

A procura por exoplanetas habitáveis

Beatriz B. Siffert

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

Desde a descoberta dos primeiros planetas fora do Sistema Solar, os chamados exoplanetas, na década de 90, mais de 5000 exoplanetas já foram descobertos, além dos milhares de candidatos sendo analisados. A descoberta de que existem sistemas planetários ao redor de outras estrelas, suscita naturalmente o questionamento sobre a possibilidade de que esses exoplanetas possam hospedar vida. É nesse contexto que ganha cada vez mais destaque a astrobiologia, área de pesquisa multidisciplinar que consiste no estudo da origem e evolução da vida no Universo. Neste artigo apresentaremos uma breve revisão sobre a procura por exoplanetas e os principais resultados interessantes do ponto de vista da astrobiologia até o momento. Iniciaremos pela definição do conceito de zona habitável estelar, região em torno de uma estrela na qual é, em princípio, possível manter água no estado líquido na superfície de um planeta rochoso. Comentaremos sobre a procura por vida no Sistema Solar, descreveremos os principais métodos de detecção de exoplanetas e apresentaremos exemplos de exoplanetas com particular interesse astrobiológico. Finalizaremos comentando sobre a procura pelas chamadas *bioassinaturas* e *tecnassinaturas*, indicadores da existência de vida fora da Terra, e as missões presentes e futuras com maior potencial para novas descobertas na área da astrobiologia.

Abstract

Since the discovery of the first planets outside the Solar System, the so-called exoplanets, in 1992, more than 5000 exoplanets have been found and there are thousands of other candidates currently under study. Once we discovered the existence of other planetary systems, it becomes natural to ask ourselves if they could also host life. In this context, the multidisciplinary science of astrobiology, which studies the origin and evolution of life in the Universe, gains increasingly visibility. In this paper we present a brief review on the search for exoplanets and the main results so far regarding their astrobiological interest. Starting with the definition of stellar habitable zone, which is the region around a star where it is, in principle, possible to hold liquid water on the surface of a rocky planet, we will then comment on the search for life in the Solar System and describe the main methods currently used to find new exoplanets. We will also present some examples of known exoplanets that are particularly interesting from an astrobiological point of view. We will end by commenting on the search for the so-called *biosignatures* and *technosignatures*, which are expected to indicate the existence of life outside Earth, and current and future missions with greatest potential for new discoveries in this field.

Palavras-chave: astrobiologia, exoplaneta, zona habitável, trânsito primário, velocidade radial.

Keywords: astrobiology, exoplanet, habitable zone, primary transit, radial velocity.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38610](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38610)

1 Introdução

A astrobiologia é uma área de pesquisa multidisciplinar cujo objetivo é o estudo da origem e evolução da vida no Universo. Abrangendo tópicos como a procura pelas primeiras formas de vida na Terra, o estudo dos micro-organismos extremófilos, capazes de sobreviver em condições extremas, e a exploração espacial, foi somente nas últimas décadas que a astrobiologia começou a ganhar maior credibilidade, principalmente devido à descoberta de planetas fora do Sistema Solar, os chamados “exoplanetas”.

Atualmente, existem mais 5000 planetas exoplanetas confirmados, distribuídos em mais de 3700 sistemas planetários. Foi no início da década de 90 que ocorreu a descoberta dos primeiros exoplanetas, que orbitavam o pulsar PSR 1257+12 [1]. Essa foi uma descoberta bastante inusitada visto que pulsares são estrelas em fase de evolução avançada e que já passaram por uma explosão de supernova, o que acreditava-se deveria ter destruído eventuais planetas ao seu redor. Em 1995, foi descoberto o primeiro exoplaneta orbitando uma estrela como o Sol, 51 Pegasi [2],

o que 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].

Mais de 90% dos exoplanetas conhecidos foram descobertos pelas técnicas de detecção chamadas de “velocidade radial” e “trânsito primário”. Enquanto a primeira consiste na detecção de pequenas variações nas velocidades das estrelas durante a órbita de seu(s) planeta(s), a segunda consiste na observação da diminuição do brilho da estrela durante a passagem de um planeta na frente dela. A técnica do trânsito planetário primário, a mais bem sucedida até o momento, foi utilizada no passado pelas missões espaciais Kepler [4] e K2 [5], da agência espacial americana, NASA, e CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires) [6], da agência espacial francesa, CNES, que contou com participação brasileira. Esse também é o método de detecção atualmente utilizado pela missão TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) [7], lançada em 2018, também da NASA. Outras técnicas para a detecção de exoplanetas, como por exemplo o imageamento direto e o microlenteamento gravitacional, embora tenham produzido ainda poucos resultados, permanecem promissoras.

A aplicação de todas essas técnicas por mais de 50 telescópios espaciais e de superfície permitiu a identificação de exoplanetas muito diferentes daqueles que conhecemos no Sistema Solar, em uma faixa muito maior de tamanhos, massas e características orbitais, em torno de diferentes tipos de estrelas. De acordo com a base de dados “The Extrasolar Planets Encyclopedia”¹ [8], estes exoplanetas têm raios variando entre $0,3 R_{\oplus}$ até $\sim 6,5$ vezes o raios 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 UA ² até mais de 6000 UA .

Destes exoplanetas, algumas dezenas são considerados potencialmente habitáveis por apresentarem características similares às da Terra, nosso único exemplo de planeta habitado até o mo-

mento.

Neste artigo, apresentaremos uma breve revisão sobre habitabilidade e métodos de detecção de exoplanetas, do ponto de vista de físicos e astrônomos. Na seção 2, discutiremos o conceito de zona habitável estelar e comentaremos sobre a habitabilidade no Sistema Solar. Na seção 3, descreveremos os métodos utilizados para a descoberta de exoplanetas e na seção 4 apresentaremos alguns dos exoplanetas descobertos até o momento com maior potencial astrobiológico. Por fim, comentaremos na seção 5 sobre a procura por bioassinaturas e tecnoassinaturas, e as principais perspectivas de programas futuros para a descoberta de novos exoplanetas e a caracterização de exoplanetas conhecidos.

2 O conceito de habitabilidade

Até o presente momento, a vida na Terra é o único exemplo que conhecemos e, portanto, é natural que nossa procura por vida em outras partes do Universo a tome como ponto de partida. De fato, 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. A água líquida 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 elementos extremamente abundantes no Universo, visto que o hidrogênio corresponde a mais de 70% da matéria comum conhecida (excluindo a matéria escura, de natureza ainda desconhecida), e o oxigênio é o terceiro elemento mais abundante no Universo. Assim, é provável que a água seja uma molécula presente em muitos outros planetas e, pelo menos nesse aspecto, basear as nossas procuras por vida na existência da água não parece limitar significativamente nossas chances de encontrá-la.

2.1 Zonas habitáveis estelares

As limitações observacionais fazem com que não tenhamos ainda acesso aos detalhes dos planetas em outros sistemas planetários. Assim, até o momento, a busca por condições favoráveis à vida fora do Sistema Solar se baseia predominantemente no conceito de zona habitável (ZH) estelar, cuja definição clássica é a da região em torno

¹www.exoplanet.eu

²A unidade astronômica (UA) equivale à distância média entre a Terra e o Sol, com $1 \text{ UA} = 149597870700 \text{ m}$.

de um estrela na qual um corpo rochoso como a Terra pode sustentar água no estado líquido em sua superfície. A restrição dessa definição para corpos rochosos como a Terra se explica pelo fato de que é necessário que exista uma superfície sólida sobre a qual grande quantidade de água líquida possa se manter por tempo o suficiente para que seja possível o desenvolvimento de vida.

A delimitação dos limites da zona habitável é feita de forma que os corpos não estejam nem próximos demais e nem distantes demais da estrela de forma a serem quentes ou frios demais para sustentar água no estado líquido em sua superfície.

Notem que, a definição de zona habitável é apenas um ponto de partida para nos guiar na procura por vida fora da Terra. Por um lado, estar dentro da ZH não garante que o planeta possua água e, mesmo que possua, pode não ter vida. Por outro lado, estar fora da zona habitável também não é sinônimo de não ter água no estado líquido. De fato, ao limitarmos a definição de ZH 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. Portanto, corpos celestes mais distantes da estrela podem ainda ser habitáveis, no sentido de que possuem água líquida, mesmo não estando dentro da definição clássica de zona habitável.

Além disso, se considerarmos apenas o calor fornecido pela estrela para delimitar a ZH, estaremos negligenciando características planetárias que podem influenciar na sua habitabilidade. As características da órbita do planeta em torno da estrela, por exemplo, podem fazer com que ele se torne inabitável mesmo estando dentro da ZH. Em sistemas planetários compactos como aqueles de estrelas anãs M³, por exemplo, os planetas podem estar em rotação síncrona com suas estrelas, de forma que uma de suas faces esteja sempre recebendo radiação estelar enquanto a outra permanece sempre escura. Essa sincronização ocorre progressivamente devido aos chamados efeitos de maré, que atuam como uma espécie de “atrito”

gravitacional entre corpos em órbita mútua e se torna mais relevantes para órbitas muito próximas. É o mesmo efeito que fez com que a Lua esteja sempre com a mesma face voltada para a Terra. No caso da rotação síncrona ocorrer entre um planeta e a sua estrela, a face do planeta sempre voltada para a estrela terá temperaturas permanentemente mais altas do que a face escura, situação que pode afetar de forma negativa as condições de habitabilidade. A temperatura de um planeta ou lua pode também ser afetada pelos próprios efeitos de maré (entre o planeta e a estrela e/ou entre o planeta e a lua), por fontes internas de calor, pela presença de uma atmosfera, pela atividade tectônica, dentre outros. Nenhuma dessas características dos exoplanetas é, no entanto, ainda acessível.

Em [9] e nos trabalhos subsequentes [10] e [11], são apresentados métodos para o cálculo dos limites da ZH levando em consideração uma atmosfera planetária hipotética composta por nitrogênio molecular (N₂), dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O) e cujas características variam apenas com a altitude. Esses trabalhos levam em consideração o fato de que a presença de algumas moléculas como CO₂ e H₂O na atmosfera de um planeta impede que o calor recebido da estrela seja totalmente reemitido de volta para o espaço. Esse processo, que nada mais é do que o efeito estufa que vem se acentuando na atmosfera terrestre, faz com que a temperatura do planeta se torne maior do que a temperatura de um planeta com as mesmas características, mas sem atmosfera. Os autores propõem duas possíveis definições para a ZH de uma estrela: uma conservadora e uma otimista.

A distância da borda interna da ZH conservadora é a aquela para a qual se inicia o chamado “efeito estufa descontrolado” (*runaway greenhouse*), que ocorre quando toda a água na superfície de um planeta rochoso é vaporizada e a atmosfera se torna opaca para radiação térmica. Nessa situação, a perda de água líquida da superfície é irreversível, visto que a presença de vapor de água na atmosfera aumentará o efeito estufa e o planeta se tornará ainda mais quente, impedindo que a água volte a se condensar. A borda externa da ZH conservadora se localiza na distância máxima da estrela tal que a temperatura de 273 K seja mantida com uma atmosfera de CO₂. De fato, mesmo que um planeta esteja a uma dis-

³As anãs M são as menores e mais frias estrelas da sequência principal, com luminosidade de até ~ 7% o valor da luminosidade do Sol.

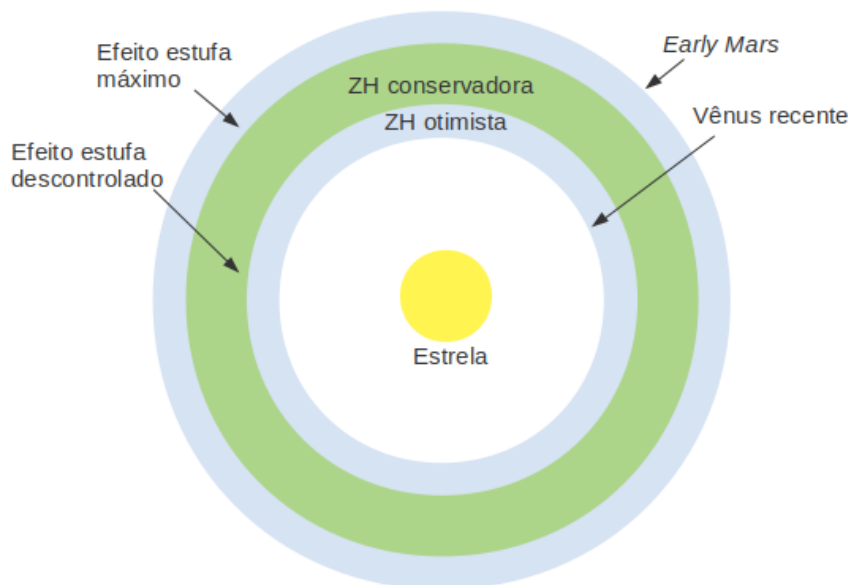


Figura 1: Representação das zonas habitáveis conservadora (em verde) e otimista (em azul) ao redor de uma estrela. Os limites que definem as bordas da ZH conservadora estão indicados na parte esquerda da figura e aqueles que definem as bordas da ZN otimista estão indicados na parte direita.

tância da estrela tal que a água congelaria na sua superfície de um planeta semelhante, mas sem atmosfera, o efeito estufa provocado pela presença de CO_2 na atmosfera será responsável por manter a temperatura do planeta acima de 273 K, que é a temperatura de fusão da água. No entanto, se a distância da estrela é grande o suficiente, o próprio dióxido de carbono irá se condensar na atmosfera, produzindo nuvens que, por terem alta refletividade, fazem com que grande parte da radiação térmica da estrela seja refletida de volta para o espaço. A partir desse ponto, conhecido como ponto de ‘efeito estufa máximo’ (*maximum greenhouse*), o planeta se tornará ainda mais frio. Ou seja, ao passo em que a borda interna da ZH é definida como a distância mínima da estrela para a qual o aquecimento devido ao efeito estufa ainda permite temperaturas abaixo de 373 K, a borda externa ocorre a uma distância máxima da estrela para a qual a temperatura do planeta pode ser mantida acima de 273 K devido ao efeito estufa.

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”). Na fi-

gura 1, essa ZH, conhecida como ZH otimista, está representada em azul, enquanto que a ZH conservadora está representada em verde.

É importante notar que, como as estrelas evoluem com o tempo, seu brilho muda e, como consequência também os limites de suas zonas habitáveis.

2.2 Habitabilidade no Sistema Solar

De acordo com as definições da seção anterior, a ZH conservadora atual do Sistema Solar compreende as órbitas da Terra e de Marte [11]. Mesmo levando em conta a ZH otimista, Mercúrio e Vênus estão sempre próximos demais da estrela, aquém da borda interna da ZH, e os planetas gigantes estão sempre em regiões do Sistema Solar frias demais, além da borda externa. Daqui a bilhões de anos, o Sol se transformará em um tipo de estrela maior, conhecida como gigante vermelha, o que fará com que a sua ZH se afaste dele. Se a posição dos planetas se mantiver como é atualmente, Terra e Marte sairão da ZH (estarão na região quente demais para manter água no estado líquido) enquanto que Júpiter e Saturno entrarão dentro da ZH.

Atualmente, a Terra é o único planeta que sabemos possuir água no estado líquido de forma permanente. No entanto, evidências observacionais 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 [12], obtida com o instrumento FRENDA [13] a bordo da missão ExoMars Trace Gas Orbiter [14].

No entanto, são as luas do Sistema Solar que apresentam maior interesse astrobiológico atualmente. De fato acredita-se na possível existência de um oceano de água líquida com mais água do que a Terra, sob uma camada de gelo em Europa, uma lua de Júpiter. Tal evidência foi descoberta pela missão Galileo⁴, da NASA, no final da década de 90. A missão Cassini⁵, também da NASA, foi a responsável por detectar erupções de plumas de gelo e vapor de água em Encélado, lua de Saturno, em 2005, também indicação de um possível oceano sob uma camada superficial de gelo. A mesma missão também foi responsável por estudar pela primeira vez a superfície de outra lua de Saturno, Titã, a qual descobriu ser coberta por corpos de hidrocarbonetos líquidos, além de ter encontrado evidências para a possível existência de água líquida subterrânea.

Apesar de estarem localizadas além da ZH do Sistema Solar, em uma região que fria demais para sustentar água superficial no estado líquido, os oceanos nestas luas poderiam se manter no estado líquido por não serem superficiais e talvez por terem níveis de salinidade diferentes do oceano terrestre. Além disso, como já mencionado anteriormente, a temperatura dos planetas e luas não depende unicamente da radiação da estrela, mas pode ser afetada por mecanismos internos, forças de maré, dentre outros.

O interesse astrobiológico destas luas motivou o desenvolvimento de novas missões espaciais previstas para a próxima década, como a Europa Clipper⁶, da NASA, que orbitará Júpiter, a Dragonfly⁷, também da NASA, que enviará um drone para sobrevoar Titã, e a JUICE⁸, da ESA, que estudará Júpiter e suas três maiores luas.

⁴<https://solarsystem.nasa.gov/missions/galileo>

⁵https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/main

⁶<https://europa.nasa.gov/>

⁷<https://www.nasa.gov/dragonfly>

⁸<https://sci.esa.int/web/juice>

3 Métodos de detecção de exoplanetas

Antes de listarmos exemplos de alguns exoplanetas interessantes em termos de habitabilidade, vamos primeiro descrever as técnicas que são utilizadas para detectar planetas fora do Sistema Solar.

Apesar de exoplanetas serem aparentemente muito comuns, ao menos na Via Láctea, o método de detecção conhecido como “imageamento direto”, que permite a obtenção de uma imagem do planeta, foi, até o momento, aplicado com sucesso a apenas algumas dezenas dos mais de 5000 exoplanetas conhecidos. Isso ocorre pois, 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, a luz refletida por um exoplaneta pode ser milhões ou até bilhões de vezes mais tênue do que a luz emitida por sua estrela. Desta forma, até o momento, técnicas de medida indiretas (nas quais não “vemos” o planeta diretamente, mas inferimos a sua presença através de efeitos sobre o movimento ou a emissão das estrelas) têm sido responsáveis pela detecção da grande maioria dos exoplanetas conhecidos. Nesta seção, vamos descrever 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 espaciais CoRoT, *Kepler*, K2 e TESS, e por diversos telescópios na Terra, foi o responsável pela descoberta de mais de 70% dos exoplanetas atualmente confirmados. Este método consiste na detecção da sutil 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 2. Para fins de comparação, um astrônomo fora do Sistema Solar observaria uma diminuição de $\sim 1\%$ no brilho do Sol durante um trânsito de Júpiter e de apenas $\sim 0,01\%$ durante um trânsito da Terra. Para que a variação do brilho da estrela possa ser percebida, é necessário que ela seja observada periodicamente, de modo a maximizar as chances de observá-la durante o trânsito. 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 constantemente

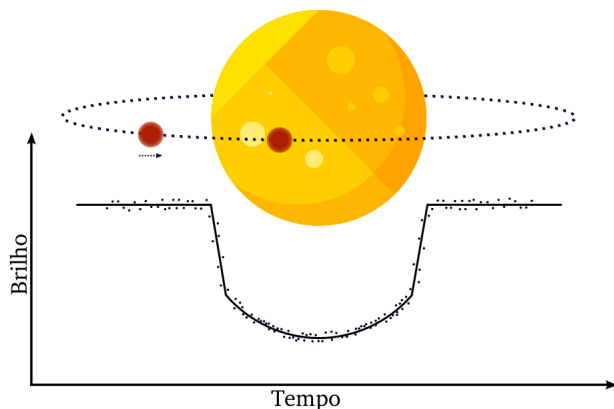


Figura 2: Ilustração da diminuição do brilho de uma estrela durante o trânsito de um planeta. Crédito: Raquel Gomes Gonçalves Farias [15].

o brilho de milhares de estrelas selecionadas.

A observação do trânsito de um planeta permite que sejam medidos o seu período orbital (o tempo que dura uma translação completa em torno da estrela) 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 mais próxima da estrela é a órbita do planeta, menor é o seu período orbital e mais frequentes serão os trânsitos, o que faz 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. Neste método, que foi responsável pela descoberta de $\sim 20\%$ dos exoplanetas confirmados até o momento, não é possível determinar a massa do planeta, mas apenas a chamada “massa mínima”, que é aquela que o planeta teria se estiver orbitando a estrela com uma inclinação de 90° , ou seja, com órbita ao longo da direção que liga à estrela à Terra.

Diferentemente do trânsito primário, que é um método de detecção fotométrico (ou seja, que observa apenas a variação do brilho da estrela como um todo, mas não nos detalhes do brilho em diferentes faixas de comprimento de onda da luz), o método da velocidade radial é baseado em observações espectroscópicas da estrela, ou seja, a luz da estrela deve ser observada para cada comprimento de onda separadamente. De fato, não é estritamente correto afirmar que os planetas orbitam uma estrela pois, na realidade, todos orbitam

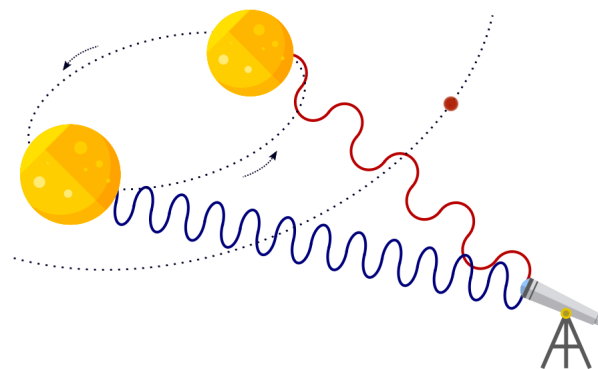


Figura 3: Ilustração do efeito Doppler observado na emissão de uma estrela que orbita o centro de massa do sistema planetário, em dois diferentes pontos da órbita de um de seus planetas, representado em vermelho. Crédito: Raquel Gomes Gonçalves Farias [15].

um ponto conhecido como “centro de massa” do sistema. Como, em geral, as estrelas têm massa muito maior do que as de seus planetas, a posição do centro de massa acaba, na prática, estando muito próxima da posição da estrela e o movimento que ela descreve em torno dele tem amplitude muito menor do que as órbitas dos planetas. O método da velocidade radial consiste na detecção espectroscópica desse movimento discreto da estrela em torno do centro de massa do sistema, como ilustrado na Figura 3. De fato, devido ao efeito Doppler, a frequência da luz emitida pela estrela sofrerá variações periódicas durante o movimento, que poderão ser observados espectroscopicamente. Como a posição do centro de massa da estrela será mais distante dela quanto menor for a razão entre sua massa e as massas dos seus planetas e quanto mais próximos eles orbitarem dela, o método da velocidade radial também tende a detectar planetas massivos próximos a estrelas menores e de baixa luminosidade.

Como esses dois métodos foram aqueles responsáveis pela maior parte das detecções de exoplanetas, foram 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. Um exemplo de um planeta com essas características é 51 Pegasi b, o primeiro exoplaneta descoberto orbitando uma estrela semelhante ao Sol.

O método responsável pelo terceiro maior número de detecções de exoplanetas ($\sim 3\%$ dos exo-

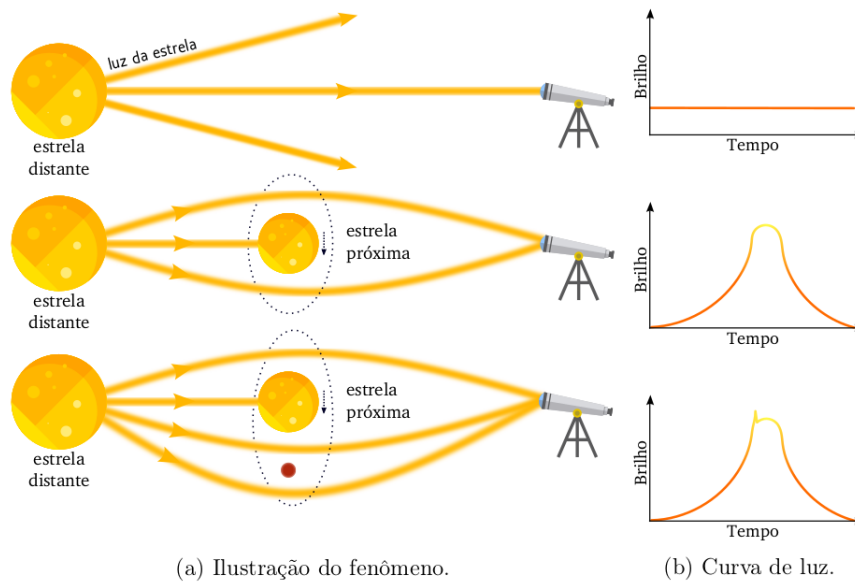


Figura 4: Ilustração da detecção de um exoplaneta pelo método de microlenteamento gravitacional. Nas imagens da esquerda, a luz de uma estrela distante é lenteada pela passagem de uma estrela mais próxima (que faz o papel de lente) na sua frente. Durante a passagem, o brilho da estrela mais distante 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 [15].

planetas confirmados até o momento) 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 4. O fenômeno conhecido como “lenteamento gravitacional”, descrito pela teoria da relatividade geral, ocorre quando a luz de corpos celestes distantes é defletida pelo efeito gravitacional de outros corpos localizados entre eles e a Terra (que exercem efeito similar ao de uma lente). Quando esse fenômeno ocorre com galáxias e aglomerados de galáxias, é possível observar imagens distorcidas dos objetos mais distantes, os chamados “arcos gravitacionais” ou até mesmo imagens múltiplas de um mesmo objeto. O microlenteamento gravitacional é o lenteamento de estrelas, que produz variações no brilho de estrelas distantes quando corpos celestes passam entre elas e a Terra. Durante a passagem do corpo celeste, o brilho da estrela distante sofre uma magnificação, como ilustrado no quadro do meio da Figura 4. Se esse corpo celeste for uma estrela que possui um ou mais planetas, a gravidade do planeta também afetará a trajetória da luz da estrela distante e a haverá uma magnificação adicional em seu brilho, como ilustrado no painel inferior da Figura 4. Como os efeitos

de lenteamento estão relacionados ao campo gravitacional dos corpos que atuam como lentes, a detecção de um exoplaneta através desse método permite a determinação de sua massa.

O restante das detecções de exoplanetas foi realizado com métodos promissores mas ainda pouco produtivos, tais como os métodos de variação temporal (TTV - *Transit Timing Variation* - e TDV - *Transit Duration Variation*) [16], que detectam exoplanetas através da observação de pequenas variações na periodicidade e na duração nos trânsitos de outro exoplaneta já conhecido do mesmo sistema planetário. Em outro método de detecção conhecido como *eclipse timing variation* (ver, por exemplo, [17]), que já foi aplicado a algumas dezenas de exoplanetas, são detectadas pequenas perturbações na órbita de um sistema de estrelas binárias eclipsantes devido à presença de exoplanetas. Outros métodos como o de astrometria, em que procura-se por perturbações no movimento de uma estrela devido à presença de exoplanetas, e de trânsito secundário, em que observa-se a queda no brilho do sistema estrela + planeta quando o planeta está atrás da estrela, ainda não produziram muitos resultados.

Muitos dos exoplanetas conhecidos já foram observados com mais de um dos métodos descritos acima, o que permite a obtenção de uma

maior quantidade de informação sobre eles. A detecção de um planeta pelos métodos de trânsito primário e velocidade radial, por exemplo, permite a determinação de sua massa verdadeira, e não apenas de sua massa mínima, além do seu período orbital e raio.

Atualmente, 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 até o momento, espera-se que as técnicas de TTV e TDV possam gerar resultados na próxima década.

4 Exoplanetas habitáveis

Diante das atuais limitações observacionais e para fins de uma procura ampla por exoplanetas habitáveis, vamos considerar 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.

Na Figura 5 é possível ver o raio e a massa (ou massa mínima) de 976 exoplanetas que possuem esses parâmetros medidos. Os dados foram extraídos da base de dados *Nasa Exoplanet Archive*⁹, que reúne informação sobre todos os exoplanetas confirmados e os candidatos. É possível notar que os exoplanetas parecem se separar no gráfico em dois grupos distintos: um na parte esquerda e inferior do gráfico (valores menores de massa e raio) e outro na parte direita superior do gráfico (maiores valores de massa e raio). Essa separação corresponderia à diferentes composições dos planetas, sendo os rochosos menores e com menos massa e os gigantes maiores e mais massivos. Os pontos vermelho e azul correspondem à posição no gráfico de Júpiter e da Terra, respectivamente, que são exemplos de um planeta gigante e um rochoso no Sistema Solar.

A fim de determinar quantos desses planetas são habitáveis, vamos utilizar dados atualizados em dezembro de 2021 do catálogo “The Habita-

ble Exoplanets Catalog”¹⁰, mantido pela Universidade de Porto Rico em Arecibo. Nele, consta um total de 59 exoplanetas classificados como potencialmente habitáveis por estarem dentro da ZH otimista de suas estrelas e por terem raios entre $0,5R_{\oplus}$ e $3R_{\oplus}$ ($R_{\oplus} \simeq 6370$ km é o raio da Terra) e massa (ou massa mínima) entre $0,1M_{\oplus}$ e $10M_{\oplus}$ ($M_{\oplus} \simeq 5,9 \times 10^{24}$ kg é a massa da Terra). A região cinza na Figura 5 é delimitada pelos valores de massa e raio citados acima e os pontos coloridos representam os 59 planetas potencialmente habitáveis. Notem que alguns planetas se encontram dentro da região cinza, ou seja, possuem valores de massa e raio dentro da faixa especificada, porém não satisfazem o critério de se estarem localizados dentro da ZH de suas estrelas.

Dos 59 exoplanetas potencialmente habitáveis, 21 têm maior probabilidade de serem rochosos (representados em verde na Figura 5 e listados na tabela da Figura 6), pois apresentam raios entre $0,5R_{\oplus}$ e $1,6R_{\oplus}$ e massas entre $0,1M_{\oplus}$ e $3M_{\oplus}$. Estes planetas pertencem todos à classe de exoplanetas similares à Terra (*Earth-like*), com exceção de TRAPPIST-1 d que é menos massivo e tem tamanho similar ao de Marte. Os outros 38 exoplanetas da lista são classificados como “super-Terras” ou “mini-Netunos”, classes de planetas com valores de massa e raio entre os da Terra e os de Netuno, que são encontrados no Sistema Solar.

Na Figura 6 é possível notar que os nomes do exoplanetas são sempre compostos pelo nome da estrela e uma letra minúscula (a partir da letra “b”, visto que se considera que a letra “a” denota a própria estrela), que denota a ordem de descoberta do planeta naquele sistema. Dentre estes 21 exoplanetas com maior probabilidade de serem rochosos, alguns se tornaram muito conhecidos na literatura. O sistema planetário da estrela TRAPPIST-1 [18], por exemplo, que foi descoberto em 2016 pelo telescópio Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST) [19], localizado no Chile, contém 7 planetas rochosos. Suas massas variam 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 que corresponde a valores entre 25% e 112% da ra-

⁹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

¹⁰<https://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

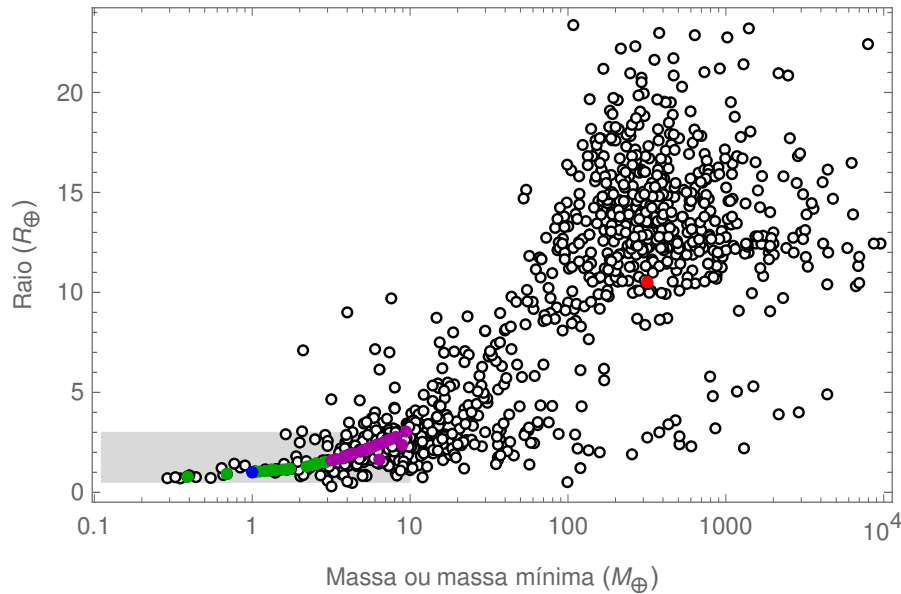


Figura 5: Raio como função da massa (ou massa mínima) para 976 exoplanetas com esses parâmetros disponíveis na base de dados NASA Exoplanet Archive. A região em cinza representa os limites de raio e massa impostos para obter o conjunto de 59 exoplanetas potencialmente habitáveis, de acordo com o The Habitable Exoplanets Catalog. Os pontos verdes e roxos representam esses 59 planetas, sendo os verdes aqueles considerados com maior probabilidade de serem rochosos. Os pontos azul e vermelho representam a posição no gráfico da Terra e de Júpiter respectivamente.

dição recebida na Terra pelo Sol. No entanto, por orbitarem uma estrela do tipo anã M, que já vimos ser menor e menos massiva que o Sol, esses planetas estão tão próximos da 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. [20] apresenta uma revisão sobre esse sistema planetário e considerações sobre a sua habitabilidade. O recém lançado telescópio espacial *James Webb* [21] tem como um dos seus principais objetivos a caracterização das atmosferas dos planetas do sistema TRAPPIST-1 e esperamos que, em breve, saibamos mais sobre as características desse sistema planetário.

Podemos utilizar o chamado “índice de similaridade com a Terra” (*Earth Similarity Index*, ESI) [22], 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 índice 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, os planetas dentro da ZH do sistema TRAPPIST-1 possuem ESI entre 0,58 e 0,91. Para comparação, os valores do índice ESI para Marte e Vênus são 0,70 e 0,44 respectivamente.

Os planetas listados na Figura 6 estão dispostos em ordem decrescente do índice ESI. Vemos que o exoplaneta atualmente com maior índice ESI é o Teegarden b, com ESI de 0,95. Este planeta, que orbita a estrela anã M 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 M e possuem ESI de 0,93 e 0,92 respectivamente. A sigla “TOI” significa “TESS *Object of Interest*” e TOI-700 d foi o primeiro planeta rochoso dentro da ZH descoberto pela missão TESS. Ele recebe de sua estrela aproximadamente 87% da radiação recebida pela Terra do Sol porém, assim como ocorre com os planetas do sistema TRAPPIST-1, acredita-se que ele esteja 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. 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. Proxima Centauri b possui ESI de 0,87 e

Nome	M (M_{\oplus})	R (R_{\oplus})	ESI
● Terra	1	1	1
● Teegarden b	1,05	1,02	0,95
● TOI-700 d	1,57	1,14	0,93
● Kepler-1649 c	1,20	1,06	0,92
● TRAPPIST-1 d	0,39	0,78	0,91
● Proxima Centauri b	1,27	1,08	0,87
● K2-72 e	2,21	1,29	0,87
● GJ 1061 d	1,64	1,15	0,86
● GJ 1061 c	1,74	1,18	0,86
● Ross 128 b	1,40	1,11	0,86
● GJ 273 b	2,89	1,51	0,85
● Kepler-296 e	2,96	1,52	0,85
● TRAPPIST-1 e	0,69	0,92	0,85
● Kepler-442 b	2,36	1,35	0,84
● GJ 667 C f	2,54	1,45	0,76
● Kepler-62 f	–	1,41	0,68
● TRAPPIST-1 f	1,04	1,04	0,68
● Teegarden c	1,11	1,04	0,68
● Kepler-1229 b	2,54	1,40	0,62
● Kepler-186 f	1,71	1,17	0,61
● GJ 667 C e	2,54	1,45	0,60
● TRAPPIST-1 g	1,32	1,13	0,58

Figura 6: Lista dos 21 exoplanetas com maior índice ESI de acordo com o The Habitable Exoplanets Catalog. A primeira linha contém as informações do planeta Terra, para fins de comparação. Na primeira coluna contém um círculo que representa o tamanho de cada exoplaneta, a ser comparado com o círculo na primeira linha, que representa o tamanho da Terra. As outras colunas contêm o nome, a massa (ou massa mínima), em unidades de massa da Terra, o raio, em unidades de raio da Terra, e o índice ESI de cada exoplaneta.

5 Perspectivas

O estudo das zonas habitáveis estelares auxilia na seleção de planetas a serem analisados de forma mais detalhada porém, 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. A detecção das chamadas “bioassinaturas” ou das “tecnoassinaturas” é a aposta atual para uma eventual confirmação da existência de vida fora da Terra. Enquanto bioassinaturas consistem em evidências que indiquem atividade biológica, as tecnoassinaturas são indícios da existência de uma civilização avançada, como por exemplo o uso de tecnologia ou evidências de atividade industrial.

Atualmente, existe grande expectativa pela

descoberta de bioassinaturas através da análise da atmosfera de exoplanetas. Essas bioassinaturas consistiriam na detecção da existência de algumas moléculas que na Terra estão associadas à vida, como o ozônio e o metano, por exemplo, na atmosfera desses planetas. A hipótese da existência de vida nas nuvens de Vênus, baseada na detecção da molécula de fosfina [23], é um exemplo da procura por uma bioassinatura na atmosfera desse planeta. Espera-se que o telescópio espacial *James Webb* em breve apresente resultados sobre as características das atmosferas de exoplanetas próximos.

Outros tipos de bioassinaturas também podem indicar a existência de vida em outro planeta, como por exemplo a eventual detecção da variação sazonal da refletividade de sua superfície, que pode estar relacionada a variações na cobertura vegetal do planeta em diferentes estações do ano. A grandeza conhecida como “albedo” planetário é uma medida dessa refletividade, mas não leva em conta apenas a refletividade da superfície do planeta, mas sim a refletividade global, que pode ser afetada, por exemplo, pela existência de nuvens.

A procura por tecnoassinaturas atualmente tem se concentrado na procura por emissões eletromagnéticas que indiquem a existência de vida inteligente fora da Terra. O maior exemplo é o programa SETI¹¹, que desde a década de 80 procura por sinais de rádio emitidos por civilizações extraterrestres, usando radiotelescópios em diferentes continentes. O anúncio de um possível sinal de rádio proveniente do sistema Proxima Centauri em 2021 [24] é um exemplo do que poderia ser uma tecnoassinatura. Essa descoberta, que foi descartada posteriormente, foi realizada como parte do programa Breakthrough Listen¹², que teve início em 2016.

Além dos programas já mencionados, o advento de instrumentos cada vez mais precisos, como por exemplo o espectrógrafo CODEX (*COsmic Dynamics and EXo-earth experiment*) [25], que será instalado no telescópio ELT¹³ (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) [26], esperamos que se inicie uma nova fase

¹¹<https://www.seti.org/>

¹²<https://breakthroughinitiatives.org/initiative/1>

¹³<https://elt.eso.org/>

no estudo dos exoplanetas e na procura por vida fora da Terra.

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 figuras que ilustram os métodos de detecção de exoplanetas apresentadas neste trabalho.

Sobre a autora

Beatriz Blanco Siffert (beatriz@caxias.ufrj.br) possui Bacharelado (2004) e Doutorado (2008) em Física pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Possui pós-doutorados na Universidade de Nápoles, Itália, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e no Instituto de Física da UFRJ. Tem experiência nas áreas de física de astropartículas, cosmologia e astrofísica, tendo trabalhado com anisotropia de raios cósmicos no Observatório Pierre Auger, detecção indireta de matéria escura, modelos cosmológicos com ricochete, e atualmente com a detecção de supernovas do tipo Ia e astrobiologia. Atualmente é professora adjunta de física no Campus Duque de Caxias da UFRJ.

Referências

- [1] A. Wolszczan e D. A. Frail, *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, *Nature* **355**(6356), 145 (1992).
- [2] M. Mayor e D. Queloz, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, *Nature* **378**(6555), 355 (1995).
- [3] R. Di Stefano et al., *A possible planet candidate in an external galaxy detected through X-ray transit*, *Nature Astronomy* **5**, 1297 (2021).
- [4] W. J. Borucki et al., *Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results*, *Science* **327**(5968), 977 (2010).
- [5] S. B. Howell et al., *The K2 Mission: Characterization and Early Results*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **126**(938), 398 (2014). [ArXiv:1402.5163](https://arxiv.org/abs/1402.5163).
- [6] M. Auvergne et al., *The CoRoT satellite in flight: description and performance*, *Astronomy & Astrophysics* **506**(1), 411 (2009). [ArXiv:0901.2206](https://arxiv.org/abs/0901.2206).
- [7] G. R. Ricker et al., *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **1**, 014003 (2015).
- [8] J. Schneider et al., *Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database*, *Astronomy & Astrophysics* **532**, A79 (2011). [ArXiv:1106.0586](https://arxiv.org/abs/1106.0586).
- [9] J. F. Kasting, D. P. Whitmire e R. T. Reynolds, *Habitable Zones around Main Sequence Stars*, *Icarus* **101**(1), 108 (1993).
- [10] R. K. Kopparapu et al., *Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates*, *Astrophys. J.* **765**(2), 131 (2013). [ArXiv:1301.6674](https://arxiv.org/abs/1301.6674).
- [11] R. K. Kopparapu et al., *Habitable Zones around Main-sequence Stars: Dependence on Planetary Mass*, *Astrophys. J. Letters* **787**(2), L29 (2014). [ArXiv:1404.5292](https://arxiv.org/abs/1404.5292).
- [12] I. Mitrofanov et al., *The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of valles marineris on mars*, *Icarus* **374**, 114805 (2022).
- [13] I. Mitrofanov et al., *Fine resolution epithermal neutron detector (frend) onboard the exomars trace gas orbiter*, *Space Science Reviews* **214** (2018).
- [14] J. Vago et al., *ESA ExoMars program: The next step in exploring Mars*, *Solar System Research* **49**, 518 (2015).
- [15] R. G. G. Farias, *Influência de características orbitais e atmosféricas na estabilidade da temperatura de exoplanetas*, Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Ciências Biológicas: Biotecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2019).

- [16] D. M. Kipping, *Transit timing effects due to an exomoon*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **392**(1), 181 (2009). [ArXiv:0810.2243](#).
- [17] J. W. Lee et al., *The sdB+M Eclipsing System HW Virginis and its Circumbinary Planets*, *Astronom. J.* **137**(2), 3181 (2009). [ArXiv:0811.3807](#).
- [18] M. Gillon et al., *Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1*, *Nature* **542**(7642), 456 (2017). [ArXiv:1703.01424](#).
- [19] M. Gillon et al., *Temperate Earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star*, *Nature* **533**(7602), 221 (2016). [ArXiv:1605.07211](#).
- [20] M. Turbet et al., *A Review of Possible Planetary Atmospheres in the TRAPPIST-1 System*, *Space Science Reviews* **216**(5), 100 (2020). [ArXiv:2007.03334](#).
- [21] D. R. Louie et al., *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 (2018). [ArXiv:1711.02098](#).
- [22] D. Schulze-Makuch et al., *A Two-Tiered Approach to Assessing the Habitability of Exoplanets*, *Astrobiology* **11**(10), 1041 (2011).
- [23] J. S. Greaves et al., *Phosphine gas in the cloud decks of Venus*, *Nature Astronomy* **5**, 655 (2021). [ArXiv:2009.06593](#).
- [24] S. Smith et al., *A radio technosignature search towards Proxima Centauri resulting in a signal of interest*, *Nature Astronomy* **5**, 1148 (2021). [ArXiv:2111.08007](#).
- [25] L. Pasquini et al., *CODEX: the high-resolution visual spectrograph for the E-ELT*, in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, editado por I. S. McLean e M. M. Casali, International Society for Optics and Photonics (SPIE, 2008), vol. 7014, 573 – 581.
- [26] H. Rauer et al., *The PLATO 2.0 mission*, *Experimental Astronomy* **38**(1-2), 249 (2014). [ArXiv:1310.0696](#).