Madhusudhan, Anjali A. A. Piette, and Savvas Constantinou. Habitability and biosignatures of hycean worlds. *The Astrophysical Journal*, 918(1):1, aug 2021.
- [16] Li Zeng, Stein B. Jacobsen, Dimitar D. Sasselov, Michail I. Petaev, Andrew Vanderburg, Mercedes Lopez-Morales, Juan Perez-Mercader, Thomas R. Mattsson, Gongjie Li, Matthew Z. Heising, Aldo S. Bonomo, Mario Damasso, Travis A. Berger, Hao Cao, Amit Levi, and Robin D. Wordsworth. Growth model interpretation of planet size distribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(20):9723–9728, 2019.
- [17] Michaël Gillon, Amaury H. M. J. Triaud, Brice-Olivier Demory, Emmanuël Jehin, Eric Agol, Katherine M. Deck, Susan M. Lederer, Julien de Wit, Artem Burdanov, James G. Ingalls, Emeline Bolmont, Jeremy Leconte, Sean N. Raymond, Franck Selsis, Martin Turbet, Khalid Barkaoui, Adam Burgasser, Matthew R. Burleigh, Sean J. Carey, Aleksander Chaushev, Chris M. Copperwheat, Laetitia Delrez, Catarina S. Fernandes, Daniel L. Holdsworth, Enrico J. Kotze, Valérie Van Grootel, Yaseen Almléaky, Zouhair Benkhaldoun, Pierre Magain, and Didier Queloz. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. *Nature*, 542(7642):456–460, February 2017.
- [18] Michaël Gillon, Emmanuël Jehin, Susan M. Lederer, Laetitia Delrez, Julien de Wit, Artem Burdanov, Valérie Van Grootel, Adam J. Burgasser, Amaury H. M. J. Triaud, Cyrielle Opitom, Brice-Olivier Demory, Devendra K. Sahu, Daniella Bardalez Gagliuffi, Pierre Magain, and Didier Queloz. Temperate Earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star. *Nature*, 533(7602):221–224, May 2016.
- [19] Martin Turbet, Emeline Bolmont, Vincent Bourrier, Brice-Olivier Demory, Jérémy Leconte, James Owen, and Eric T. Wolf. A Review of Possible Planetary Atmospheres in the TRAPPIST-1 System. *Space Science Reviews*, 216(5):100, July 2020.
- [20] Dirk Schulze-Makuch, Abel Méndez, Alberto G. Fairén, Philip von Paris, Carol Turse, Grayson Boyer, Alfonso F. Davila, Marina Resendes De Sousa Ant6nio, David Catling, and Louis N. Irwin. A Two-Tiered Approach to Assessing the Habitability of Exoplanets. *Astrobiology*, 11(10):1041–1052, December 2011.

- [21] Jane S. Greaves, Anita M. S. Richards, William Bains, Paul B. Rimmer, Hideo Sagawa, David L. Clements, Sara Seager, Janusz J. Petkowski, Clara Sousa-Silva, Sukrit Ranjan, Emily Drabek-Maunders, Helen J. Fraser, Annabel Cartwright, Ingo Mueller-Wodarg, Zhuchang Zhan, Per Friberg, Iain Coulson, E'lisa Lee, and Jim Hoge. Phosphine gas in the cloud decks of Venus. *Nature Astronomy*, 5:655–664, January 2021.
- [22] Dana R. Louie, Drake Deming, Loic Albert, L. G. Bouma, Jacob Bean, and Mercedes Lopez-Morales. Simulated JWST/NIRISS Transit Spectroscopy of Anticipated TESS Planets Compared to Select Discoveries from Space-based and Ground-based Surveys. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130(986):044401, April 2018.
- [23] Luca Pasquini, G. Avila, H. Dekker, B. Delabre, S. D'Odorico, A. Manescau, M. Haehnelt, B. Carswell, R. Garcia-Lopez, R. Lopez, M. T. Osorio, R. Rebolo, S. Cristiani, P. Bonifacio, V. D'Odorico, P. Molaro, P. Spanò, F. Zerbi, Michel Mayor, M. Dessauges, D. Megevand, F. Pepe, Didier Queloz, and S. Udry. CODEX: the high-resolution visual spectrograph for the E-ELT. In Ian S. McLean and Mark M. Casali, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, volume 7014, pages 573 – 581. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2008.
- [24] H. Rauer, C. Catala, C. Aerts, T. Appourchaux, W. Benz, A. Brandeker, J. Christensen-Dalsgaard, M. Deleuil, L. Gizon, M. J. Goupil, M. Güdel, E. Janot-Pacheco, M. Mas-Hesse, I. Pagano, G. Piotto, D. Pollacco, C. Santos, A. Smith, J. C. Suárez, R. Szabó, S. Udry, V. Adibekyan, Y. Alibert, J. M. Almenara, P. Amaro-Seoane, M. Ammler-von Eiff, M. Asplund, E. Antonello, S. Barnes, F. Baudin, K. Belkacem, M. Bergemann, G. Bihain, A. C. Birch, X. Bonfils, I. Boisse, A. S. Bonomo, F. Borsa, I. M. Brandão, E. Brocato, S. Brun, M. Burleigh, R. Burston, J. Cabrera, S. Cassisi, W. Chaplin, S. Charpinet, C. Chiappini, R. P. Church, Sz. Csizmadia, M. Cunha, M. Damasso, M. B. Davies, H. J. Deeg, R. F. Díaz, S. Dreizler, C. Dreyer, P. Eggenberger, D. Ehrenreich, P. Eigmüller, A. Erikson, R. Farmer, S. Feltzing, F. de Oliveira Fialho, P. Figureira, T. Forveille, M. Fridlund, R. A. García, P. Giommi, G. Giuffrida, M. Godolt, J. Gomes da Silva, T. Granzer, J. L. Grenfell, A. Grottsch-Noels, E. Günther, C. A. Haswell, A. P. Hatzes, G. Hébrard, S. Hekker, R. Helled, K. Heng, J. M. Jenkins, A. Johansen, M. L. Khodachenko, K. G. Kislyakova, W. Kley, U. Kolb, N. Krivova, F. Kupka, H. Lammer, A. F. Lanza, Y. Lebreton, D. Magrin, P. Marcos-Arenal, P. M. Marrese, J. P. Marques, J. Martins, S. Mathis, S. Mathur, S. Messina, A. Miglio, J. Montalbán, M. Montalto, M. J. P. F. G. Monteiro, H. Moradi, E. Moravveji, C. Mordasini, T. Morel, A. Mortier, V. Nascimbeni, R. P. Nelson, M. B. Nielsen, L. Noack, A. J. Norton, A. Ofir, M. Oshagh, R. M. Ouazzani, P. Pápics, V. C. Parro, P. Petit, B. Plez, E. Poretti, A. Quirrenbach, R. Ragazzoni, G. Raimondo, M. Rainer, D. R. Reese, R. Redmer, S. Reffert, B. Rojas-Ayala, I. W. Roxburgh, S. Salmon, A. Santerne, J. Schneider, J. Schou, S. Schuh, H. Schunker, A. Silva-Valio, R. Silvotti, I. Skillen, I. Snellen, F. Sohl, S. G. Sousa, A. Sozzetti, D. Stello, K. G. Strassmeier, M. Švanda, Gy. M. Szabó, A. Tkachenko, D. Valencia, V. Van Grootel, S. D. Vauclair, P. Ventura, F. W. Wagner, N. A. Walton, J. Weingrill, S. C. Werner, P. J. Wheatley, and K. Zwintz. The PLATO 2.0 mission. *Experimental Astronomy*, 38(1-2):249–330, November 2014.
- [25] Arnold, L., Ehrenreich, D., Vidal-Madjar, A., Dumusque, X., Nitschelm, C., Quétel, R. R., Hedelt, P., Berthier, J., Lovis, C., Moutou, C., Ferlet, R., and Crooker, D. The earth as an extrasolar transiting planet - ii. harps and uves detection of water vapour, biogenic o₂, and o₃. *A&A*, 564:A58, 2014.
- [26] David M. Kipping. Transit timing effects due to an exomoon. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 392(1):181–189, January 2009.
- [27] R. K. Kopparapu, E. T. Wolf, and V. S. Meadows. *Characterizing Exoplanet Habitability*, page 449. 2020.
- [28] Nancy Merino, Heidi S. Aronson, Diana P. Bojanova, Jayme Feyhl-Buska, Michael L. Wong, Shu Zhang, and Donato Giovannelli. Living at the extremes: Extremophiles and the limits of life in a planetary context. *Frontiers in Microbiology*, 10:780, 2019.
- [29] Edward W. Schwieterman, Nancy Y. Kiang, Mary N. Parenteau, Chester E. Harman, Shiladitya DasSarma, Theresa M. Fisher, Giada N. Arney, Hilairy E. Hartnett, Christopher T. Reinhard, Stephanie L. Olson, Victoria S. Meadows, Charles S. Cockell, Sara I. Walker, John Lee Grenfell, Siddharth Hegde, Sarah Rugheimer, Renyu Hu, and Timothy W. Lyons. Exoplanet Biosignatures: A Review of Remotely Detectable Signs of Life. *Astrobiology*, 18(6):663–708, June 2018.
- [30] Norio Kitadai and Shigenori Maruyama. Origins of building blocks of life: A review. *Geoscience Frontiers*, 9(4):1117–1153, 2018.
- [31] Hervé Cottin, Julia Michelle Kotler, Daniela Billi, Charles Cockell, René Demets, Pascale Ehrenfreund, Andreas Elsaesser, Louis d'Hendecourt, Jack J. W. A. van Loon, Zita Martins, Silvano Onofri, Richard C. Quinn, Elke Rabbow, Petra Rettberg, Antonio J. Ricco, Klaus Slenzka, Rosa de la Torre, Jean-Pierre de Vera, Frances Westall, Nathalie Carrasco, Aurélien Fresneau, Yuko Kawaguchi, Yoko Kebukawa, Dara Nguyen, Olivier Poch, Kafila Saiagh, Fabien Stalport, Akihiko Yamagishi, Hajime Yano, and Benjamin A. Klammer. Space as a Tool for Astrobiology: Review and Recommendations for Experimentations in Earth Orbit and Beyond. *Space Science Reviews*, 209(1-4):83–181, July 2017.
- [32] Douglas Galante, Evandro Pereira da Silva, Fabio Rodrigues, Jorge Ernesto Horvath, and Marcio Guilherme Bronzato de Avellar. *Astrobiologia: uma ciência emergente*. Tikinet, 2016.