

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

BRANDON OLIVEIRA BEZERRA

Sistemas exoplanetários

Guaratinguetá

2021

Brandon Oliveira Bezerra

Sistemas exoplanetários

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Bacharelado em Física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Bacharelado em Física.

Orientador: Prof^a Dra. Silvia Maria Giuliatti Winter

Guaratinguetá
2021

B574s	Bezerra, Brandon Oliveira Sistemas exoplanetários / Brandon Oliveira Bezerra – Guaratinguetá, 2021. 74 f : il. Bibliografia: f. 66-74 Trabalho de Graduação em Física (Bacharelado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Silvia Maria Giuliatti Winter 1. Exoplanetas. 2. Sistema solar. 3. Astrometria. I. Título. CDU 521.9
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

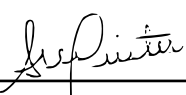
BRANDON OLIVEIRA BEZERRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM
BACHARELADO EM FÍSICA"

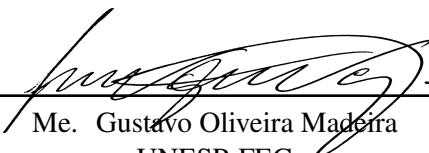
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
BACHARELADO EM FÍSICA

Prof. Dr. JULIO MARNY HOFF DA SILVA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Profª Dra. Silvia Maria Giuliatti Winter
Orientador/UNESP-FEG



Me. Gustavo Oliveira Madeira
UNESP-FEG



Me. Gerson de Oliveira Barbosa
Membro Externo

Março, 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais, pelo contínuo apoio e por sempre estarem presentes em todos os momentos.

À minha família, por me incentivarem a alcançar meus sonhos.

Aos meus amigos, por fazerem parte da minha jornada e por todas as memórias que vamos guardar juntos.

À professora Silvia, pelo auxílio e orientação na elaboração deste trabalho.

Aos meus professores, da FEG e os anteriores, por todo o esforço empregado na minha formação e dos meus colegas.

A todos que participaram tanto direta quanto indiretamente da confecção deste trabalho e da minha jornada até aqui.

E a Deus, por tornar tudo isso possível.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Processo número 2016/24561-0.

“Inteligências exteriores, ao explorar o Sistema Solar com verdadeira imparcialidade, muito provavelmente introduziriam o Sol nos seus ficheiros assim: Estrela X, classe espectral G0, 4 planetas e detritos.”

(Isaac Asimov)

RESUMO

Além do Sistema Solar existem mais de 3000 sistemas estelares compostos por estrelas desde anãs até supergigantes, orbitadas por mais de 4000 exoplanetas de variados tipos, pequenos e rochosos, gigantes e gasosos, alguns desses tipos não vistos no Sistema Solar. Para detectar e confirmar esses mundos são empregadas uma série de métodos, cada um com suas vantagens. Alguns deles utilizados por bem-sucedidas missões espaciais, cujo objetivo é principalmente detectar efeitos causados por exoplanetas orbitando as estrelas de seus sistemas. Há planetas solitários em sistemas pequenos, em sistemas compostos por mais de uma estrela, por vários planetas, ou mesmo orbitando objetos diferentes. Como a Terra, existem aqueles na zona habitável de suas estrelas, região onde a água pode existir em seu estado líquido, condição associada às possíveis formas de vida. E da mesma forma que no Sistema Solar, existem corpos além das estrelas e planetas, são as exoluas, os exocometas, asteroides e exoanéis, alguns deles já confirmados e outros ainda candidatos. A primeira detecção e confirmação de objetos nunca vistos antes é difícil e delicada, mas com o futuro avanço tecnológico e o surgimento de equipamentos mais precisos, poderá ser feita a caracterização de sistemas e corpos que não são capazes de ser observados hoje. O presente trabalho visa elucidar termos e conceitos frequentes no tema de sistemas exoplanetários, apresentar dados importantes e alguns exemplos de exoplanetas e objetos extrassolares.

PALAVRAS-CHAVE: Exoplanetas. Exoluas. Sistemas extrassolares.

ABSTRACT

Beyond the Solar System there are more than 3000 stellar systems composed of since dwarfs to supergiant stars, orbited by more than 4000 exoplanets divided in several types, small and rocky, giant and gaseous, some of which are not seen in the Solar System. Several methods are used in order to detect and confirm these worlds, each one with its own advantages. Successful space missions use some of them, aiming mainly to detect certain effects caused by exoplanets orbiting their systems' stars. There are lone planets in small systems, in systems with more than one star, with several planets, or even orbiting different bodies. Like Earth, there are those within their stars' habitable zone, region where water exists in its liquid form, what is usually related to possible life forms. In the same way as in the Solar System, there may be other objects than stars and planets, they are the exomoons, exocomets, asteroids and exorings, some of which are already confirmed, while others are still candidates. Detecting and confirming objects that were never seen before is a difficult and delicate task, but with advanced technology in the near future there will be more precise equipments able to characterize systems and bodies which are unable to be observed nowadays. This work aims to clarify frequent terms and concepts regarding exoplanetary systems, present important data and a few examples of exoplanets and extrasolar objects.

KEYWORDS: Exoplanets. Exomoons. Extrasolar systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Distribuição de exoplanetas em função da massa (massa da Terra) e raio (raio da Terra)	16
Figura 2	Distribuição de exoplanetas em função da massa (massas de Júpiter) e período .	17
Figura 3	Distribuição de exoplanetas em função da excentricidade e período	17
Figura 4	Movimento astrométrico de DENIS-P J082303.1-491201 e sua órbita baricêntrica	19
Figura 5	Gráfico de velocidade radial de OGLE-TR-56	20
Figura 6	Função de correlação cruzada	21
Figura 7	Dados de velocidade radial de HD 114762	21
Figura 8	Velocidades Doppler de HD 30339	22
Figura 9	Dados fotométricos de HD 209458	22
Figura 10	Dados de trânsito de HD 209458	23
Figura 11	Dados de trânsito de OGLE-TR-56	23
Figura 12	Ilustração do método de microlentes	25
Figura 13	Curva de luz com modelos de OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53 . . .	26
Figura 14	Aproximação e modelos de OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53	27
Figura 15	Zona habitável de Gliese 581	28
Figura 16	Órbita e zona habitável do sistema HD 80606	29
Figura 17	Representação artística do satélite CoRoT	30
Figura 18	Representação artística da nave Kepler	31
Figura 19	Representação artística da nave PLATO	33
Figura 20	Nave e módulos da missão PLATO	34
Figura 21	Satélite TESS	35
Figura 22	Diagrama de Hertzsprung-Russell	37
Figura 23	Evolução estelar	38
Figura 24	Distribuição de exoplanetas por tipo	39
Figura 25	Classificação de exoplanetas em categorias	39
Figura 26	Órbita do sistema Kepler-90	42
Figura 27	Órbitas possíveis de exoplanetas em sistemas binários	43
Figura 28	Exemplo de colisão de um planeta com uma estrela secundária em um sistema binário	44
Figura 29	Dados de trânsito do sistema TRAPPIST-1	47
Figura 30	Órbitas planetárias de TRAPPIST-1	48
Figura 31	Curva de luz de K2-141 b	49
Figura 32	Trânsito dos planetas de Kepler-186	51
Figura 33	Comparação de sistemas planetários	52
Figura 34	Região de estabilidade de exosatélites prógrados	55
Figura 35	Diagrama de um sistema estrela-exoplaneta-exolua-sub-lua	58

Figura 36	Curva de luz do sistema de anéis de J1407 b	60
Figura 37	Modelo de anéis de J1407 b	61
Figura 38	Trânsito de um exocometa	62
Figura 39	Exocometa 2I/Borisov	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de detecção e número de exoplanetas detectados	18
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	EXOPLANETAS	15
2.1	DEFINIÇÃO	15
2.2	DADOS	16
2.3	MÉTODOS DE DETECÇÃO	18
2.3.1	Astrometria	18
2.3.2	Velocidade radial	19
2.3.3	Trânsito	22
2.3.4	Cronometria de Pulsares	24
2.3.5	Microlente gravitacional	25
2.4	ZONA HABITÁVEL	27
2.5	MISSÕES	29
2.5.1	CoRoT	29
2.5.2	Kepler	31
2.5.3	PLATO	32
2.5.4	TESS	35
2.6	EVOLUÇÃO ESTELAR	36
2.7	TIPOS DE EXOPLANETAS	38
2.7.1	Tipo Terra	40
2.7.2	Super-Terra	40
2.7.3	Tipo Netuno	40
2.7.4	Gigante gasoso	41
2.8	SISTEMAS EXOPLANETÁRIOS	41
2.8.1	Kepler-90	41
2.8.2	Estrelas binárias	43
2.8.3	TRAPPIST-1	46
2.9	EXEMPLOS DE EXOPLANETAS	48
2.9.1	K2-141 b	49
2.9.2	Kepler-186 f	51
3	OBJETOS EXTRASSOLARES	54
3.1	EXOLUAS	54
3.1.1	Regiões possíveis e habitabilidade	54
3.1.2	Métodos de detecção	56
3.1.3	Kepler-1625 b-I	56
3.2	SUB-LUAS	57

3.3	EXOANÉIS	59
3.4	EXOCOMETAS	61
4	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A existência de vida em outros planetas sempre foi um dos grandes questionamentos do ser humano. A humanidade está sozinha no Universo? Há outras formas de vida em algum lugar? Se sim, elas seriam inteligentes como os humanos?

Giordano Bruno, padre e filósofo do século XVII, foi um dos primeiros que fez perguntas semelhantes. Entre suas várias ideias, algumas das mais famosas - e que tiveram um grande peso na sua condenação pela Igreja -, são as de que o Sol é somente uma entre tantas estrelas, e que várias delas poderiam possuir planetas orbitando ao seu redor.

Condenado à morte, Giordano não pôde viver para descobrir que estava certo. Hoje, há mais de 4000 exoplanetas descobertos, e mais de 5000 candidatos à espera de confirmação, de acordo com dados de NASA Exoplanet Archive (2021a).

Desde a confirmação dos primeiros exoplanetas descobertos por Wolszczan e Frail (1992), e Mayor e Queloz (1995), cresceu o interesse geral nesse tipo de exploração espacial, a busca por mundos espalhados pelo Universo, pertencentes a outros sistemas, orbitando outras estrelas, possuindo características e composições diferentes das que a humanidade conhecia. As décadas seguintes marcaram as primeiras descobertas e confirmações de tais mundos, utilizando telescópios avançados para observar seus trânsitos, medir suas velocidades, descobrir suas dimensões e inferir suas composições.

Ao longo das últimas décadas houve um avanço enorme no número de detecções de exoplanetas, com equipamentos e técnicas cada vez mais precisas, e sistemas de detecção autônomos, que são responsáveis pela maior parte das detecções. Até 2013 eram detectados cerca de 140 exoplanetas por ano, mas com o anúncio da missão Kepler da Nasa em 26 de fevereiro de 2014, segundo Johnson e Harrington (2014), esse número subiu para mais de 850 planetas naquele ano. Utilizando uma técnica chamada de verificação por multiplicidade, o telescópio conseguiu analisar estrelas com mais de um planeta candidato, para direcionar sua busca priorizando tais sistemas ao invés de observações de sistemas simples, que possuem apenas um planeta. Desde o início da busca por planetas fora do Sistema Solar, já foram elaboradas novas técnicas de detecção, cada uma única em seus pontos fortes, sendo preferíveis em certos casos.

O planeta Terra já passou por muitas fases, eras, desde a sua formação. Cada uma delas foi marcada por suas características e resultaram no que a Terra é hoje: um planeta rochoso, relativamente pequeno, e cuja pressão, temperatura, incidência de luz solar, e o fato de possuir água líquida em grande parte de sua superfície, entre outras características, tornaram possível a existência e evolução da vida como se conhece. O que se sabe hoje é resultado de estudos de como a vida foi no passado, desde os seus primórdios até atualmente.

Com o estudo de exoplanetas é possível não só descobrir novos mundos dos mais variados tipos - planetas gigantes, frios, cobertos de lava e água -, como também estudar seu processo de evolução. Nessa busca, já foram encontrados planetas semelhantes à Terra em composição. Estudando tais planetas “terrestres”, pode-se ter uma noção de como a Terra evoluiu em suas eras passadas.

A Terra está em uma região ao redor do Sol em que a água pode existir no estado líquido. Esse é o

fator principal que define o conceito de “zona habitável”, que é necessário para que a vida no geral, como se conhece hoje em dia, ocorra.

Ao procurar e estudar planetas que se encontram na zona habitável de suas estrelas, pode-se talvez ter a chance de responder à tão antiga questão: a humanidade está sozinha no Universo? Para que a vida possa vir a ocorrer, é necessária uma série de fatores e condições específicas, que garantam um ambiente propício a isso. Essas condições de habitabilidade em exoplanetas não são vistas com frequência, ao se comparar com o número total de planetas (descobertos até agora), o que torna essa busca ainda mais trabalhosa.

Hoje a busca por exoplanetas é robusta, contando com várias campanhas de observação de telescópios, e também com as missões espaciais elaboradas especificamente para isso. Para detectar os exoplanetas, entre outras técnicas, as missões observam a luz de milhares de estrelas ao mesmo tempo, à procura de quedas em sua intensidade, o que por vezes denuncia a existência de um planeta. Há vários catálogos com numerosas informações sobre os exoplanetas, tanto confirmados quanto candidatos de missões, planetas orbitando sistemas de múltiplas estrelas, mundos potencialmente habitáveis.

Da mesma forma que há objetos entre o Sol e os planetas no Sistema Solar, eles também podem ser formados e estarem espalhados por outros sistemas na galáxia. Exoluas, satélites naturais de exoplanetas; exocometas, cometas de fora do Sistema Solar; sub-luas, objetos que orbitam as exoluas, satélites de satélites; exoanéis, anéis presentes em exoplanetas. Embora apenas alguns tenham sido confirmados, há interesse em saber como tais objetos podem ter se formado e como evoluem em seus sistemas, com a vantagem de servirem de comparação em relação aos próprios do Sistema Solar.

Existem estudos interessados na possível habitabilidade, por exemplo, de exoluas, como os de Heller (2012) e Martínez-Rodríguez et al. (2019). Já foram descobertos oceanos subterrâneos de água em luas dos planetas gigantes gasosos no Sistema Solar, como em Encélado e Europa; se um processo semelhante se der em um exoplaneta e tanto ele quanto sua lua se encontrarem na zona habitável de sua estrela, ela pode ter chances de ser habitável, levando-se em conta parâmetros semelhantes aos analisados na habitabilidade de exoplanetas.

O futuro da exploração exoplanetária e de objetos extrassolares tem em vista análises cada vez mais precisas, telescópios e missões espaciais cada vez mais avançados e tecnologias mais modernas aplicadas à sua busca. Com equipamentos mais avançados, será possível analisar com maior precisão a composição das atmosferas, superfícies e até interiores de exoplanetas. Dados esses que serão de grande importância na futura determinação da habitabilidade de tais sistemas.

O objetivo do presente trabalho é: expor e explicar conceitos importantes no universo de sistemas exoplanetários, como a zona habitável e a evolução estelar. Discorrer sobre o funcionamento de algumas técnicas conhecidas para a detecção de exoplanetas, e algumas missões que as utilizam. E apresentar diferentes sistemas, dados e alguns dos exoplanetas confirmados, além de alguns objetos extrassolares confirmados e outros ainda sem confirmação.

O texto está dividido em 4 capítulos. No capítulo 1, foi feita uma breve introdução do tema, o capítulo 2 tratará de expor conceitos e informações importantes sobre exoplanetas, no capítulo 3 será discutido sobre objetos extrassolares e suas características, e a conclusão será feita no capítulo 4.

2 EXOPLANETAS

2.1 DEFINIÇÃO

A definição atual de um exoplaneta, feita pela Comissão F2 da IAU (*International Astronomical Union* - União Astronômica Internacional): Exoplanetas e o Sistema Solar, em agosto de 2018, é a seguinte:

- Objetos com massas verdadeiras abaixo da massa limite para fusão termo-nuclear do deutério (atualmente calculada como 13 massas de Júpiter para objetos de metalicidade solar) que orbitam estrelas, anãs marrons ou remanescentes estelares e que têm uma razão de massa com o objeto central abaixo da instabilidade L_4/L_5 ($M/M_{central} < 2/(25 + \sqrt{621}) \approx 1/25$) são considerados “planetas” (independentemente de como se formaram).
- A massa ou tamanho mínimo necessários para um objeto extrassolar ser considerado um planeta devem ser os mesmos usados no Sistema Solar.
- Espera-se que esta definição evolua conforme o conhecimento acerca do tema cresça.

(INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION, 2020a, tradução nossa)

Tem-se, então, que para um objeto ser considerado um exoplaneta, ele deve ter um limite máximo de massa, e orbitar certos objetos. O critério de massa leva em conta o fenômeno de reações nucleares que ocorrem dentro do planeta, quando sua massa ultrapassa a marca de 13 massas de Júpiter. Quando isso acontece, o corpo passa a ser considerada uma estrela. O limite de 13 massas de Júpiter foi definido pois em objetos com massas superiores, segundo Sutter (2019), a pressão em seus núcleos torna-se grande o suficiente para que eles iniciem um processo de fusão nuclear; ou seja, eles se tornam estrelas.

A estrela deve ter uma massa pelo menos maior que 25 vezes a do objeto para que seus pontos L_4 e L_5 de Lagrange (pontos em uma órbita em que a resultante entre a força gravitacional dos objetos e a força centrípeta são aproximadamente zero) sejam estáveis.

O segundo item dos critérios constata os limites mínimos como os vistos no próprio Sistema Solar, enquanto o terceiro espera que tais definições possam ser alteradas no futuro conforme se adquira mais conhecimento acerca de exoplanetas.

Já a definição de um planeta no Sistema Solar, segundo a Resolução B5 da IAU de 2006, é a de um corpo celestial que:

- está em órbita ao redor do Sol;
- tem massa suficiente para que a sua própria gravidade vença forças de corpo rígido, para que ele assuma um formato de equilíbrio hidrostático (quase redondo);
- limpou toda a vizinhança de sua órbita.

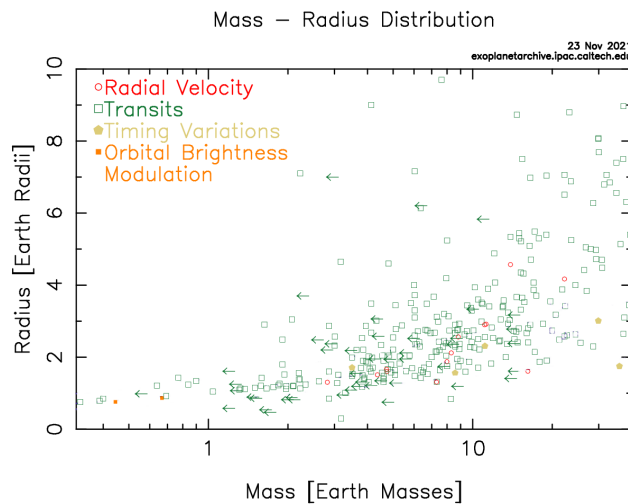
(INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION, 2020b, tradução nossa)

Em 2006, Plutão deixou de ser considerado um planeta e foi colocado como planeta anão por essa resolução - pois ele e sua lua Caronte possuem massas semelhantes e formam um sistema duplo, em movimento em relação ao mesmo ponto em comum (ou seja, ele não é o objeto gravitacionalmente dominante da região) -, então os parâmetros mínimos de massa e tamanho de um planeta no Sistema Solar que os exoplanetas têm são os de Mercúrio, o menor dos planetas rochosos.

2.2 DADOS

Até 28 de novembro de 2021, eram conhecidos 4575 exoplanetas, em mais de 3300 sistemas diferentes, segundo dados de NASA Exoplanet Archive (2021a). Há mais de 7900 candidatos à espera de confirmação. Por meio de uma estimativa estatística de dados da missão Kepler da NASA, foi revelado, segundo Brennan (2020b), que há mais planetas do que estrelas na Via Láctea.

Figura 1 – Distribuição de exoplanetas em função da massa (massa da Terra) e raio (raio da Terra)



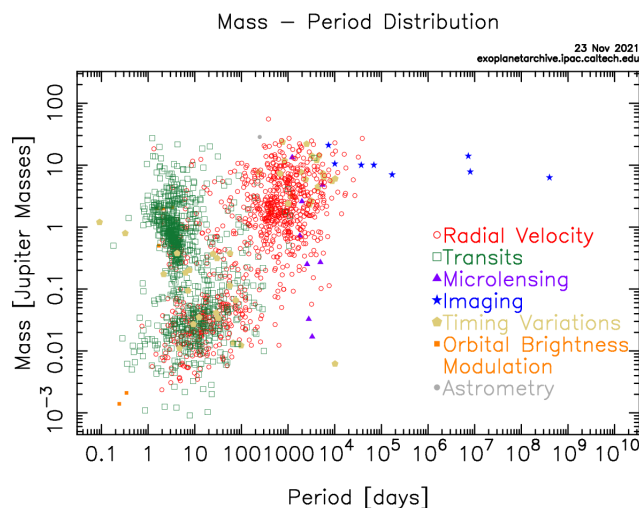
Fonte: Adaptado de NASA (2021)

A Figura 1 exibe uma relação entre as massas e os raios de exoplanetas, e os métodos pelos quais eles foram detectados. Pode ser verificado que existe uma relação direta entre a massa e o tamanho de exoplanetas, que ao acumularem mais matéria, crescem.

O método de trânsito tem a predominância no gráfico. Pode ser inferida uma relação entre detecções por esse método e o tamanho e massa dos planetas, o que será discutido mais abaixo.

Na Figura 2 é apresentada uma distribuição dos exoplanetas confirmados em função de sua massa (em massas de Júpiter) e seu período orbital em dias, e o método usado para detectá-los. Há pontos

Figura 2 – Distribuição de exoplanetas em função da massa (massas de Júpiter) e período

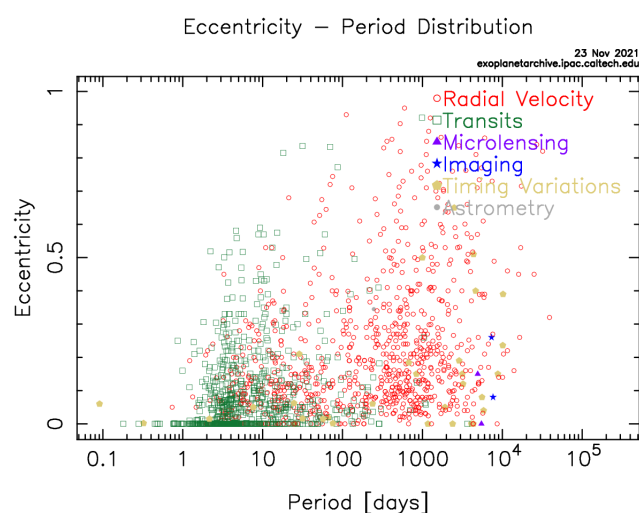


Fonte: NASA (2021)

isolados no gráfico, correspondentes à planetas com períodos menores que um dia e massas tanto semelhantes à de Júpiter, quanto em torno de 0,2% dela; outros com períodos de 2 a 10 mil dias, com massas de 6 milésimos até 3% da massa do gigante gasoso; e outros com períodos maiores que 10 mil dias e massas entre 10 Júpiteres.

Podem ser vistos 3 aglomerados na distribuição, um predominantemente composto por exoplanetas detectados por trânsito (ou curva de luz); outro composto principalmente de detectados por velocidade radial; e o mais diverso, composto pelos dois anteriores e também por detectados por variações temporais. O método de trânsito é o que mais detectou exoplanetas até o momento, com 3323 confirmados, o que pode ser verificado com a quantidade de pontos verdes no gráfico. O segundo método que mais detectou planetas é o de velocidade radial, seguido por microlentes.

Figura 3 – Distribuição de exoplanetas em função da excentricidade e período



Fonte: NASA (2021)

Já na Figura 3, os planetas estão distribuídos de acordo com seu período e excentricidade, e também diferenciados pelos métodos que os detectaram. Há uma predominância de planetas detectados por trânsito em períodos mais curtos, o que está de acordo com a realidade, pois esse método é mais eficaz

para detectar planetas com períodos desse tipo.

2.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO

Tabela 1 – Métodos de detecção e número de exoplanetas detectados

Método de Detecção	Número de Exoplanetas
Astrometria	1
Imageamento	54
Velocidade Radial	899
Trânsito	3444
Variações de tempo de Trânsito	22
Variações de tempo de Eclipse	16
Microlentes	120
Variações de tempo de Pulsares	7
Variações de tempo de Pulsações	2
Modulações de brilho Orbitais	9
Movimento do Disco	1

Fonte: NASA (2021)

A tabela 1 mostra a contagem de exoplanetas detectados por vários métodos diferentes, até 28 novembro de 2021. Pode ser notado que a técnica de trânsito é a que mais detecta exoplanetas, apesar de possuir algumas limitações que serão discutidas mais abaixo. Em seguida vem a técnica de velocidade radial, que também é usada para a confirmação de exoplanetas, usada como segundo método de detecção, dada a sua grande precisão.

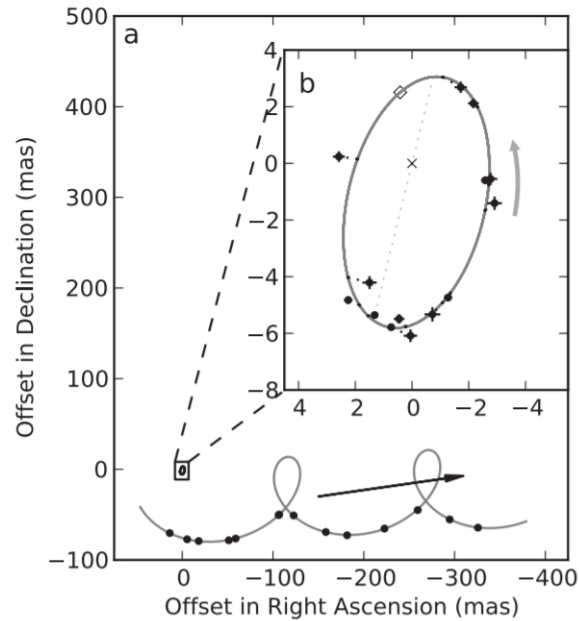
2.3.1 Astrometria

De acordo com NASA Exoplanet Exploration (2020a), a astrometria leva em conta a mudança de posição da estrela, por conta da ação gravitacional do planeta que a orbita. Isso é verificado pela análise de várias imagens da estrela e de outras estrelas próximas à ela no céu. Em cada imagem, são comparadas as distâncias da estrela em relação às estrelas de referência, para saber se houve movimento. Em caso positivo, esse movimento pode ser analisado em busca de exoplanetas.

Desse modo, quanto maior e mais massivo for o planeta, maior será a perturbação causada no movimento da estrela, e assim, mais evidente será na medição. Como a variação do movimento verificada é muito pequena, também consequência da distância entre o observador e o planeta ser muito grande, este método não é muito confiável para a detecção de exoplanetas.

Na Figura 4 está representado um movimento astrométrico, de DENIS-P J082303.1-491201 (ou DE0823-49) em forma de gráfico, segundo os estudos de Sahlmann et al. (2013). O retângulo *a* ilustra o movimento relativo ao campo de estrelas de referência, a seta preta indica a direção e sentido do movimento próprio em um ano; e o retângulo *b* mostra um *zoom* da órbita baricêntrica causada pela atração gravitacional de uma anã marrom orbitando o sistema. Em ambos os casos, as observações são mostradas como círculos pretos e o modelo elaborado como as linhas cinzas. No painel *b*, o baricentro e o periastro da órbita, segundo os autores, estão marcados como um $\times$ e um pequeno quadrado vazio. A órbita é excêntrica e inclinada.

Figura 4 – Movimento astrométrico de DENIS-P J082303.1-491201 e sua órbita baricêntrica



Fonte: Sahlmann et al. (2013)

Quanto maior e mais massivo for um planeta, mais força gravitacional ele será capaz de exercer. Portanto, esse método tem a característica de ser capaz de identificar com maior facilidade um sistema com planetas gigantes, do que um com planetas menores, já que estes causariam uma menor perturbação na estrela.

A astrometria é um método de detecção complicado de ser realizado, pois, como os outros métodos, depende de observações e imagens dos sistemas. Mas diferentemente deles, que se baseiam em medições de quanta luz ou a regularidade de sinais que chegam ao observador, a astrometria leva em conta principalmente a distância entre os corpos observados, como um método de imageamento aplicado várias vezes, para se determinar se houve alteração de posição entre os corpos do sistema. Ela é usada com frequência para corpos no Sistema Solar com sucesso.

Como os sistemas exoplanetários estão a uma grande distância da Terra, é necessária uma grande precisão para sua observação. Há também um agravante de ser realizado da superfície da Terra, pois a atmosfera influencia na observação ao distorcer a luz vinda de fora do planeta.

2.3.2 Velocidade radial

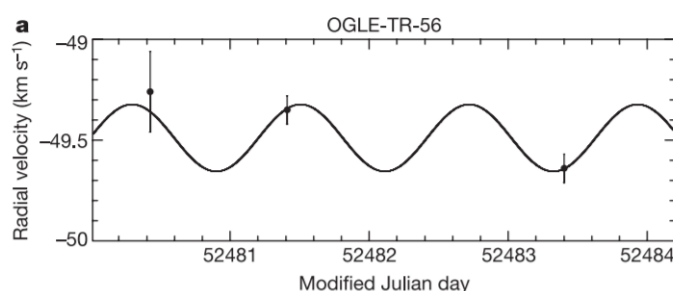
Este método também é conhecido como Método Doppler, pois mede variações da velocidade com que a estrela se move para mais longe e para mais perto de um observador, causadas pela ação gravitacional de seu planeta. O planeta age trazendo-a na sua direção conforme a órbita, o que para um observador seria como se ela se afastasse por um período, e se aproximasse em outro. Isso causa variações em seu comprimento de onda verificado, sendo a velocidade radial medida pelo deslocamento das linhas espectrais da estrela, por meio do efeito Doppler, de acordo com NASA Exoplanet Exploration (2020a).

Isso funciona por meio da medição da luz que é emitida pela estrela, seu espectro de luz. Quando um corpo está se aproximando ou se afastando do observador a velocidades significativas (mas não

próximas à da luz), seu espectro é deslocado para a região do vermelho, quando se afasta; e para a região do azul, quando se aproxima. Esses efeitos são conhecidos como *redshift* e *blueshift*, respectivamente.

O efeito Doppler é um efeito observado em situações de movimento relativo como esse, em que há corpos (emissores de ondas, sonoras, luminosas) se aproximando ou se afastando do observador. Para o observador, o objeto aparenta possuir características diferentes das próprias, como uma variação em seu comprimento de onda. Isso também acontece como por exemplo quando há uma ambulância se aproximando de uma pessoa numa rua; ao chegar mais perto, a pessoa percebe um som mais agudo do que ela emite; ao afastar-se, percebe-se um som mais grave.

Figura 5 – Gráfico de velocidade radial de OGLE-TR-56



Fonte: Konacki et al.(2003)

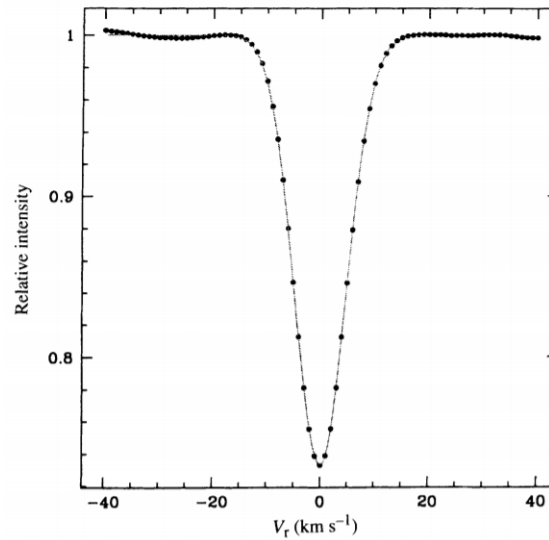
Na Figura 5 está representada uma versão simplificada das medidas de velocidade radial obtidas por Konacki et al. (2003) de OGLE-TR-56. A curva assume uma órbita circular, conforme era esperado do estudo do caso visto. Podem ser percebidos claramente os picos e vales da curva, correspondentes às mínimas e máximas velocidades com que a estrela se move ao redor do ponto fixo de observação; além de suas várias repetições, caracterizadas pela contínua ação gravitacional do planeta, movendo-se ao redor da estrela.

Segundo Mayor e Queloz (1995), uma das formas de cálculo da velocidade radial é feita com uma técnica de “correlação cruzada”, que concentra a informação do efeito Doppler, no estudo, de aproximadamente 5000 linhas de absorção estelares. As medições realizadas pelos autores, no estudo de 1995, com avançados espectrógrafos, possuíam uma precisão a ponto de detectarem o movimento que Júpiter causa no Sol como sendo da ordem de 13 m/s . Atualmente a precisão do método já é bem maior: segundo os dados de Kemmer et al. (2020), conta-se com uma incerteza média de poucos metros por segundo.

A função de correlação cruzada, de acordo com Simola, Dumusque e Cisewski-Kehe (2018), é o resultado da comparação de uma média das informações de todas as linhas espectrais observadas da estrela com um espectro sintético ou já conhecido. Para obter a velocidade radial da estrela como uma função do tempo, calculam-se as variações do baricentro (centro de massa de dois ou mais corpos, centro gravitacional) da função de correlação cruzada, sendo o baricentro estimado pela média de uma curva normal (gaussiana) que se encaixa com os dados obtidos.

A Figura 6 ilustra a função de correlação cruzada usada nas medições de Mayor e Queloz (1995). A linha sólida é uma aproximação gaussiana que se encaixa com os dados obtidos. A posição da função de correlação cruzada é usada para calcular a velocidade radial, e sua largura está relacionada com a velocidade rotacional da estrela.

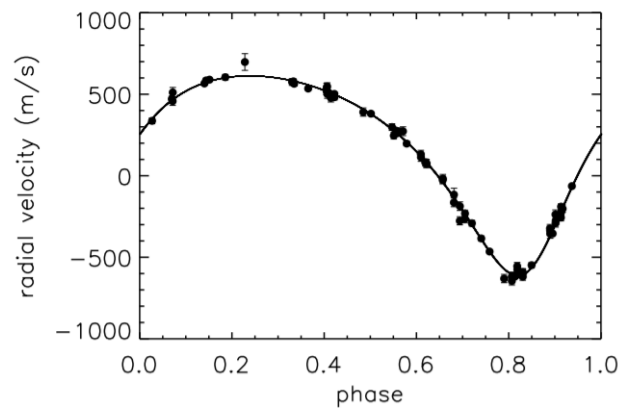
Figura 6 – Função de correlação cruzada



Fonte: Mayor; Queloz (1995)

Para o método de velocidade radial poder ser utilizado, o plano da estrela e do planeta deve ser aproximadamente paralelo em relação ao do observador, já que se for perpendicular, não será detectado um deslocamento horizontal da estrela em relação ao ponto de observação. Para esse caso, o método de astrometria seria mais indicado.

Figura 7 – Dados de velocidade radial de HD 114762



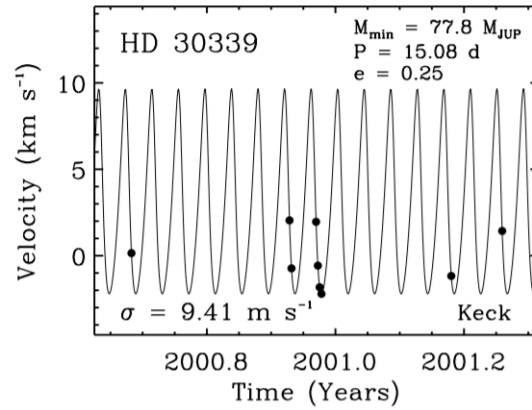
Fonte: Kane et al. (2011)

A Figura 7 mostra os dados de velocidade radial e o modelo Kepleriano que mais se encaixa com o planeta HD 114762, obtidos por Kane et al. (2011), representados pelos pontos e pela curva, respectivamente.

Já a Figura 8 exibe o comportamento da velocidade radial de HD 30339, conforme os resultados de Nidever et al. (2002), fruto de um objeto acompanhante com um período curto em comparação com os planetas do Sistema Solar, de aproximadamente 15 dias ao redor de sua estrela, uma semi-amplitude de 5.94 km s^{-1} , e excentricidade de 0.25, resultando numa massa mínima de 77.8 massas de Júpiter para o objeto.

O uso desta técnica pode revelar informações importantes sobre o planeta em estudo, conforme diz Charbonneau et al. (2000): período, semi-amplitude (de velocidade radial) e excentricidade da órbita são

Figura 8 – Velocidades Doppler de HD 30339



Fonte: Nidever et al. (2002)

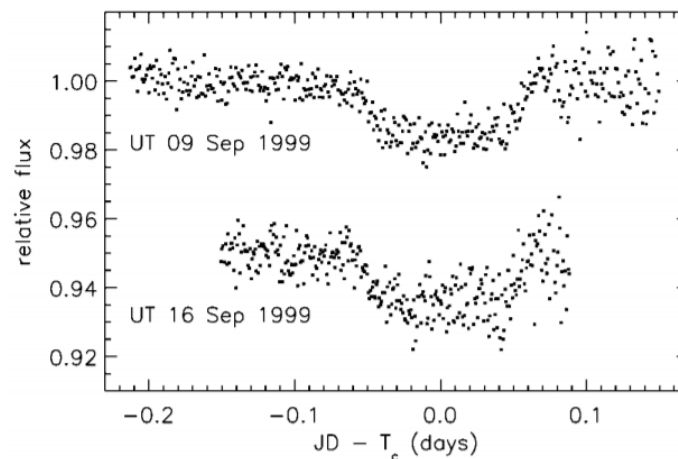
algumas delas, além do semieixo maior e massa mínima, dependendo do valor assumido como massa da estrela que o planeta orbita. Em casos em que são verificados tanto a velocidade radial quanto o trânsito de um exoplaneta, sua massa e raio podem ser estimados com uma boa precisão. Em posse de todos esses dados também podem ser calculadas sua gravidade superficial e densidade média. A combinação de resultados entre essas duas técnicas de detecção é poderosa e traz várias informações úteis na investigação dos exoplanetas.

Atualmente, por conta da sua precisão ser maior, a velocidade radial é o principal e mais bem-sucedido método para detectar exoplanetas. Ele é frequentemente usado com outros métodos para confirmar de fato que eles existem, segundo NASA Exoplanet Exploration (2020a).

2.3.3 Trânsito

A técnica de trânsito, na definição de Petigura, Howard e Marcy (2013, tradução nossa), é “quando um planeta passa na frente da sua estrela, ele causa um escurecimento parcial que é proporcional à fração do disco estelar bloqueado.” Este método também é conhecido como Curva de Luz, por conta da sombra que o planeta causa quando este transita na frente da estrela, bloqueando seu “disco de luz”.

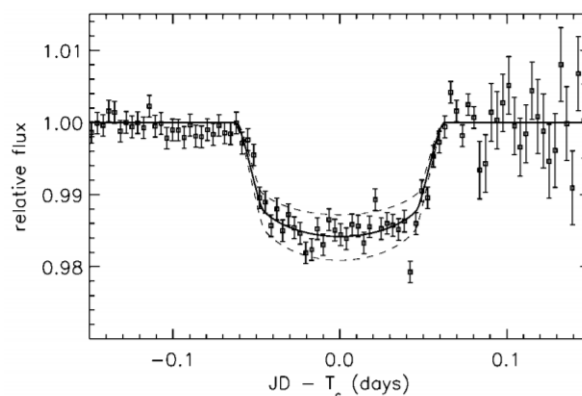
Figura 9 – Dados fotométricos de HD 209458



Fonte: Charbonneau et al. (2000)

Na Figura 9, estão os dados fotométricos de HD 209458 obtidos por Charbonneau et al. (2000), ambos apresentando uma faixa que representa a luminosidade média percebida pelos instrumentos de observação sem perturbações, e ao redor do ponto 0.0 dia, uma queda na faixa. A queda corresponde à diminuição de luminosidade percebida causada pelo movimento do planeta na frente da estrela.

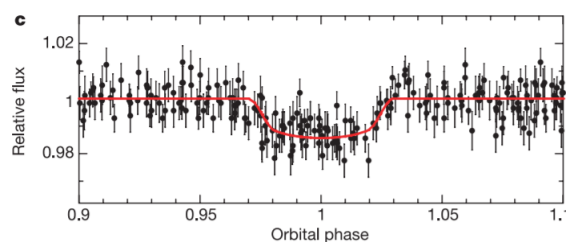
Figura 10 – Dados de trânsito de HD 209458



Fonte: Charbonneau et al. (2000)

E na Figura 10, está uma versão resumida e mais limpa dos dados, em conjunto com uma linha curva que segundo os autores representa um modelo elaborado do trânsito observado. Também foi dito que o maior desvio nos dados próximos do fim do gráfico se deu por conta de massas de ar. As linhas tracejadas superior e inferior representam curvas de trânsito para um planeta com raio 10% menor e maior, respectivamente. A região central representa o tempo de passagem, na qual o planeta se encontra completamente na frente da estrela.

Figura 11 – Dados de trânsito de OGLE-TR-56



Fonte: Konacki et al. (2003)

Na Figura 11, estão os dados do trânsito verificados por Konacki et al. (2003), de OGLE-TR-56. É comentado que o trânsito tem uma extensa base plana, e que os dados apontam para um corpo com o tamanho de Júpiter. A linha vermelha simboliza a curva que foi escolhida como o melhor modelo em comparação com os dados obtidos. O trânsito começa aproximadamente a partir da fase orbital de 0.97 até quase 1.03, verificado pela redução na intensidade da luz da estrela pelo equipamento, que retorna ao normal após a passagem do planeta ser concluída.

Há também uma relação com a distância que o planeta se encontra da estrela. De acordo com NASA Exoplanet Exploration (2020a), quanto mais distante ele está, mais tempo leva para que sua passagem seja concluída, o que caracteriza uma curva de luz mais larga, dependendo dos limites adotados no eixo do tempo.

Uma série de características podem ser inferidas do planeta analisando sua curva de luz, como se nele há uma atmosfera, e pode-se inferir sua composição. O método funciona apenas com planetas com planos orbitais alinhados com a linha de visada do observador, pois com planos inclinados torna-se mais difícil de se ver a curva de luz. Em planos orbitais perpendiculares, não é possível usar esse método.

Segundo Wunderlich et al. (2020), planetas orbitando estrelas mais frias são mais fáceis de se detectar e caracterizar pelo método de trânsito do que planetas orbitando estrelas mais quentes. Isso se dá por conta de seus curtos períodos orbitais e grandes razões entre os raios de estrelas e os de planetas.

Este método funciona até em casos em que as estrelas estão distantes. Os planetas de mais fácil detecção por esse método são planetas gigantes com períodos orbitais curtos - como era o esperado para a missão CoRoT, conforme diz The European Space Agency (2020a) - já que quanto maior o planeta for, maior será a queda no brilho verificado na estrela; e quanto menor for seu período, mais chance há dele ser visto. De acordo com Murray e Dermott (2000), o período orbital de um planeta depende diretamente da distância que ele está da sua estrela, conforme a terceira lei de Kepler:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{\mu} a^3 \quad (1)$$

em que T é o período orbital, $\mu = G(m_1 + m_2)$, G é a constante gravitacional Universal, igual a $G = 6,67260 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$, m_1 é a massa da estrela e m_2 do planeta, e a é seu semieixo maior.

Desse modo, a evidência de que um planeta tem um período menor pode indicar que ele se encontra próximo de sua estrela. Com apenas aproximadamente 12 horas sem luz do Sol para fazer observações no céu noturno, com telescópios terrestres, quanto mais rápido o planeta orbitar sua estrela, isso será melhor verificado, já que períodos longos de meses ou até vários anos podem acarretar mudanças mínimas no brilho verificado de uma estrela, tornando a verificação mais complexa de ser realizada e aumentando as chances de serem consideradas apenas perturbações e não exoplanetas.

Cerca de 76% dos exoplanetas descobertos até hoje foram através do método de trânsito.

2.3.4 Cronometria de Pulsares

No estudo de Wolszczan e Frail (1992), usando um radiotelescópio para fazer medições precisas dos pulsos do pulsar (fase final da vida de uma estrela mais massiva que o Sol, que emite radiação enquanto gira regularmente) PSR 1257 + 12 (atualmente conhecido como PSR B1257 + 12), foi demonstrado que uma anomalia na regularidade dos pulsos do pulsar se dava devido à presença de três planetas no sistema. Esse método leva em conta a característica que pulsares são objetos rotacionais extremamente estáveis. Sendo assim, uma perturbação forte o suficiente para alterar seus períodos pode ser detectada, o que acontece quando há planetas orbitando próximos a eles.

No estudo, a oscilação detectada pelo método de medição de pulsos, causada pelo movimento dos planetas, foi de cerca de 0,7 m/s, caracterizando a precisão dessa forma de detecção. Segundo os autores, planetas menos massivos do que a Lua seriam capazes de ser detectados com essa técnica.

No entanto, apesar de tal precisão, esse método não é mais usado por não haver tantos pulsares

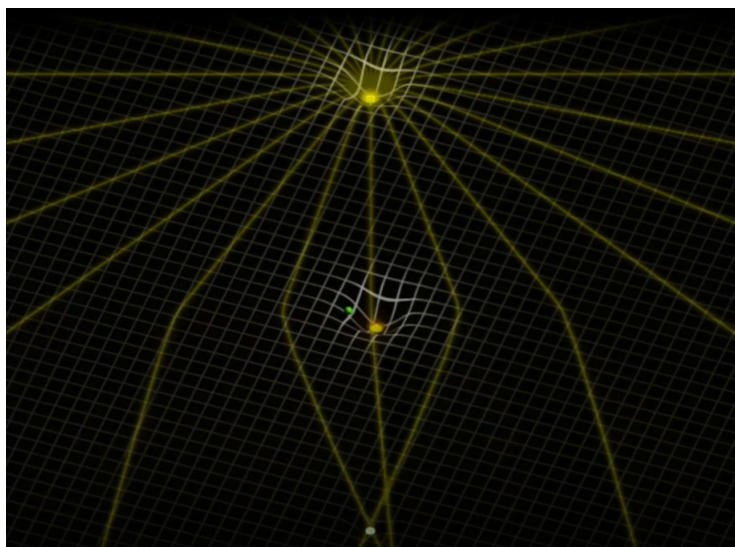
conhecidos para se observar, ou medir, contando com um número acima de apenas 2000 detectados, segundo Cofield (2016). Em comparação com o número de estrelas conhecidas, esse é um número ínfimo. E ainda, o número de pulsares com irregularidades em seus pulsos deve ser ainda menor, o que diminui ainda mais as chances de detecção de exoplanetas ao seu redor.

2.3.5 Microlente gravitacional

A definição de microlentes é a seguinte: “microlentes gravitacionais ocorrem quando um objeto mais próximo passa pela ou muito próximo à linha de visada de uma estrela fonte mais distante, gerando um perfil de curva de luz simétrico bem conhecido.” (BOND et al., 2004, tradução nossa). A curva de luz verificada pelo método se dá por conta de uma estrela que passa em uma região do espaço que, por meio de sua distorção do espaço-tempo, parece intensificar a luz detectada oriunda de uma estrela mais distante para o observador, sendo que uma ligeira perturbação nessa curva de luz é geralmente efeito de um planeta. Isso também pode ocorrer com estrelas binárias, mas os dados e formato da curva são diferentes dos de um planeta. O intervalo de massas planetárias que o método é capaz de detectar varia desde planetas gigantes gasosos até planetas terrestres.

O método tem esse nome porque para o observador, a luz da estrela distante parece ser desviada e aumentada, como se houvesse uma lente focando-a.

Figura 12 – Ilustração do método de microlentes



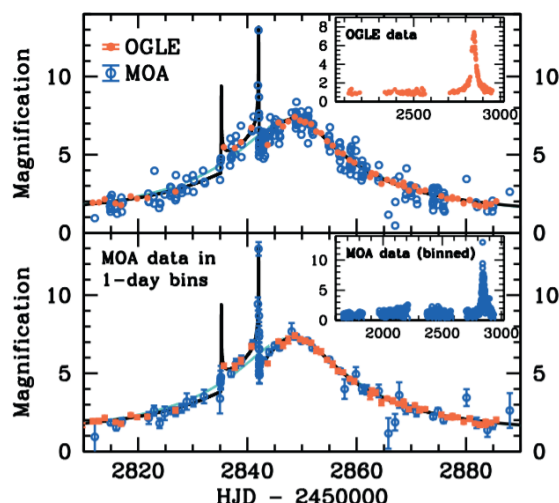
Fonte: NASA (2020)

A Figura 12 de NASA Exoplanet Exploration (2020b) ilustra o momento em que uma estrela e seu planeta passam pelo ponto em que sua distorção do espaço causa a amplificação da luz vinda de uma estrela mais distante.

Para Udalski et al. (2005), o método de microlentes tem boa confiança para detectar planetas distantes do observador e pequenos como Marte, pois diferentemente de outros métodos de detecção (trânsito, velocidade radial), ele é sensível à massa do planeta, visto que é sua massa que irá curvar a luz que será desviada da estrela fonte e amplificada para o observador; e a força do sinal de tal planeta pode ser grande (maior ou aproximadamente igual a 10%).

Uma quantidade importante que pode ser obtida no método é a razão q entre a massa do planeta e a da estrela que curvam a luz ($q = m_P/M$); se q tem um valor muito alto, significa que o objeto que acompanha essa estrela pode ser uma estrela secundária, de um sistema binário; se q for mediano, pode se tratar de um planeta gigante gasoso; e se for baixo, o sistema pode ser composto por uma estrela e um planeta pequeno, conforme diz Bond et al. (2004).

Figura 13 – Curva de luz com modelos de OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53



Fonte: Bond et al. (2004)

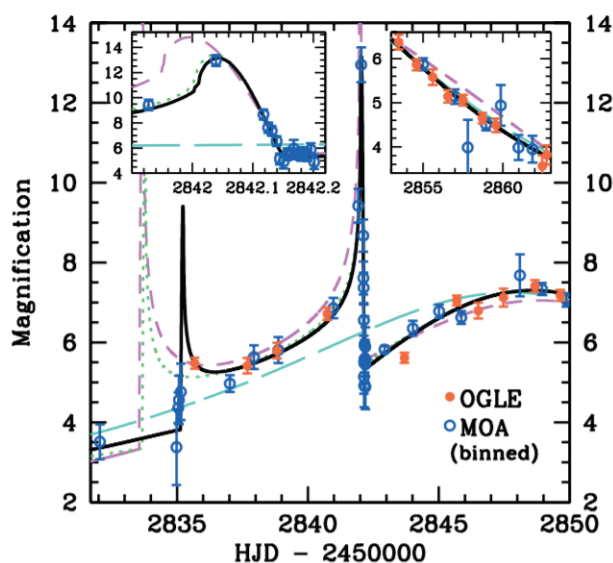
Na Figura 13 está representada a curva de luz obtida por Bond et al. (2004) nas observações de 2003. As observações foram realizadas por duas equipes diferentes, a OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*, Experimento Ótico de Lentes Gravitacionais) tem os dados representados em vermelho, e a MOA (*Microlensing Observations in Astrophysics*, Observações de Microlentes em Astrofísica) em azul. Em ambos os painéis há os dados obtidos por ambas as equipes, com a diferença que no painel inferior, os dados da OGLE estão limitados a somente um ponto por dia, exceto nos picos do gráfico. Nos painéis pequenos à direita estão representados os dados obtidos por OGLE de 2001 a 2003, e por MOA de 2000 a 2003, representando que no período observado não houve nenhum aumento significativo na luz recebida pelos observatórios, ou seja, não houve nenhum outro evento de microlente para aquela estrela.

Após as observações são elaborados modelos para encontrar o que melhor se encaixa com os dados obtidos, modelos simples com uma estrela, binários com duas, compostos por um planeta ou nenhum. A próxima figura ilustra a comparação entre os modelos de Bond et al. (2004) em relação aos dados obtidos.

Na Figura 14 é feita uma aproximação no gráfico da imagem anterior, na região do efeito da microlente; estão representados os vários modelos elaborados por Bond et al. (2004) para a melhor identificação com os dados. O modelo simples é a curva tracejada em ciano; o binário, tracejado em roxo; o composto por um planeta, a linha pontilhada em verde; e o modelo geral de $q = 0.0039$ que melhor se encaixa com os dados é a linha sólida preta. Nos painéis superiores estão as aproximações do segundo pico e de um trecho à direita do gráfico.

Os modelos simples e binário não foram capazes de se identificar satisfatoriamente com os dados

Figura 14 – Aproximação e modelos de OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53



Fonte: Bond et al. (2004)

obtidos, nos picos e também fora deles; enquanto que o de um planeta tem um aumento precoce na intensidade verificada, apesar de se encaixar bem no restante do tempo.

O método inferiu que o objeto acompanhando a estrela trataria de um planeta com 1.5 massas de Júpiter, se a estrela pertencesse à sequência principal, de acordo com Bond et al. (2004). Existe essa dependência do tipo da estrela para descobrir a massa do planeta, já que isso somente se define por meio da razão q .

Esse método tem poucos exoplanetas confirmados tanto por conta da difícil maneira de se precisar qual a massa do objeto que acompanha a estrela responsável pela lente - dependente da elaboração de modelos -, quanto pela observação em si, já que as estrelas devem ser monitoradas constantemente para que possa ser verificada uma alteração em seu brilho. Outro fator é que tal evento pode ocorrer somente uma vez, sem repetições para haver comparação de dados.

2.4 ZONA HABITÁVEL

De acordo com Kasting, Whitmire e Reynolds (1993), a definição de zona habitável (ZH) é de uma região ao redor de uma estrela em que a temperatura de um planeta permite que a água exista no estado líquido em sua superfície, definição tal levando em conta que organismos conhecidos necessitam de água líquida pelo menos em algum momento em seu ciclo biológico.

Segundo Vladilo et al. (2013), o critério mais adotado para definir tais ambientes “habitáveis” é a presença de água na fase líquida. A água sempre foi associada à vida, sendo fundamental para a maioria das espécies se desenvolverem. É, portanto, o primeiro e principal fator a ser considerado quando se trata de condições de habitabilidade de planetas.

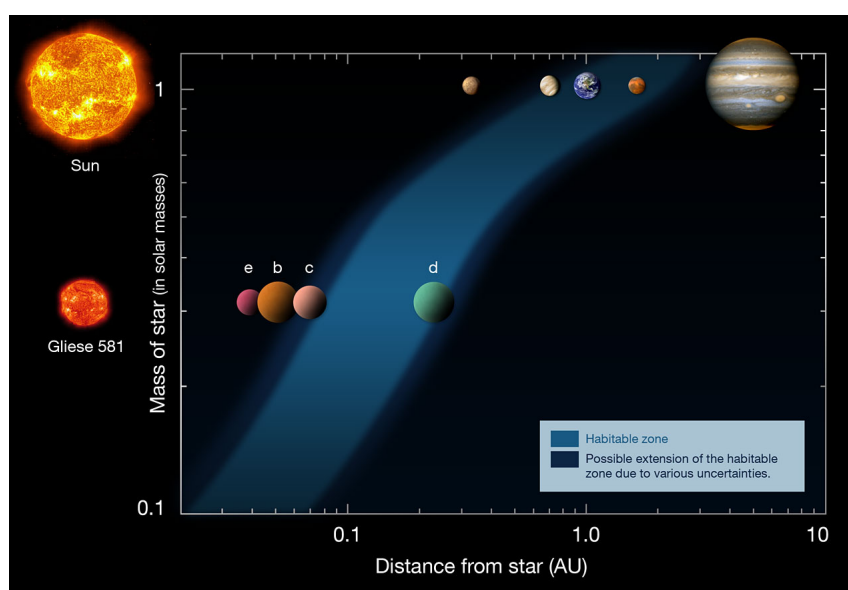
Mas também há outros fatores a se levar em conta para determinar se uma região está na ZH ou não, tanto intrínsecos quanto externos aos planetas: “As condições físicas necessárias são determinadas por uma série de fatores estelares, orbitais e planetários. A combinação de fluxo estelar e parâmetros

orbitais que levam à temperaturas superficiais compatíveis com o critério da água líquida definem a zona habitável.” (VLADILO et al., 2013, tradução nossa)

Sendo assim, uma série de fatores atmosféricos também pode determinar a habitabilidade de uma dada região, como exemplo a pressão, visto que a uma dada temperatura, a água em estado líquido pode passar para outros estados, dependendo da pressão aplicada sobre ela. Para que uma região seja considerada habitável, então, também esses fatores devem estar entre certos valores limite.

Uma ZH que se conhece é a da Terra ao redor do Sol, que por estar dentro de seus limites, possuir uma baixa excentricidade, e uma órbita sem perturbações drásticas, entre outros fatores, garante que haja água no estado líquido durante todo o período orbital.

Figura 15 – Zona habitável de Gliese 581



Fonte: ESO (2009)

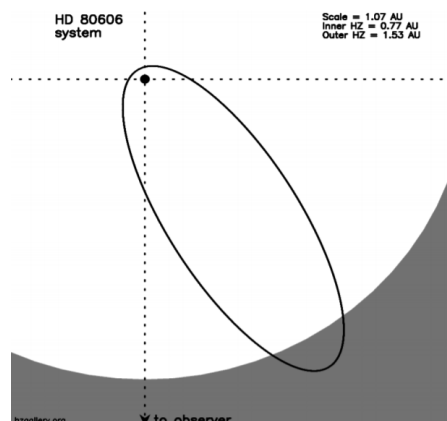
A Figura 15 apresenta a zona habitável do sistema Gliese 581, em conjunto com alguns planetas do Sistema Solar para comparação. A faixa azul clara indica a ZH, e um trecho mais escuro indica uma possível extensão dela, por conta de possíveis variações nos parâmetros usados na estimativa nos dois sistemas. A imagem também traz a massa e a distância dos planetas em relação às estrelas.

Segundo European Southern Observatory (2021), após refinar a órbita do planeta Gliese 581 d - descoberto em 2007, de acordo com Udry et al. (2007) -, uma equipe de astrônomos concluiu que ele se encontra dentro da ZH de sua pequena estrela vermelha. O planeta é, então, capaz de abrigar água líquida. Se Gliese 581 d possuir água, ela pode permanecer líquida durante todo seu período orbital ao redor da estrela.

Porém, há planetas em que isso não ocorre. Ao invés de estarem na ZH por todo o seu período orbital, estão dentro dela somente uma época de seu ano, por exemplo, um planeta com uma grande excentricidade orbital. Isso tem efeitos drásticos em suas características físicas.

Está representada na Figura 16 a órbita e a zona habitável ao redor da estrela HD 80606, cujo planeta tem um período de 111 dias e excentricidade de 0.93, segundo Kane e Gelino (2012). A ZH está em cinza na figura, na região do apoastro (ponto da órbita mais afastado da estrela) da órbita. O planeta passa cerca de 40% de sua órbita na ZH, na temperatura estimada de 286 K; porém, aproxima-se da

Figura 16 – Órbita e zona habitável do sistema HD 80606



Fonte: Kane; Gelino (2012)

estrela no restante da órbita, aumentando gradualmente sua temperatura. No periastro (ponto da órbita mais próximo da estrela), a temperatura atinge 1546 K, aproximadamente. Esse processo causa um aquecimento na atmosfera superior do planeta tal que sua temperatura pode chegar a dobrar em apenas 6 horas de passagem pelo periastro.

Esse sistema exemplifica uma ZH temporária em uma órbita. Kane e Gelino (2012) também citam um caso oposto, em que o planeta passa pela ZH no periastro (271 K), e no restante da órbita sofre com baixas temperaturas (127 K).

2.5 MISSÕES

Desde algumas décadas até atualmente, houveram várias descobertas de sistemas planetários por telescópios. Porém, com o auxílio das missões espaciais, este número aumentou significativamente, resultado dos equipamentos sofisticados e precisos presentes nas naves. Em junho de 2017, o catálogo de exoplanetas da missão Kepler já contava com mais de 4000 planetas candidatos (detectados mas sem confirmação por um segundo método de detecção), com aproximadamente 2330 confirmações; e em junho de 2019, a contagem de exoplanetas confirmados já passava de 4000, segundo NASA Exoplanet Exploration (2018) e NASA Exoplanet Exploration (2019).

As missões são a maneira mais efetiva de se detectar e confirmar exoplanetas, sendo suas medições analisadas nas bases terrestres para calcular e descobrir suas massas, raios, distâncias orbitais e várias outras características.

2.5.1 CoRoT

A missão CoRoT (*Convection, Rotation and Planetary Transits* - Convecção, Rotação e Trânsitos Planetários), conforme diz ESA Science & Technology (2019c), foi liderada pela Agência Nacional Espacial Francesa, CNES, e a Agência Espacial Europeia - ESA - entrou na missão para fornecer equipamentos para o telescópio.

De acordo com ESA Science & Technology (2021a), a missão teve início em dezembro de 2006, teve duração nominal de 2 anos e meio, e após duas extensões de missões, os instrumentos pararam de

funcionar em novembro de 2012; a missão foi concluída em junho de 2014.

O foco científico da missão está no próprio nome, segundo The European Space Agency (2020a), em que “convecção e rotação” estão relacionados às análises do interior de estrelas, em específico, a asterossismologia, que estuda as oscilações de ondas acústicas dentro delas. Isso permite aos pesquisadores entender melhor como elas funcionam, o que é fundamental para entender de que maneira se dão as condições que tornam favoráveis a existência e evolução de planetas. E “trânsito” refere-se à técnica de detecção de exoplanetas, quando estes cruzam a frente de suas estrelas.

A sonda SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory* - Observatório Solar e Heliosférico), conforme diz ESA Science & Technology (2020), está ativa desde 1995, e tem como principal objetivo o estudo do Sol, seu interior, superfície e atmosfera. Por ser uma parceria da ESA com a NASA, as análises e resultados da sonda SOHO podem ser comparadas com as do telescópio CoRoT, fazendo uma comparação a fundo do Sol com outras estrelas.

O telescópio CoRoT foi incumbido de encontrar planetas rochosos como a Terra, próximos às suas estrelas, na esperança de haver planetas habitáveis entre eles.

Há casos em que essa proximidade é maior do que a distância que Mercúrio está do Sol, ou seja, dependendo do tipo de estrela do sistema, o planeta rochoso pode ser incapaz de ser habitável, segundo The European Space Agency (2020a) por estar sujeito a ventos estelares e à grande força gravitacional da estrela, que pode incapacitá-lo de reter gases para formar uma atmosfera; além da elevada temperatura que a estrela proporcionaria a ele, entre outros fatores. Mas se o planeta for descoberto orbitando uma estrela anã vermelha, por exemplo, essa proximidade pode se dar na medida certa para que haja água líquida em sua superfície. Essas condições dependem da distância do planeta em relação à estrela, na órbita; do tipo de estrela; e também da fase atual de evolução dela.

Figura 17 – Representação artística do satélite CoRoT



Fonte: CNES; Ducros (2006)

A Figura 17 apresenta uma visão artística da nave CoRoT ao redor da Terra, segundo The European Space Agency (2006), em sua órbita polar e circular.

A nave possui um telescópio afocal com 27 cm de diâmetro e duas câmeras - uma para cada objetivo - e orbitava a Terra em órbita circular baixa (*low-Earth orbit*) e polar, de acordo com ESA Science & Technology (2019b). Dessa maneira, observava perpendicularmente à órbita, dentro de um limite de 10° , sem que a Terra interferisse. Seu campo de visão era um quadrado de $2,8^\circ \times 2,8^\circ$, metade para cada objetivo; e havia um prisma para que fosse possível fazer análises da atividade estelar durante um trânsito, conforme expõe The European Space Agency (2020b).

Segundo dados de The Extrasolar Planet Encyclopaedia (2021), há 36 exoplanetas confirmados sob o nome CoRoT, sendo que 31 deles foram descobertos dentro do período de 7 anos da missão original. Existem 33 sistemas planetários diferentes, com 3 sistemas possuindo mais de um planeta descobertos pelo telescópio. 2 dos 36 planetas foram descobertos pelo método de velocidade radial; e os restantes por trânsito, o foco da missão.

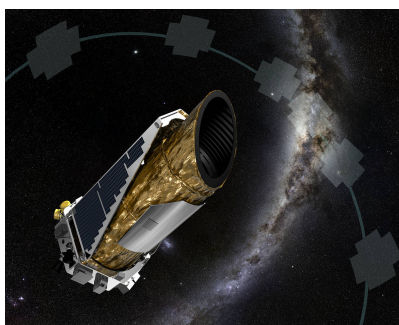
2.5.2 Kepler

Conforme diz Robnik e Seljak (2020), o telescópio espacial Kepler operou em sua missão principal de 2009 a 2013, com o foco de detectar exoplanetas usando a técnica de trânsito. Ele mediu o brilho de 200.000 estrelas e detectou 18.000 planetas em potencial, dos quais mais de 2.000 estão atualmente confirmados, sendo vários deles corpos de tamanho terrestre.

Segundo NASA Exoplanet Archive (2021a), o número atual de exoplanetas confirmados pela missão Kepler é de 2394, e planetas candidatos à espera de confirmação são 2366. Há também uma relação de candidatos e planetas confirmados na ZH de suas estrelas, seguindo os seguintes critérios: o planeta deve possuir uma temperatura superficial equilibrada entre 180 e 310 K ($180 K < T_{eq} < 310 K$), ou uma insolação - radiação solar recebida por um planeta - em termos do fluxo recebido pela Terra entre 0.25 e 2.2 ($0.25 < \text{Fluxo}_{Terra} < 2.2$); seguindo esses critérios, há 361 planetas, tanto confirmados quanto candidatos, na ZH.

A missão Kepler teve como objetivo específico descobrir planetas de tamanhos da Terra e menores, dentro ou próximos da ZH de suas estrelas, em uma região específica da Via Láctea, segundo Johnson (2018).

Figura 18 – Representação artística da nave Kepler



Fonte: NASA (2014)

A nave Kepler está representada na Figura 18, em que os símbolos em cinza exibem as regiões no céu que a nave observou, cada região sendo a área de uma campanha de observação diferente da missão K2, conforme explica Johnson (2017b).

Para concluir seu objetivo, a missão tinha como tarefas, de acordo com Johnson (2018): determinar a porcentagem de planetas terrestres e maiores que estão dentro ou próximos à ZH; determinar a distribuição de tamanhos e formatos das órbitas desses planetas; estimar quantos planetas existem em sistemas de múltiplas estrelas; identificar as propriedades das estrelas desses sistemas; entre outras.

A missão estava em uma órbita heliocêntrica de período de 372 dias, que se distanciava da Terra com o tempo, conforme diz Johnson (2017c). Por não orbitar a Terra, não sofria perturbações causadas

por ações gravitacionais, magnéticas ou atmosféricas da Terra, o que foi uma grande vantagem em termos de estabilidade. No entanto, ela estava sujeita a efeitos da radiação solar, por não estar protegida por exemplo por uma atmosfera.

Durante sua missão, o telescópio perdeu duas de suas 4 “rodas”, que funcionavam como giroscópios, usadas para posicioná-lo, segundo informações de Johnson (2018). Nos meses seguintes, foi organizada uma nova missão ainda usando o telescópio, intitulada K2.

Para continuar a usar a nave, conforme diz Johnson (2017a), a equipe da missão desenvolveu uma técnica que usou justamente a pressão solar para estabilizar o telescópio, para que tivesse equilíbrio suficiente para continuar com as observações. Com sua mobilidade reduzida, a nova missão observava uma região no céu por até 83 dias antes de ter que manobrar para que a luz solar não entrasse no telescópio. A missão K2 foi desativada em 2018.

De acordo com Johnson (2017c), o “único instrumento” da missão era um fotômetro com 42 CCDs (*charged couple devices*, dispositivos de carga acoplada), dispositivos usados para detecção de luz e formação de imagens de alta definição. Os dados acumulados da observação contínua do céu eram recebidos pela equipe da missão cerca de uma vez por mês.

Por se tratar de uma missão exclusivamente para detectar exoplanetas pelo método de trânsito, a sonda Kepler fez um ótimo uso de seus CCDs, trazendo dados de milhares de observações durante todo seu tempo de missão original e estendido, o que pode ser verificado com o número de planetas descoberto pela missão, e também o número de candidatos: 2394 e 2366, respectivamente, para a missão Kepler; e 425 e 889, para a missão K2.

Alguns dos resultados científicos da missão Kepler são muito interessantes, conforme diz Chen (2018): o telescópio provou que há mais planetas do que estrelas na galáxia, havendo estimativas de, aproximadamente, cada estrela possuir pelo menos um planeta. Foi revelado que há muitos planetas semelhantes à Terra em tamanho e distância às suas estrelas, o que chama a atenção para a investigação mais a fundo de tais mundos, levando em conta o foco principal da missão, de encontrar planetas em zonas habitáveis. Outras informações importantes são a existência de uma grande variedade em tipos e sistemas de planetas, desde pequenos e de dimensões terrestres até Júpiteres gigantes, e sistemas com desde um até oito planetas, orbitando próximos até bem distantes de suas estrelas.

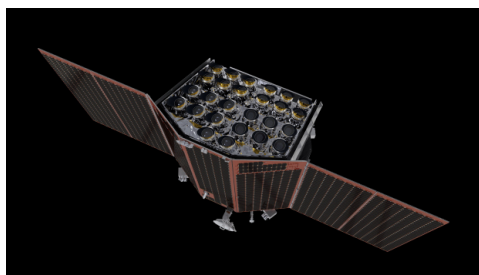
A sonda também observou mais de meio milhão de estrelas durante seus nove anos de missão, e assistiu a várias explosões de supernovas, trazendo mais informações acerca do estudo das estrelas.

2.5.3 PLATO

A missão PLATO (*PLAnetary Transits and Oscillations of stars*, Trânsitos Planetários e Oscilações de estrelas) tem como objetivo a observação de estrelas e busca por planetas pelo método de trânsito, como seu próprio nome revela, segundo ESA Science & Technology (2021b). O foco da missão é encontrar e caracterizar planetas terrestres na zona habitável de suas estrelas, no intuito de analisar o que torna tais planetas habitáveis. É dito que a missão terá uma precisão sem igual. Seu lançamento está programado para 2026.

Na Figura 19 está uma representação artística da missão PLATO, onde podem ser vistos seus 26 telescópios e painéis solares. Segundo ESA Science & Technology (2019a), a missão também foi

Figura 19 – Representação artística da nave PLATO



Fonte: ESA; ATG medialab (2019)

desenvolvida para investigar oscilações nas estrelas, o que a torna semelhante à missão CoRoT. No entanto, com o avanço da tecnologia, foi possível o refinamento da precisão de equipamentos, entre eles os usados em missões espaciais. Dessa forma, sua diferença da missão CoRoT se dará também na precisão de seus dados observados. Diferença essa também relacionada à missão Kepler, com seus dados de trânsito.

De acordo com ESA Science & Technology (2021b), a missão pretende realizar esses objetivos por meio das técnicas de trânsito pela nave, velocidade radial por observatórios na Terra, e análises asterossismológicas da estrela; cada um dos métodos de detecção traz diferentes informações sobre o planeta (raio, massa), então além de poder detectar e confirmar os planetas, usando ambas as técnicas - um exoplaneta deve ser detectado por ao menos duas técnicas diferentes para ser confirmado -, a missão também poderá obter todos os dados necessários para conseguir caracterizar os que forem detectados com sucesso.

Segundo ESA Science & Technology (2021f), a nave contará com um número de 26 telescópios pequenos, de rápido movimento e de campo de visão amplo; sua órbita será ao redor do ponto de Lagrange L_2 do sistema Sol-Terra, ponto de equilíbrio instável. Por esse motivo, a nave precisará corrigir sua órbita periodicamente; ela levará combustível para 8 anos e meio de missão, sendo que ao menos 4 deles serão de operações científicas, em um primeiro momento.

O ponto de Lagrange L_2 é conhecido por ter sido região de operação de várias naves, como WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), Planck, e o futuro JWST (*James Webb Space Telescope*), segundo Barnett (2020b). Tal ponto é considerado ideal para se situar uma missão pela facilidade de comunicação com a Terra; pela simplicidade em ocultar o Sol, a Terra e a Lua de seus equipamentos, pois na posição basta manobrar para estar virada para o lado oposto que não haverá ocultações e nem danificação dos equipamentos por conta da direta radiação solar. Segundo ESA Science & Technology (2021c), a cada três meses, a nave deverá girar em 90° para evitar a luz solar. Ela estará a aproximadamente 1.5 milhões de quilômetros da Terra.

Segundo ESA Science & Technology (2021e), após a proposta da missão ser apresentada pela primeira vez e então estudada por 2008 e 2009, ela não chegou a ser escolhida para as próximas duas oportunidades de lançamento M1 e M2, sendo escolhidas as missões *Solar Orbiter* e *Euclid*. Porém, a missão foi deixada como candidata à próxima oportunidade de lançamento M3, e em fevereiro de 2014 foi confirmada como a missão M3 do programa *Cosmic Vision*.

A missão também terá capacidade de descobrir planetas orbitando estrelas binárias, exoluas, exoanéis, exocometas e planetas ao redor de sistemas jovens e também evoluídos, segundo ESA

Science & Technology (2019e). Isso se dará por conta do grande campo de visão que terá do céu, sua alta precisão e suas campanhas de longa observação contínua.

De acordo com ESA Science & Technology (2021d), a nave contará com dois módulos: o módulo de carga e o de serviço. Ambos são separados, sendo que o módulo de carga terá a função de abrigar e proteger as câmeras da exposição à luz solar. Já o módulo de serviço conterá um escudo e painéis solares, um sistema de propulsão e controle de altitude, e sistemas de controle térmico, comunicação e controle. O escudo protegerá as câmeras do Sol; os painéis serão usados para fornecer energia à nave; o sistema de propulsão e controle de altitude será responsável por manter a órbita e estabilizar a nave para observações; o controle térmico terá como função a manutenção de temperaturas entre os componentes, cuidando para que não atinjam temperaturas capazes de danificá-los; o sistema de comunicação enviará os dados da missão para Terra, contando com 4 antenas, enquanto o de controle será o meio da equipe enviar comandos e gerenciar o satélite.

Figura 20 – Nave e módulos da missão PLATO



Fonte: ESA; ATG medialab (2020)

A Figura 20 ilustra a nave completa e seus dois módulos separados.

Cada uma de suas câmeras possuirá 6 lentes e 4 CCDs, com um campo de visão de 1100 graus quadrados, segundo ESA Science & Technology (2019d), e as câmeras “comuns” serão organizadas em quatro grupos de 6. Isso tornará a nave capaz de observar um campo total de 2250 graus quadrados a cada observação.

O plano atual da missão é de realizar duas observações de longa duração do céu, cada uma podendo durar até dois anos, conforme diz ESA Science & Technology (2021c). Há também um planejamento diferente, que consiste em uma observação contínua de três anos, e um ano com observação em vários pontos. Estima-se que a missão tenha feito a cobertura de 10 a 50% do céu, no tempo previsto de 4 anos para observações científicas.

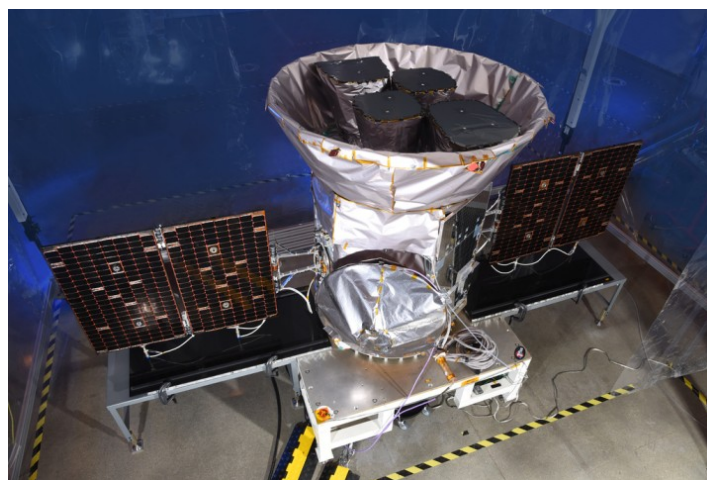
2.5.4 TESS

A missão TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*, Satélite de Pesquisa de Planetas em Trânsito) é, como as anteriores, uma missão de busca por exoplanetas, especialmente aqueles que passam na frente de suas estrelas em um trânsito, segundo Barclay (2021a). Seu foco é encontrar planetas menores que Netuno para que com seu trânsito, sejam identificadas características como sua massa e composições atmosféricas. Ela é liderada pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*, Instituto de Tecnologia de Massachusetts), com parcerias da NASA e outros institutos.

Ela teve início em abril de 2018, sendo lançada em um foguete Falcon 9 pertencente à SpaceX, em Cabo Canaveral. Após uma série de manobras orbitais, o satélite chegou à sua órbita final depois de 60 dias do lançamento, conforme diz Barclay (2021a), uma órbita terrestre alta (*high Earth orbit*) e elíptica, de forma a ter um campo de visão limpo para fazer suas observações. Com um período de aproximadamente 13.7 dias, de acordo com Massachusetts Institute of Technology (), o satélite entrou em ressonância com a Lua, minimizando suas perturbações e adquirindo uma posição estável por muito tempo, sendo necessárias poucas manobras para mantê-la. Começou a operar em julho do mesmo ano.

É esperado que a missão catalogue milhares de exoplanetas candidatos, para que em futuras análises eles possam ser confirmados e estudados mais a fundo, de acordo com Garner (2020). Cada uma de suas 4 câmeras CCD tem um campo de visão de 24 graus quadrados, segundo Massachusetts Institute of Technology (), totalizando um campo de $24^\circ \times 96^\circ$ em cada setor de observação, com duração de aproximadamente 27 dias de observação para cada um dos 30 setores.

Figura 21 – Satélite TESS



Fonte: Orbital ATK (2018)

O satélite é exibido na Figura 21, onde podem ser vistas suas câmeras envoltas pela proteção da luz solar, a nave, seus painéis solares e sua antena.

O planejamento da missão previa que o hemisfério sul do céu seria observado no primeiro ano, e o hemisfério norte no segundo. O esperado é que a missão cubra cerca de 85% do céu, de acordo com Barclay (2021a). Por ser capaz de observar estrelas mais brilhantes do que a missão Kepler, exoplanetas ao redor de tais estrelas serão mais facilmente caracterizados com análises dos dados obtidos por bases terrestres, o que trará medidas mais precisas de suas composições e atmosferas. Pelo

menos dois trânsitos devem ser observados em seus períodos de observação para tornar um planeta um candidato.

A missão oficial acabou e a estendida começou em julho de 2020, com o foco agora de atender pedidos de observações da comunidade científica pelos dois anos seguintes, segundo Barclay (2021b).

2.6 EVOLUÇÃO ESTELAR

Um ponto importante a ser considerado na habitabilidade de planetas é a fase de evolução em que sua estrela se encontra, e como ela evoluirá com o tempo. As estrelas possuem várias fases durante sua vida, desde sua formação até sua morte, e dependendo do seu tipo, pode haver grandes mudanças em suas características de uma fase para outra.

Conforme os cálculos de Schröder e Smith (2008), em 7.59 bilhões de anos, o Sol - hoje uma estrela da classe G2 V com aproximadamente 4.5 bilhões de anos de idade - se tornará uma gigante vermelha completa cujo raio poderá se estender até 1.2 AU, englobando os planetas interiores do Sistema Solar, e deslocando sua zona habitável para fora, para a faixa de 49 a 71 AU - na região do Cinturão de Kuiper.

Se a Terra possuísse uma órbita de pelo menos 1.15 AU talvez sobreviveria à expansão do Sol, mas não seria de muita valia visto que o crescimento do Sol tornaria a Terra um planeta inabitável devido à sua alta temperatura e efeitos atmosféricos e físicos resultantes do processo.

Sendo assim, dependendo do tipo de sua estrela, um planeta habitável hoje pode não ser em milhões de anos. Por isso, para a habitabilidade de sistemas, é importante essa determinação do tipo e de como a estrela irá evoluir com o tempo.

Uma maneira de acompanhar e analisar a evolução de uma estrela é por meio do diagrama de Hertzsprung-Russell (HR), que traz informações sobre sua luminosidade e temperatura superficial. Também há variações que mostram sua magnitude aparente, massa e tipo espectral.

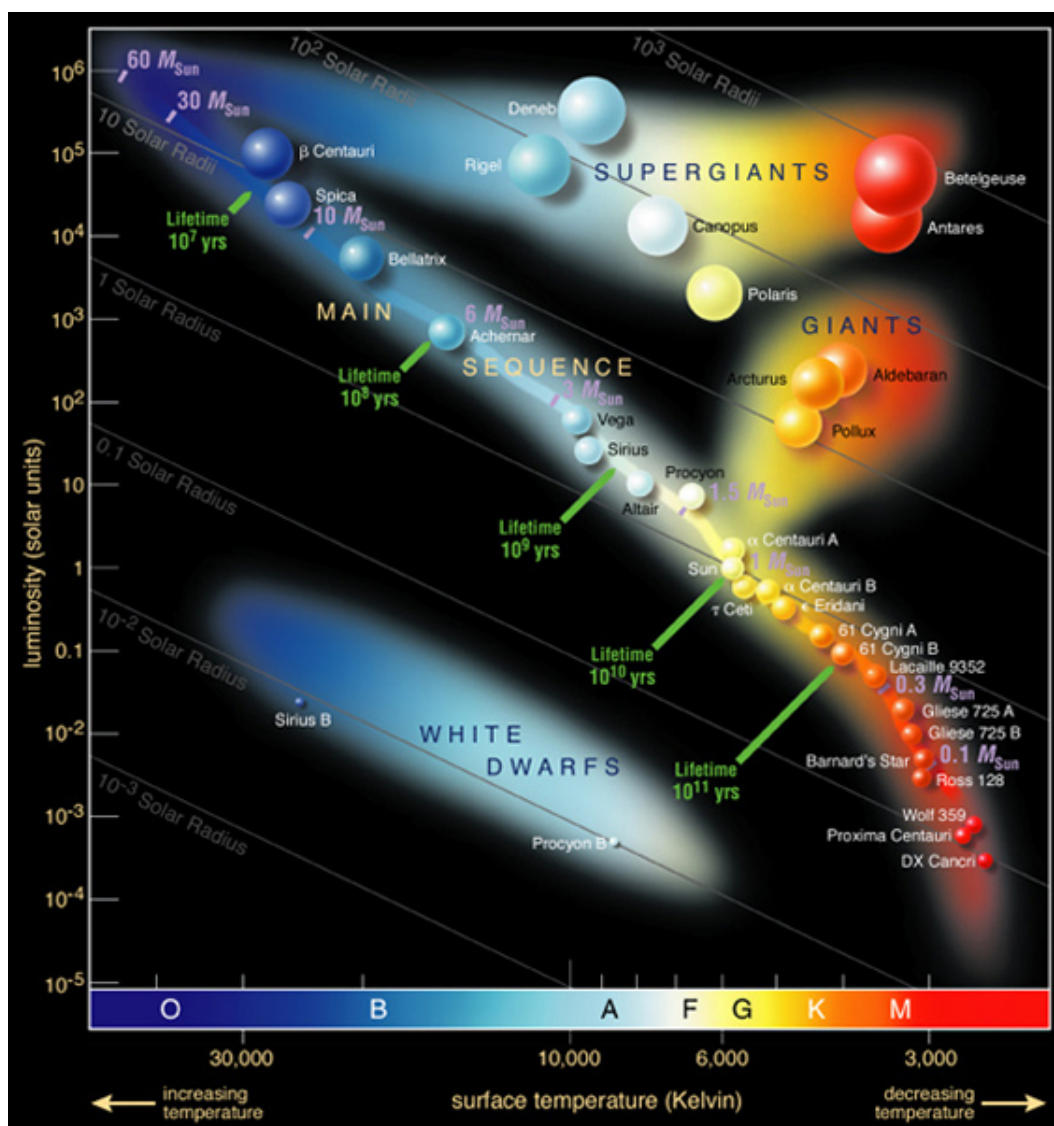
A Figura 22 mostra um diagrama HR que exibe a luminosidade (em termos do Sol), temperatura superficial e tipo espectral de várias estrelas, traz seus tempos de vida e compara seus tamanhos com o do Sol. O Sol se encontra na faixa G, em aproximadamente 6000 K de temperatura, em um tempo de vida marcado de 10^{10} anos.

Estrelas cujas reações termonucleares fundem hidrogênio em hélio - mais comuns - localizam-se na sequência principal, mas quando esgotam seu combustível, acabam se tornando anãs brancas, ou gigantes ou supergigantes vermelhas, dependendo de sua massa, segundo European Southern Observatory (2007). Há um limite - de massa - acima do qual a estrela irá crescer quando passar para a próxima fase de evolução, e abaixo do qual ela irá diminuir até se tornar uma estrela anã.

As estrelas do diagrama geralmente são separadas por regiões, como pode ser visto na figura. São elas: as anãs brancas, na região inferior esquerda; a sequência principal, região diagonal acima do centro; as gigantes, um pouco acima e à direita da sequência principal; e as supergigantes, acima das gigantes. Cada uma delas, exceto a sequência principal, constitui diferentes tipos de estrelas, em diferentes fases de evolução.

Segundo NASA e Team (2010), estrelas da sequência principal - como o Sol - são aquelas que fundem hidrogênio em hélio em seu interior.

Figura 22 – Diagrama de Hertzsprung-Russell



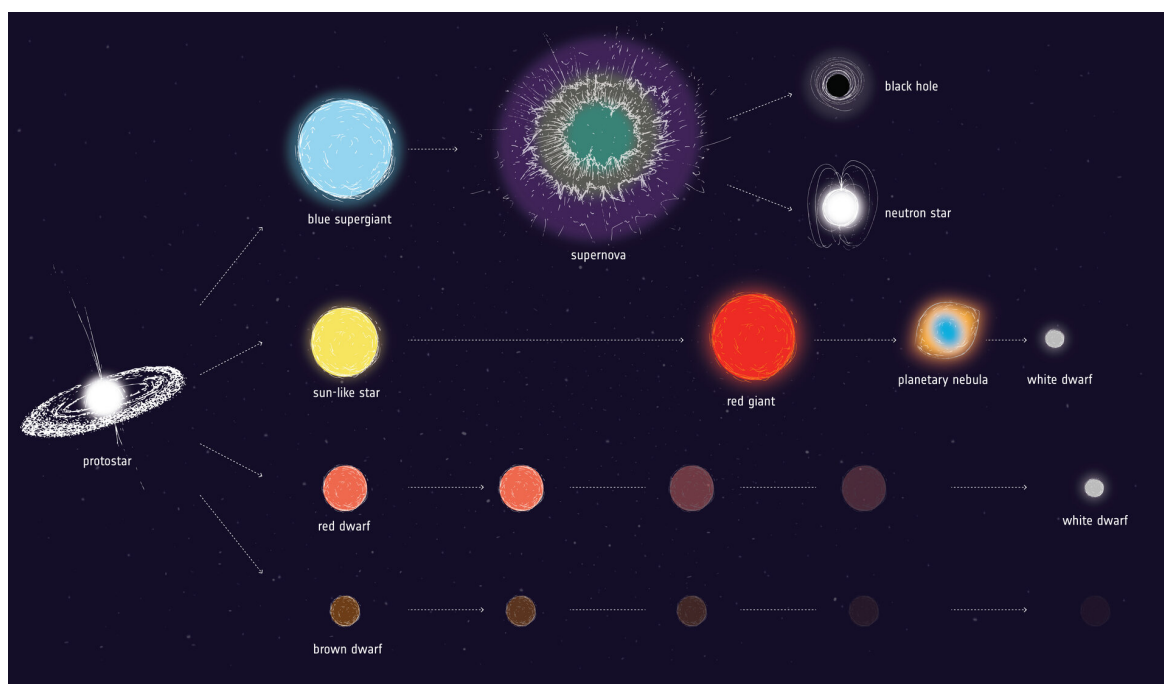
Fonte: ESO (2007)

A luminosidade de uma estrela depende das reações termonucleares que acontecem em seu interior, o que, por sua vez, é consequência direta de sua massa, pressão e temperatura; quanto maiores forem seus valores, Iliadis (2015) diz que mais rapidamente energia nuclear é gerada, o que contribui para a temperatura superficial. Seguindo o mesmo raciocínio, o autor cita que o tempo de vida de uma estrela na sequência principal depende diretamente desses valores, pois se uma estrela tem grande luminosidade, mais combustível ela queima para emitir radiação. Desse modo, estrelas maiores e mais quentes tem um tempo de vida menor.

Na Figura 23, está representada uma visão artística de como se dá a evolução estelar para estrelas com diferentes massas. As estrelas menos massivas, anãs marrons e vermelhas, continuam em seu estado anão, por possuírem pouca massa para queimar. De acordo com The European Space Agency (2018), as marrons não conseguem temperaturas altas o suficiente para queimar seu combustível, e desaparecem; as vermelhas mantêm o processo de fusão até acabar com todo seu hidrogênio, e transformam-se em anãs brancas.

A partir das estrelas com massas solares o processo é diferente: estrelas aproximadamente iguais

Figura 23 – Evolução estelar



Fonte: ESA (2018)

ao Sol em termos de massa passam por alguns estágios em suas vidas, primeiramente ao consumir todo o hidrogênio disponível em seu núcleo, e crescendo até se tornarem gigantes vermelhas; que por sua vez, devido à pressão e contração, explodem numa nebulosa planetária, por fim tornando-se anãs brancas, segundo NASA e Team (2010).

Estrelas mais massivas explodem em uma supernova - eventos capazes de serem vistos mesmo de estrelas muito distantes, mais brilhantes do que uma galáxia inteira, de acordo com NASA e Team (2010) -, que pode dar origem a uma estrela de nêutrons ou um buraco negro, dependendo da massa inicial da estrela.

Pode ser verificado que o comportamento e a evolução de uma estrela estão intrinsecamente relacionados à sua massa.

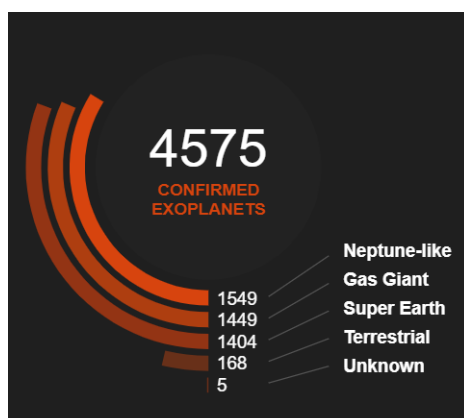
Para estrelas com até 8 massas solares, conforme explica Swinburne University of Technology (), a contração irá torná-las anãs brancas após a explosão da nebulosa. Para estrelas mais massivas, após uma série de contrações, aquelas cujos núcleos restantes possuírem até 3 massas solares colapsarão em uma supernova e se tornarão uma estrela de nêutrons. Se a massa de seus núcleos for maior que o triplo da do Sol, o colapso será tamanho que originará um buraco negro.

2.7 TIPOS DE EXOPLANETAS

Para a divisão dos mais de 4000 exoplanetas confirmados até hoje, foram elaboradas quatro categorias: planetas terrestres, do tipo Terra; super-Terras; planetas do tipo Netuno; e gigantes gasosos.

A Figura 24 mostra os planetas confirmados de acordo com seu tipo, até 28 de novembro de 2021, segundo dados de Brennan (2021c). Os planetas mais frequentemente encontrados são os do tipo Netuno, seguidos por um número muito próximo de gigantes gasosos e super-Terras. Assim pode-se ter

Figura 24 – Distribuição de exoplanetas por tipo

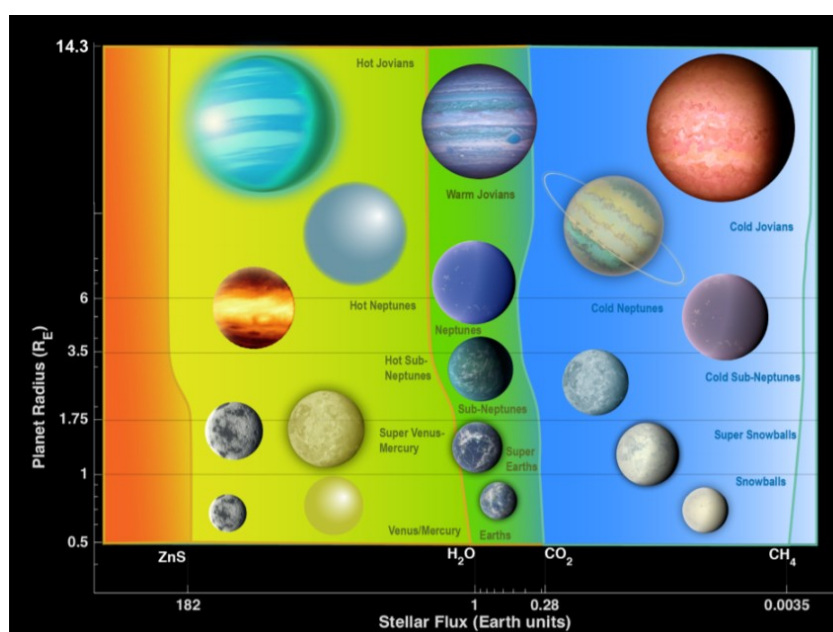


Fonte: NASA (2021)

uma ideia geral dos planetas mais facilmente encontrados pelos métodos de detecção atuais espalhados pela galáxia, planetas maiores e mais massivos do que a Terra.

As classes de exoplanetas têm subtipos, que relacionam as temperaturas às quais os planetas estão submetidos. São, por exemplo, os “Júpiteres quentes”, “super-Terras frias”, entre outros.

Figura 25 – Classificação de exoplanetas em categorias



Fonte: Kopparapu; Wolf; Meadows (2020)

A Figura 25 apresenta os diferentes tipos e subtipos de exoplanetas, separados por tamanho, fluxo de radiação recebido pela estrela, e composição química da atmosfera, segundo Kopparapu, Wolf e Meadows (2020). De acordo com o fluxo estelar, os planetas possuem diferentes tipos de atmosferas, determinadas por cálculos de equilíbrio químico.

Podem ser vistos jovianos “quentes”, “mornos” e “frios” referentes a planetas gigantes e suas temperaturas, por conta da proximidade e fluxo de radiação recebido de suas estrelas; há também Netunos e sub-Netunos, super-Terras, Terras, Vênus/Mercúrio relacionando seus diferentes tamanhos e possíveis composições; e também “bolas de neve”, planetas frios e pequenos.

2.7.1 Tipo Terra

Planetas do tipo Terra são, como o nome diz, os mais semelhantes à Terra em características físicas, como tamanho, massa, e composição rochosa. O requisito para um planeta ser considerado do tipo terrestre é ser rochoso e ter de metade ao dobro do tamanho (raio) da Terra, segundo Brennan (2020e). Podem ser formados de rocha, ferro, carbono, água.

Alguns planetas do tipo Terra são Kepler-11 b, descoberto em 2010; TRAPPIST-1 d e TRAPPIST-1 e, ambos do sistema TRAPPIST-1, descobertos em 2016 e 2017, de acordo com Brennan (2021g) e Brennan (2021k). O sistema Kepler-11 é o mais compacto conhecido até hoje, com o planeta mais externo orbitando a uma distância entre as órbitas de Mercúrio e Vênus no Sistema Solar. Já o sistema TRAPPIST-1 possui 7 planetas dos tipos Terra e super-Terra orbitando uma estrela anã M a uma distância muito menor do que a de Mercúrio em relação ao Sol.

2.7.2 Super-Terra

Super-Terras são, essencialmente, planetas do tipo terrestre mas maiores e mais massivos. São a classe de planetas que mais se encontram candidatos potencialmente habitáveis, segundo dados de Planetary Habitability Laboratory (2020). Por haver pouco conhecimento sobre eles - já que é um tipo de planeta que não existe no Sistema Solar -, podem ser compostos de rocha, gás, água ou gelo, de acordo com Brennan (2020d). Exoplanetas desse tipo possuem a partir de duas vezes o tamanho da Terra, e até 10 vezes a sua massa.

Segundo Brennan (2021j), dados da missão Kepler mostram que são raros os planetas cujo tamanho está entre 1.5 e 2 Terras (na faixa das super-Terras). É citado que tal faixa pode representar uma divisão nos tamanhos e tipos planetários: planetas que atingem tais tamanhos podem começar a atrair gás e formar envelopes ao redor de si, característicos dos planetas gasosos - e no caso, de planetas tipo Netuno; por outro lado, planetas que não atingem essa faixa podem permanecer rochosos.

Exemplos de super-Terras são Kepler-186 f, descoberto em 2014; GJ 273 b, descoberto em 2017; e HD 106315 b, também descoberto em 2017, segundo dados de Brennan (2020d). HD 106315 b orbita uma estrela do tipo F, maior e mais massiva do que o Sol.

Uma super-Terra interessante é Kepler-22 b, um mundo possivelmente coberto de água com uma massa de 36 Terras e raio de $2.38 R_{\oplus}$, cuja temperatura é aproximadamente 262 K, que encontra-se próximo da zona habitável de sua estrela, mas cuja inclinação pode auxiliar em sua habitabilidade segundo modelos calculados, de acordo com as informações de Brennan (2021i).

2.7.3 Tipo Netuno

Exoplanetas do tipo Netuno são maiores que a Terra e podem ter diferentes composições, mas possuem núcleos rochosos ou compostos por elementos pesados e grandes camadas de gás ao seu redor, formadas principalmente por hidrogênio e hélio, conforme diz Brennan (2020c).

Exoplanetas desse tipo têm tamanhos semelhantes a de Netuno e Urano no Sistema Solar, aproximadamente 4 Terras. Um subtipo de planetas encontrados tem sido os “mini-Netunos”, cujo tamanho ultrapassa o das super-Terras, mas é menor que o de Netuno.

Exemplos de exoplanetas do tipo Netuno são GJ 436 b, descoberto em 2004; Kepler-1655 b, descoberto em 2018; e HAT-P-26 b, segundo dados de Brennan (2021d), Brennan (2021h) e Brennan (2021e). Kepler-1655 b orbita uma estrela do tipo F, um pouco maior do que o Sol; GJ 436 b é curioso por não possuir metano, comum aos planetas do Sistema Solar, o que seria esperado dados seus gases e a alta temperatura que possui por conta de sua estrela; HAT-P-26 b tem uma massa de aproximadamente 22 Terras e leva pouco mais de 4 dias para completar uma órbita ao redor de sua estrela, pouco menor do que o Sol.

2.7.4 Gigante gasoso

Gigantes gasosos são análogos aos planetas jovianos do Sistema Solar: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. No caso, são planetas com grandes envelopes de gás ao redor de si, e têm dimensões maiores que pelo menos as de Netuno. Esses envelopes são compostos principalmente por hidrogênio e hélio, segundo Brennan (2020a).

Possuem dimensões semelhantes aos dos planetas jovianos, chegando até a 4 Júpiteres, embora possa haver planetas confirmados maiores e aqueles cujo tamanho ainda não é conhecido.

Alguns exoplanetas desse tipo são o Júpiter quente KELT-9 b, descoberto em 2017; 51 Pegasi b, descoberto em 1995; e 2MASS J01225093-2439505 b, descoberto em 2013, segundo Brennan (2021f), Brennan (2021b) e Brennan (2021a). KELT-9 b é tão quente em seu lado iluminado pela estrela que suas moléculas se quebram, podendo chegar até 4600 K - mais quente do que a superfície de algumas estrelas. 51 Pegasi b orbita uma estrela do tipo G - o mesmo do Sol - pouco maior que o Sol, em 4 dias. 2MASS J01225093-2439505 b tem o tamanho de Júpiter, mas sua massa é 24.5 vezes maior que a do planeta gigante, e orbita sua estrela do tipo M a 52 AU de distância, resultando em um período orbital de aproximadamente 593 anos.

2.8 SISTEMAS EXOPLANETÁRIOS

A seguir serão tratados sistemas interessantes por serem compostos de vários exoplanetas, estrelas binárias - sistemas com duas estrelas ao invés de somente uma -, e por possuírem mais de um planeta na zona habitável. O estudo de sistemas de múltiplos planetas pode trazer informações importantes acerca de sua formação e evolução, o que pode ser comparado diretamente aos modelos conhecidos do próprio Sistema Solar. O estudo de sistemas binários pode trazer oportunidades únicas de testes de modelos orbitais com perturbações fortes ou fracas, entre outras características. E ter a possibilidade de caracterizar um sistema com planetas habitáveis é fundamental para determinar com mais precisão o que torna um planeta habitável e como os outros planetas influenciam nisso, além de ser importante para indicar candidatos para estudos profundos em futuras pesquisas cada mais precisas no ramo.

2.8.1 Kepler-90

O sistema Kepler-90 (também conhecido como KIC 11442793 e KOI 351) possui oito planetas, com períodos orbitais variando desde 7 até 330 dias, e semieixo maior de 0.074 até 1.01 AU, segundo os dados de Cabrera et al. (2014). Nele, há 2 planetas de tamanho terrestre, 3 super-Terras, 2 gigantes

gasosos, sendo que o último - Kepler-90 i - foi descoberto só recentemente, em 2017, enquanto o sistema foi descoberto em 2013.

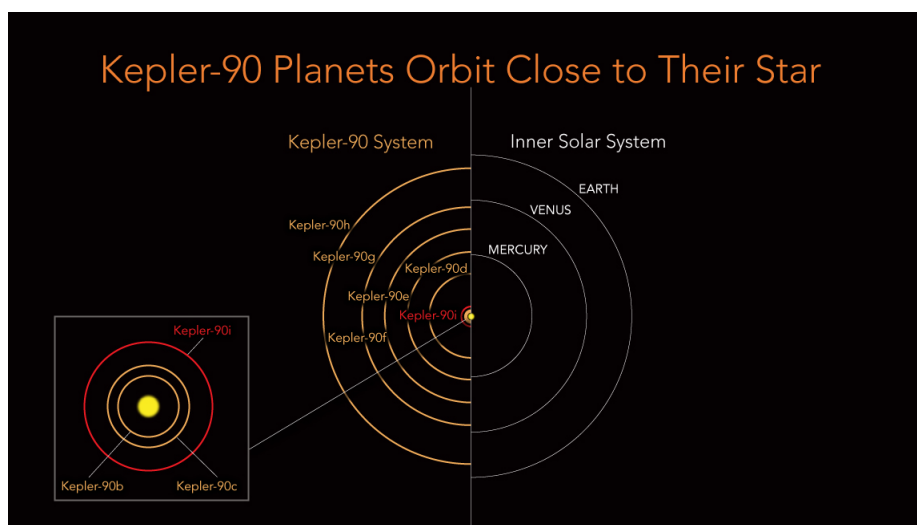
Diz-se que Kepler-90 é um sistema hierárquico, por conta da variedade de tipos de planetas, e por seus tamanhos aumentarem conforme a distância que se encontram da estrela. Isso é um reflexo do próprio Sistema Solar, que possui planetas pequenos e rochosos próximos do Sol, e planetas gigantes a maiores distâncias.

Os planetas gigantes são gasosos, e são formados por meio do acúmulo de gás disponível longe da estrela, em seus períodos de formação. De acordo com Boss (2014), o processo de formação se dá da seguinte maneira: primeiramente ocorre a colisão e acúmulo de corpos sólidos cada vez maiores - desde partículas até planetesimais de vários quilômetros. Em seguida, contando com um núcleo planetário de algumas massas terrestres, o núcleo acreta envelopes massivos de gás disponível. Com o tempo, o protoplaneta atrai mais planetesimais e mais gás, crescendo rapidamente.

Pelo fato de estarem mais distantes da estrela, e portanto, terem mais gás disponível durante sua formação, os planetas gasosos crescem com um núcleo sólido envolto por grande envelope de gás.

Seus planetas gigantes gasosos Kepler-90 f, e g produzem 0.8% e 0.5% de trânsito, de acordo com os dados de Cabrera et al. (2014), o que significa que podem ser observados da superfície da Terra, facilitando observações de telescópios terrestres.

Figura 26 – Órbita do sistema Kepler-90



Fonte: NASA (2017)

A Figura 26 apresenta a órbita dos planetas do sistema Kepler-90 em comparação com os planetas interiores do Sistema Solar. A órbita mais externa, de Kepler-90 h, está em média mais próxima de sua estrela do que a órbita terrestre de 1 AU. Em *zoom* estão os planetas Kepler-90 b, c e i do sistema, sendo i o último deles confirmado.

Os quatro primeiros planetas do sistema a partir da estrela - b, c, i e d - encontram-se em uma órbita mais interna do que a de Mercúrio em relação ao Sol, o que caracteriza períodos muito curtos em relação aos planetas restantes (de 7 a 60 dias), e também altas temperaturas (de 1056 a 518 K), de acordo com os dados de The Extrasolar Planet Encyclopaedia (2021).

Segundo Chen (2017), a configuração do sistema sugere que os planetas tenham se formado mais distantes da estrela e de alguma forma se aproximaram até as órbitas que possuem hoje. Isso também é verificado em outros sistemas de vários planetas, em que autores sugerem que inicialmente os planetas estavam em órbitas semelhantes às dos planetas do Sistema Solar e depois aproximaram-se da estrela.

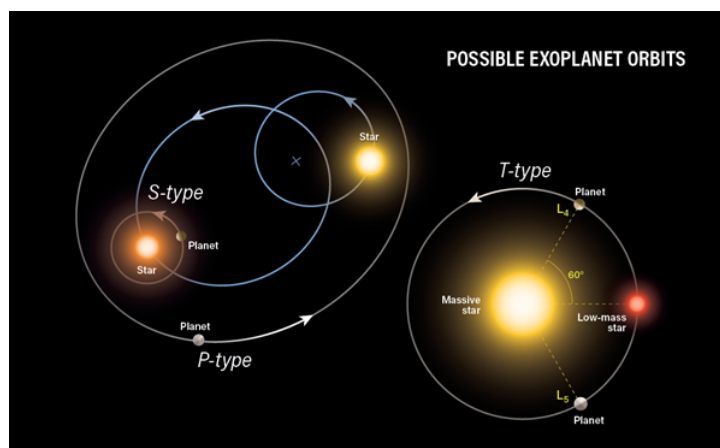
Há casos em que tal aproximação ocorre ainda na fase de formação planetária, quando há um disco de gás ao redor da estrela e os planetas estão imersos nele. Ao se mover em tal meio repleto de gás, o planeta sente o arrasto desse gás, o que ocasiona sua migração, assim trazendo-o a uma órbita mais interna, conforme discutido por Boss (2014).

Os planetas do sistema Kepler-90 contam todos com uma inclinação de aproximadamente 89 graus, segundo dados de The Extrasolar Planet Encyclopaedia (2021), o que pode sugerir que todos foram formados pela mesma nuvem de gás e poeira, e não sofreram impactos fortes o suficiente para que sua inclinação se alterasse drasticamente; como é o caso de Urano no Sistema Solar, que tem uma inclinação axial de aproximadamente 98 graus, de acordo com Barnett (2019d).

2.8.2 Estrelas binárias

Sistemas de estrelas binárias são compostos por duas estrelas, e têm uma série de particularidades, tais como: suas três possíveis órbitas em um mesmo sistema; e a possibilidade de interações entre as estrelas e o planeta ser tão intensa que causam a colisão do planeta com alguma das estrelas, ou sua expulsão do sistema. Há também a grande influência que a configuração do sistema tem na habitabilidade de planetas orbitando-as. Já foram descobertos mais de 150 planetas em mais de 103 sistemas desse tipo, segundo Schwarz (2021).

Figura 27 – Órbitas possíveis de exoplanetas em sistemas binários



Fonte: Kelly; Astronomy Magazine (2017)

A Figura 27 ilustra as três possíveis órbitas de um exoplaneta ao redor de um sistema de estrelas binário. Existem órbitas do tipo S, P, e T.

Em órbitas do tipo S, o exoplaneta orbita uma das estrelas, enquanto ela e a outra estrela, por sua vez, orbitam o centro de massa do sistema composto. Já em órbitas do tipo P, o planeta possui uma órbita externa às duas estrelas.

Por fim, há a órbita de tipo T, que se dá pelo planeta orbitando o ponto de Lagrange L_4 ou L_5 da estrela menor, enquanto ela orbita a maior em uma órbita comum. O planeta assume uma posição na

órbita de forma que seja formado um triângulo equilátero entre a estrela central, o planeta, e a estrela menor. Esse tipo de órbita também existe no Sistema Solar, sendo verificada com os asteroides troianos de Júpiter: o Sol é o corpo central, há Júpiter, e asteroides que permanecem ao redor dos pontos de equilíbrio L_4 e L_5 , sofrendo ação gravitacional de ambos, conforme diz Garner (2017).

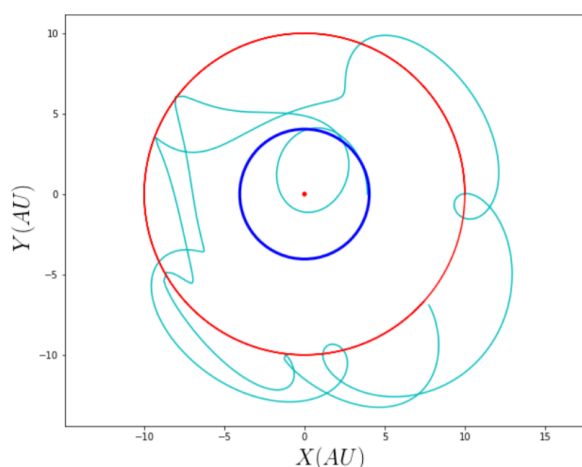
Em relação ao movimento orbital do planeta, pode ser esperado que uma órbita do tipo S pos- sua perturbações mais significativas, dependendo dos fatores de semieixo maior, excentricidade, e principalmente da distância entre as estrelas e suas massas; pois em determinados sistemas haverá momentos em que as estrelas estarão mais próximas entre si, e conseqüentemente haverá uma maior ação gravitacional sobre o planeta. Porém, haverá sistemas separados por uma grande distância, em que não haverá perturbações consideráveis na órbita do planeta.

Um planeta em órbita do tipo P deve ser capaz de experimentar várias mudanças em suas estações por todo o seu ano, visto que há períodos em que se encontra mais próximo da estrela mais massiva, depois se afasta, e aproxima-se da outra estrela, o que pode causar grandes variações, por exemplo, em sua temperatura.

De acordo com Klesman (2020) e Schwarz (2021), a maioria dos planetas conhecidos em sistemas binários têm órbita S, ao redor de somente uma das duas estrelas. Até então, não foi encontrado nenhum planeta com órbita T em um sistema. Planetas em órbitas T são chamados de planetas troianos, em semelhança com os troianos de Júpiter.

Segundo as simulações de estabilidade planetária de Capuzzo-Dolcetta, Cesare e Marino (2020), em que foram usados diferentes parâmetros de massa e excentricidade para as estrelas, e variados valores de semieixo maior e massa do planeta, foi visto que havia 4 possíveis resultados: órbita estável, colisão com a estrela primária, colisão com a estrela secundária, e a expulsão do planeta do sistema. Nos casos de expulsão do planeta, verificou-se que sua órbita perturbada passava de uma do tipo S para uma do tipo P por um certo período, antes de ser ejetado. Essa observação levou os autores a inferirem a hipótese de que podem ocorrer transições de órbita de planetas em sistemas binários, se satisfeitas as condições certas.

Figura 28 – Exemplo de colisão de um planeta com uma estrela secundária em um sistema binário



Fonte: Capuzzo-Dolcetta; Cesare; Marino (2020)

Na Figura 28, está representada uma colisão de um planeta com uma estrela secundária, exemplo

dos resultados das simulações de Capuzzo-Dolcetta, Cesare e Marino (2020). A órbita sem perturbações está em azul, a órbita perturbada do planeta em ciano, e a órbita da estrela secundária em vermelho. O ponto vermelho central é a estrela primária.

Os autores também definiram um parâmetro importante no problema da estabilidade, o semieixo maior crítico, que separa a região estável da instável. Valores de semieixo maior menores que o crítico significam que o planeta estará na região segura, estável da órbita; valores maiores colocam-no na região instável. Por meio da variação da excentricidade orbital das estrelas, da razão de massa entre elas e da massa do planeta, eles chegaram a resultados que dizem que quanto maior a excentricidade do sistema, maior a razão de massa, e menor a massa do planeta, menor será o semieixo maior crítico. Isso significa que para sistemas com essas características, menor será a região de estabilidade de um planeta, pois tais fatores podem resultar em influência gravitacional significativa das estrelas sobre ele.

Ou seja, sistemas sujeitos a esses parâmetros terão condições mais restritivas para que um planeta consiga se manter em órbita no sistema; visto que com alta excentricidade a órbita será alongada, podendo haver encontros próximos com a estrela secundária; e com grande razão entre as massas, uma das estrelas pode causar perturbações mais significativas na órbita do planeta.

As definições de habitabilidade em tais sistemas são interessantes, pois não levam em conta apenas as características da estrela principal, mas também da estrela secundária. Dependendo do sistema, a secundária pode, desde fazer pouca diferença na ZH da estrela principal, até movê-la para longe da órbita do planeta.

A análise de Thebault e Haghighipour (2015) revela que há complicações quando a estrela secundária, por exemplo, está muito próxima do planeta em uma órbita S. Assim, ela tem um grande papel na quantidade de radiação que chega até ele, o que pode alterar drasticamente os limites de ZH, além de poder causar instabilidade.

Na análise de Kane e Hinkel (2013), foi usada a generalização do cálculo de ZH de uma estrela para duas, combinando os parâmetros de vários sistemas binários e seus respectivos planetas. Segundo os autores, para apenas uma estrela, a ZH depende da energia solar recebida (fluxo estelar) e do pico da distribuição de energia, em comprimento de onda. Em posse de tais dados, é possível calcular os limites da ZH para uma estrela. Para mais de uma estrela o processo se torna mais complicado, visto que ambas terão emissão de radiação e diferentes fluxos estelares, que assumem diferentes valores em regiões no espaço ao seu redor, diferentemente de somente uma estrela.

Para Thebault e Haghighipour (2015), quando a radiação total recebida pelo planeta excede muito a recebida somente pela estrela principal, a ação da estrela secundária é não desprezível e, portanto, a ZH do planeta será afetada por ambas, não sendo possível considerar somente a influência da estrela principal.

O estudo de Barbosa et al. (2020) levou em conta a estabilidade de partículas na região da zona habitável de sistemas binários com planetas em órbitas do tipo P, ao redor de ambas as estrelas. Foram usados dados de vários sistemas reais para fazer simulações de como tais sistemas evoluíram com o tempo, de acordo com suas interações. O tempo total simulado foi de 1 milhão de anos.

Os resultados foram que, em vários dos sistemas, o movimento das estrelas ou dos planetas causa perturbações fortes o suficiente que acabam por expulsar as partículas da região, ou colocá-

las em órbitas mais excêntricas, ou colidi-las com o planeta. Em algumas situações, as partículas permaneceram em órbitas estáveis. No entanto, em alguns dos sistemas em que as partículas foram expulsas, outras permaneceram co-orbitando o planeta, sendo essas as que assumiram uma posição de equilíbrio estável. Tal situação é semelhante à que ocorre com a lua Tétis de Saturno, com outras duas luas menores, o que será tratado mais adiante.

A estabilidade orbital de sistemas binários leva em conta as massas, distâncias, e excentricidades das estrelas e dos planetas do sistema. Quanto menor a distância de um objeto ou planeta até o centro de massa das estrelas, mais forte será a perturbação que elas causam em sua órbita. A estabilidade em tais sistemas é delicada e depende de variados fatores, mas é possível.

Alguns exoplanetas confirmados em sistemas binários são: PSR B1620-26 (AB) b, que está em órbita P ao redor de um pulsar e uma estrela anã branca; DMPP-3A b (HD 42936 b), uma super-Terra em órbita S ao redor de uma estrela tipo Sol do sistema DMPP-3, com semieixo maior orbital de apenas 1.22 AU e período de aproximadamente 7 dias; segundo Sigurdsson et al. (2003), Barnes et al. (2020) e The Extrasolar Planet Encyclopaedia (2021).

2.8.3 TRAPPIST-1

TRAPPIST é o nome do telescópio que observou este sistema exoplanetário (*TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope*, Telescópio Pequeno de Planetas em Trânsito e Planetesimais), em funcionamento desde 2010, segundo European Southern Observatory (). TRAPPIST-1 ganhou certa notoriedade por se tratar tanto de um sistema com vários planetas (7) quanto por possuir 3 deles na zona habitável da estrela: os planetas TRAPPIST-1 e, f, e g.

Os dados de Gillon et al. (2017) sugerem que os seis planetas interiores do sistema são rochosos. Todos têm dimensões terrestres, massas que variam desde 0.41 até $1.38 M_{\oplus}$ e todos orbitam muito próximos de sua estrela, sendo o semieixo maior de TRAPPIST-1 h - o planeta mais externo - de apenas 0.06 AU.

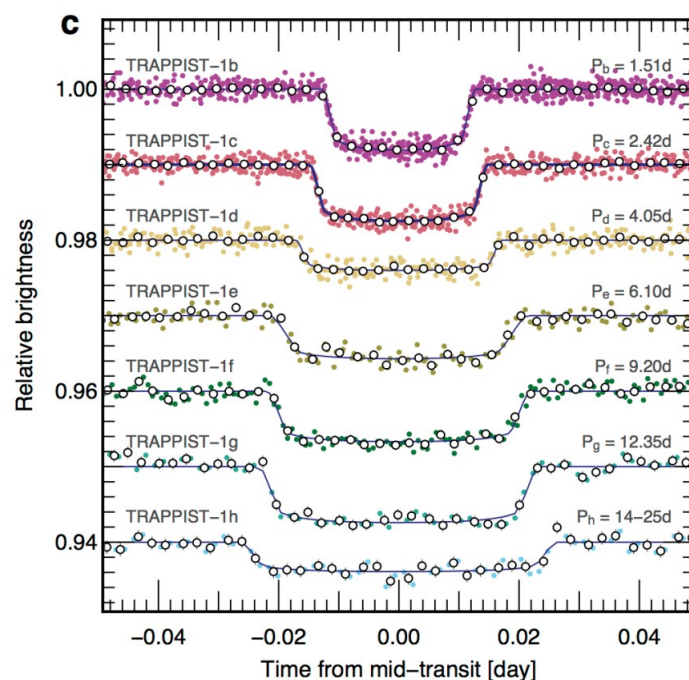
A densidade dos planetas variam desde 0.6 até $1.0 \rho_{\oplus}$, conforme os dados de Grimm et al. (2018), caracterizando planetas rochosos. Os autores revelam que TRAPPIST-1 c e e têm possivelmente interiores rochosos, enquanto os cálculos indicam que os planetas restantes podem ter grandes atmosferas, oceanos ou gelo.

A estrela do sistema é uma anã “ultrafria” - pouco maior do que Júpiter - do tipo M, cuja temperatura superficial está abaixo de 2700 K; estrelas desse tipo emitem radiação no infravermelho, conforme explica Gillon et al. (2016), razões pelas quais é possível caracterizar totalmente os planetas do sistema.

A Figura 29 exhibe as medições fotométricas realizadas pelo telescópio Spitzer do trânsito de todos os planetas de TRAPPIST-1, conforme os dados de Gillon et al. (2017). Os pontos coloridos representam os dados obtidos, e os pontos brancos representam uma média dos dados a cada dado intervalo de tempo. As linhas coloridas mostram o modelo que melhor se encaixa com os dados.

Os planetas interiores têm períodos mais curtos e os exteriores mais longos. Os autores também explicam que o sistema apresenta uma “quase” ressonância, com razões entre o período de seus planetas aproximando-se de pequenos inteiros: $8/5$, $5/3$, $3/2$ e $4/3$. Tal ressonância é responsável por variações percebidas em seus tempos de trânsito.

Figura 29 – Dados de trânsito do sistema TRAPPIST-1



Fonte: Gillon et al. (2017)

A configuração atual dos planetas sugere que eles possam ter se formado em regiões mais distantes da estrela e se aproximado até as órbitas que possuem hoje, segundo Gillon et al. (2017). Isso significa que alguns dos planetas poderiam ter atmosferas antigamente, mas perderam-na por conta da proximidade com a estrela. Grimm et al. (2018) afirmam que a análise das massas e densidades dos planetas também indica uma formação e crescimento dos protoplanetas distantes da estrela, além da região de congelamento de água, e que é consistente com sua consequente migração para a zona de planetas rochosos.

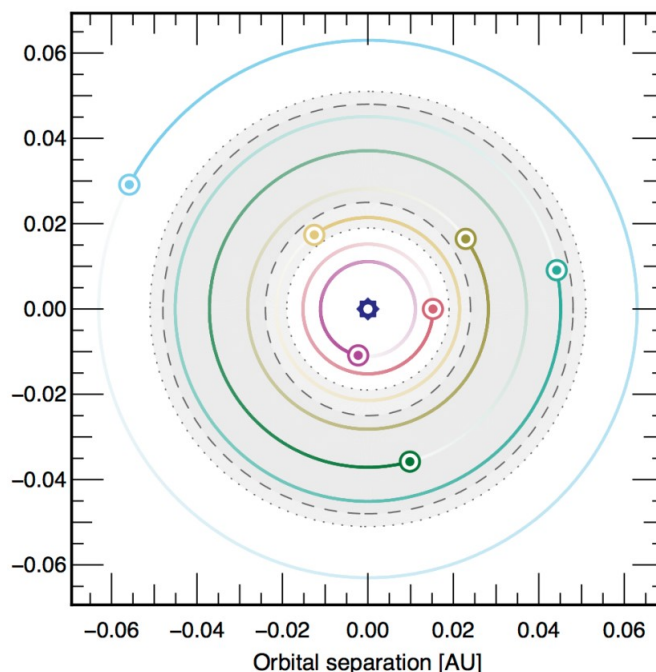
Uma análise computacional preliminar da estabilidade de TRAPPIST-1 por Gillon et al. (2017) revelou que há uma chance de 25% do sistema sofrer uma instabilidade em 1 milhão (10^6) de anos, e de 8,1% dele conseguir chegar a até 1 bilhão (10^9) de anos. No entanto, não foram considerados a proximidade dos planetas com a estrela e o acoplamento e efeitos de maré resultantes. Esses fatores podem tanto estabilizar quanto desestabilizar o sistema, o que pode influenciar em sua estabilidade a longo prazo.

Grimm et al. (2018) explicam que a indicação de que o sistema todo migrou para perto da estrela se dá por conta de possuir uma corrente de ressonâncias, fato também verificado por Gillon et al. (2017). Sistemas comuns que apresentam ressonâncias têm tendências de instabilidade, mas a migração de todos os planetas em conjunto de TRAPPIST-1 é a responsável por tornar o sistema estável por tanto tempo.

Por possuírem baixos semieixos maiores, os planetas encontram-se muito próximos de sua estrela, o que causa um acoplamento de maré, segundo Gillon et al. (2016). Isso pode causar diferenças consideráveis em suas temperaturas entre seus hemisférios iluminados pela estrela e os sombreados. O planeta h conta com uma temperatura de equilíbrio de aproximadamente 168 K, enquanto a do planeta b é de aproximadamente 400 K, segundo os dados de The Extrasolar Planet Encyclopaedia (2021),

ambos em extremos opostos da temperatura necessária para a existência da água líquida. O planeta d é o que melhor se encaixa nesse quesito, com uma temperatura média de 288 K, sem contar possíveis efeitos atmosféricos para contribuição de sua temperatura.

Figura 30 – Órbitas planetárias de TRAPPIST-1



Fonte: Gillon et al. (2017)

A Figura 30 ilustra a órbita dos planetas do sistema, adotando o mesmo sistema de cores da Figura 29, também de Gillon et al. (2017). As faixas cinza e tracejada representam duas diferentes zonas habitáveis calculadas. A distância máxima do sistema até a estrela é de 0.063 AU, do planeta h; a zona habitável do sistema estende-se até pouco antes disso, consequência do tipo e pequeno tamanho de TRAPPIST-1, visto que irradia menos por ser menor, ter pouca massa e assim menos combustível para queimar, além de também emitir radiação no infravermelho.

Podem ser vistos os exoplanetas TRAPPIST-1 e, f e g dentro dos limites de ambas as zonas habitáveis, um dos fatos pelos quais o sistema se tornou tão conhecido.

As simulações de Grimm et al. (2018) mostram perturbações entre os planetas em suas excentricidades, e argumentos do periastro (ângulo da órbita em relação a uma direção de referência), frutos do fato de estarem em órbitas ressonantes, caracterizando interações gravitacionais mais intensas entre eles; evoluindo irregularmente com o tempo, e exibindo rápida precessão.

Grimm et al. (2018) citam que o sistema apresenta semelhanças em relação à dinâmica do sistema Kepler-90, tratado anteriormente, visto que ambos possuem sete planetas e há ressonância entre os planetas dos sistemas.

2.9 EXEMPLOS DE EXOPLANETAS

Os exoplanetas apresentados a seguir foram escolhidos por suas características únicas, como a proximidade da estrela e o curto período de K2-141 b e a presença em um sistema planetário múltiplo

e na zona habitável de Kepler-186 f. Exoplanetas podem possuir as mais variadas características, tanto orbitais quanto físicas, diferentes composições interiores, atmosféricas, muitas delas semelhantes com nada visto no Sistema Solar.

2.9.1 K2-141 b

K2-141 b é um planeta de período ultra-curto (*ultra-short period*) - planetas de pouca massa que orbitam suas estrelas em períodos mais curtos do que um dia terrestre - que orbita uma estrela do tipo K7 V, segundo Malavolta et al. (2018). Ele foi descoberto na campanha 12 da missão K2, por meio do método de trânsito.

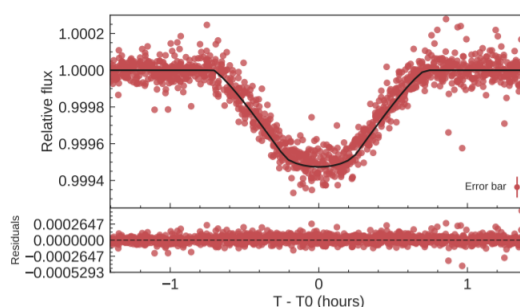
Segundo dados obtidos por Barragán et al. (2018), o planeta tem um período orbital de 6.7 horas, e uma massa aproximada de $5.31 M_{\oplus}$ (massas terrestres), caracterizando-o como o planeta com o período mais curto com massa calculada até sua descoberta, em 2017.

Os planetas de período curto (menor que 10 dias terrestres) são alvos interessantes para campanhas de observação de velocidade radial, de acordo com Barragán et al. (2018), já que quanto mais curto é seu período, torna-se mais simples de identificar um padrão nas análises do movimento orbital da estrela. Portanto, planetas de período ultracurto (USP), de raios quase sempre menores que 2 raios terrestres, e que transitam na frente de suas estrelas, são boas oportunidades para se conhecer as propriedades de objetos de tamanho terrestre.

Segundo Malavolta et al. (2018), os planetas K2-141 b e c passaram por um processo de validação que usou informações de posição, paralaxe, parâmetros da estrela, formato da curva de luz, entre outros. No processo, chamado vespa (*Validation of Exoplanet Signals using a Probabilistic Algorithm*, Validação de Sinais de Exoplaneta usando um Algoritmo Probabilístico), foram criadas amostras estelares para o caso positivo de exoplaneta, e também para vários casos de falso positivo - diferentes tipos de eclipses de estrelas binárias. Em cada caso, a amostra é refinada de acordo com os sistemas que replicam as observações realizadas. A razão entre o número remanescente de casos falsos positivos e o número total de casos remanescentes dá a probabilidade de falsos positivos, usada no estudo.

Com mais uma etapa no processo de validação, a probabilidade de falso positivo calculada para o planeta b foi menor que 10^{-4} , e para o planeta c, de 4.8×10^{-4} ; baixas o suficiente para Malavolta et al. (2018) considerarem o planeta c como estatisticamente válido, enquanto K2-141 b foi confirmado pela detecção espectroscópica de sua órbita.

Figura 31 – Curva de luz de K2-141 b



Fonte: Barragán et al. (2018)

A Figura 31 exibe a curva de luz centrada no período orbital de K2-141 b e resíduos obtidos por Barragán et al. (2018). Os pontos vermelhos indicam os dados observados, enquanto a curva sólida preta representa o modelo que melhor se encaixa com as observações. Mesmo sem a curva preta do modelo para auxiliar visualmente, pode ser visto claramente o padrão dos pontos vermelhos indicando uma queda no fluxo medido, o que caracteriza a passagem do planeta na frente da estrela.

De acordo com os dados encontrados por Barragán et al. (2018), chegou-se nos seguintes valores para massa, raio e densidade do planeta: $5.31 \pm 0.46 M_{\oplus}$, $1.54^{+0.10}_{-0.09} R_{\oplus}$ (raios terrestres), que resultam numa densidade de $8.00^{+1.83}_{-1.45} g/cm^3$.

No entanto, a análise da velocidade radial de K2-141 b por métodos diferentes por Malavolta et al. (2018) resultou em uma semi-amplitude média de $6.25 \pm 0.48 m s^{-1}$, o que corresponde a uma massa média de $5.08 \pm 0.41 M_{\oplus}$ para o planeta. Medições de seu raio com a curva de luz resultaram em $1.51 \pm 0.05 R_{\oplus}$, e em conjunto com a massa média, chegou-se a uma densidade de $1.48 \pm 0.20 \rho_{\oplus}$ (densidade da Terra), ou $8.2 \pm 1.1 g cm^{-3}$.

É um planeta de dimensões terrestres, possui cerca de 5 vezes a massa da Terra, e é bem denso, comparado com planetas do Sistema Solar. Esse grande valor de densidade sugere que o planeta pode ter um núcleo pesado, ou que seu núcleo compõe uma grande parte de seu tamanho.

O estudo de Barragán et al. (2018) também inferiu a composição de K2-141 b por meio de suas possíveis quantidade de água, ferro, e $MgSiO_3$ (conhecido como bridgmanita, enstatita, *magnesium silicate perovskite*, mineral encontrado no interior da Terra) usando um gráfico ternário. Se o planeta não possuir água, tem uma composição de aproximadamente 5 a 70% de ferro e de 30 a 95% de rocha. Mas se possuí-la, sua quantidade não excede cerca de 30% de sua massa total.

Segundo Dai et al. (2019), é possível dizer que quando uma Terra-quente (ou planeta de período ultracurto, USP) é observada, na realidade o que se vê é o núcleo exposto do que antes era um planeta maior, como um sub-Netuno. O planeta perde seu envelope de gás por conta da grande proximidade com a estrela, o que causa perda de massa por escape hidrodinâmico (quando a atmosfera de um planeta é aquecida de forma que suas moléculas são excitadas e aceleradas e conseguem escapar do planeta) e fotoevaporação. No caso, K2-141 b mostra possuir mais ferro do que o esperado, sendo comparado com Mercúrio; além de estar sujeito a temperaturas extremas de aproximadamente 2039 K, conforme dados de Barragán et al. (2018).

Planetas próximos de suas estrelas podem perder toda a sua atmosfera por conta da irradiação solar; assim, espera-se que planetas de período ultracurto - que se encontram próximos de suas estrelas, de acordo com seu período orbital, também conforme a terceira lei de Kepler - sejam planetas rochosos, sem atmosfera.

Para Nguyen et al. (2020, tradução nossa), “planetas de lava são uma classe de exoplanetas rochosos que orbitam tão perto de suas estrelas que suas superfícies são derretidas”. É o caso de K2-141 b, que segundo Barragán et al. (2018) conta com um semieixo maior orbital de apenas $0.00716^{+0.00055}_{-0.00065}$ AU, aproximadamente $1.07 \times 10^9 m$. Para comparação, a distância média Terra-Lua é pouco maior que um terço desse valor, sendo $3.844 \times 10^8 m$, de acordo com dados de Williams (2020).

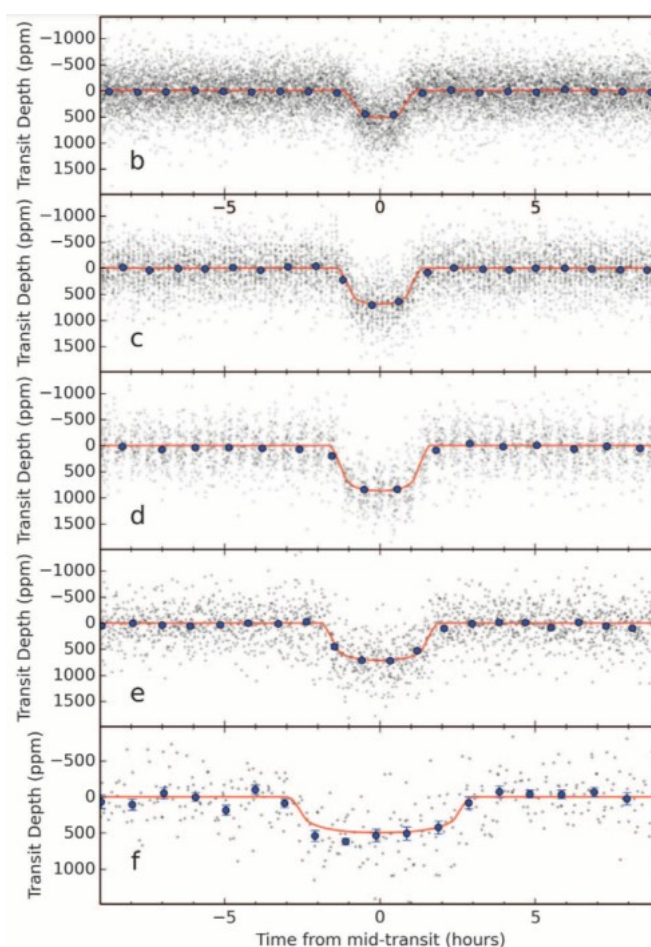
Portanto, seguindo essa definição, K2-141 b é um exoplaneta do tipo Terra, rochoso, de período ultracurto, e que orbita muito próximo de sua estrela, que resulta em um acoplamento de maré e

recebimento de um grande fluxo de radiação. Sendo assim, é também considerado um “planeta de lava”.

2.9.2 Kepler-186 f

Kepler-186 f é o único planeta de seu sistema que se encontra na zona habitável de sua estrela, segundo Quintana et al. (2014). É o último do sistema, na órbita mais distante de Kepler-186. Ele foi o primeiro planeta com tamanho próximo ao da Terra descoberto e confirmado ao redor da zona habitável de outra estrela, segundo Culler (2020).

Figura 32 – Trânsito dos planetas de Kepler-186



Fonte: Quintana et al. (2014)

Na Figura 32, são exibidos os trânsitos dos planetas de Kepler-186 registrados pela missão Kepler, segundo dados de Quintana et al. (2014). Todos os planetas do sistema foram descobertos usando a técnica de trânsito. No eixo horizontal está o tempo em horas até a metade do trânsito, e no eixo vertical a sua profundidade, em partes por milhão (ppm). Os pontos pretos representam os dados observados, os azuis são uma média das profundidades separadas por hora, e o modelo elaborado de como se daria um provável trânsito com os dados está em vermelho.

Pode ser notado que os planetas mais próximos da estrela têm bases menores na curva de luz, e ela cresce conforme os planetas se distanciam da estrela, pois os planetas mais distantes levam mais tempo para concluir a passagem, caracterizando uma curva de luz mais longa.

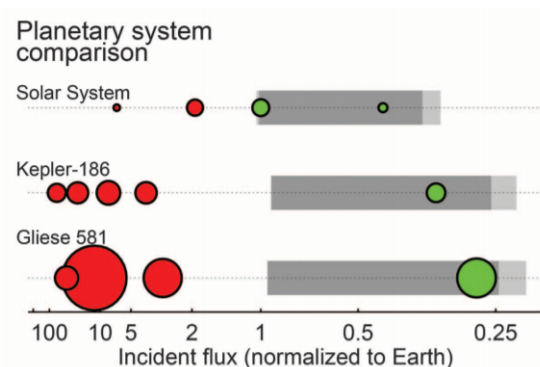
Os planetas têm de passar por um segundo método de detecção para serem confirmados, e como o sistema não produzia um movimento detectável na estrela, foram feitas algumas análises ao invés disso: foi feito um imageamento da região procurando por outras estrelas que possam ter imitado um trânsito; e uma análise de densidade estelar simulando uma segunda estrela acompanhando Kepler-186, de acordo com o método adotado de Quintana et al. (2014).

Como nenhuma outra fonte de luz na região foi encontrada, e não foi verificada instabilidade nas órbitas dos planetas (ambos os casos negativos), foi confirmada a existência dos cinco planetas orbitando a estrela.

Kepler-186 f possui um raio de $1.17 \pm 0.08 R_{\oplus}$, ou $0.104 \pm 0.007 R_J$ (raios de Júpiter) caracterizando-o como um planeta do tipo super-Terra, segundo dados de Torres et al. (2015). Também apresenta um período de aproximadamente 130 dias, e uma excentricidade mínima de $0.04^{+0.07}_{-0.04}$, cálculo baseado na densidade estelar independente e a verificada com a curva de luz.

No estudo de Torres et al. (2015), a probabilidade de Kepler-186 f se encontrar na ZH de sua estrela foi de 98.4%, enquanto a chance de se tratar de um planeta rochoso foi de 68.4%. Ainda não há medidas de sua massa para poder ser feita uma estimativa simples de sua densidade, para determinar sua possível composição, porém os autores discutem que é razoável supor que planetas menores tendem a ser rochosos.

Figura 33 – Comparação de sistemas planetários



Fonte: Quintana et al. (2014)

A Figura 33 apresenta uma comparação dos sistemas Solar, Kepler-186 e Gliese 581 (GJ 581) com respeito ao fluxo solar recebido pela Terra. As regiões em cinza representam estimativas da zona habitável dos sistemas, e em cinza claro são estimativas otimistas, estendendo-as. As estrelas se encontram à esquerda. Os círculos verdes representam planetas dentro da ZH, e em vermelho planetas próximos o suficiente de suas estrelas para possuírem temperaturas altas demais para ocorrência de vida, segundo os dados de Quintana et al. (2014). Para os autores, os planetas dentro dos limites da ZH da figura são a Terra e Marte, Kepler-186 f e Gliese 581 d, com um fluxo variando desde 1 (Terra) até quase 0.25 (Gliese 581 d). Kepler-186 f conta com um fluxo solar de aproximadamente 32% do valor recebido pela Terra.

A ZH desses sistemas pode iniciar-se aproximadamente na mesma faixa de fluxo da do Sistema Solar, mas isso não significa que suas estrelas são do mesmo tipo que o Sol. Como o eixo horizontal traz apenas a informação do fluxo, suas distâncias em relação às estrelas podem assumir diferentes valores.

O que é o caso tanto de Kepler-186 f quanto de Gliese 581 d, sendo seus semieixos maiores aproximadamente 0.43 AU e 0.22 AU, segundo Torres et al. (2015) e Mayor et al. (2009), respectivamente. Suas estrelas são ambas anãs do tipo M, e têm aproximadamente metade e um terço da massa e tamanho do Sol, respectivamente, o que resulta em um fluxo de radiação menor; razão pela qual ambos os planetas estão na ZH de seus sistemas apesar de estarem mais próximos de suas estrelas, conforme os dados de NASA Exoplanet Archive (2021b) e Johnson, Harrington e Culler (2017).

Em resumo, o planeta tem dimensões de uma super-Terra, um longo período e excentricidade relativamente baixa, e está a uma distância média de sua estrela anã, o que faz com que esteja dentro dos limites de sua ZH durante todo o seu período orbital.

3 OBJETOS EXTRASSOLARES

3.1 EXOLUAS

O caso das exoluas é interessante na questão de habitabilidade, pois há casos em que se seu planeta não for habitável, sua lua talvez possa ser, conforme explica Martínez-Rodríguez et al. (2019). Já que segundo Barnett (2018a), sabe-se que alguns dos vários satélites conhecidos do Sistema Solar possam ter oceanos debaixo de sua superfície congelada, como em Encélado, lua de Saturno, cuja sonda Cassini avistou gêiseres jogando água e gelo em direção ao espaço.

Embora existam vários estudos, ainda não foi confirmada a existência de exoluas. Há casos possíveis, conforme os dados de Teachey e Kipping (2018), mas nenhum caso conclusivo.

3.1.1 Regiões possíveis e habitabilidade

As regiões possíveis para a existência de exoluas ao redor de exoplanetas são aquelas em que elas continuam a orbitá-los, apesar de eventuais perturbações causados por outros corpos, planetas ou a estrela. Há então uma região de estabilidade de exoluas.

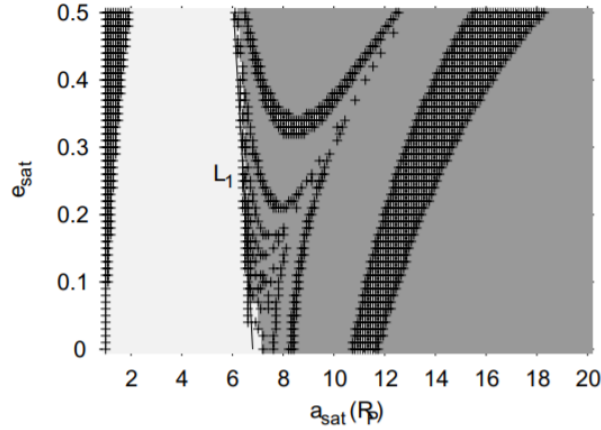
Sobre a ideia do limite de estabilidade, Domingos, Winter e Yokoyama (2006) dizem que para um caso de definição simples, deve-se considerar uma partícula orbitando um planeta, enquanto o planeta orbita uma estrela. Quando a partícula estiver distante do planeta, sofrerá uma atração gravitacional menos intensa causada por ele; ao estar distante o suficiente do planeta, a interação gravitacional da estrela causada na partícula se torna significativa o suficiente para que cause perturbações em sua órbita. A região ao redor do planeta na qual a partícula consegue sobreviver, para quaisquer condições iniciais e a qualquer tempo, é o que define uma região estável e portanto um limite de estabilidade. Nela, as possíveis perturbações causadas pela estrela não serão determinantes para que sua órbita se altere.

De acordo com os resultados de Domingos, Winter e Yokoyama (2006), por meio de simulações numéricas do problema de três corpos, foi verificado que a região de estabilidade de um satélite extrassolar diminui com o aumento da excentricidade da órbita de seu planeta hospedeiro. No caso de $e = 0.0$, para tanto o exoplaneta quanto para seu satélite, a região de estabilidade era de aproximadamente metade do raio de Hill - $a(\mu/3)^{\frac{1}{3}}$, em que μ corresponde à razão da massa do planeta pela da estrela.

A Figura 34 mostra as regiões possíveis para uma exolua, segundo as simulações de Domingos, Winter e Yokoyama (2006) em um tempo simulado de 10^4 períodos orbitais. No primeiro caso, foram assumidas uma excentricidade de 0.0 para o planeta (órbita circular) e valores variáveis para seu satélite. A região estável está em branco, de pouco depois de 0 até aproximadamente $7 R_P$ (raios do planeta) de distância do planeta, e a instável está em cinza. Os símbolos + indicam colisões, e a área além das bordas da região estável representa a região de velocidade zero da exolua (região cuja velocidade torna-se nula pois para acessá-la o quadrado de sua velocidade tem que ser negativo).

Em casos seguintes do estudo, conforme os valores de excentricidade do planeta são aumentados

Figura 34 – Região de estabilidade de exosatélites prógrados



Fonte: Domingos; Winter; Yokoyama (2006)

e analisados, mais instável se torna a órbita da exolua. Isso é explicado pelo fato de que com uma excentricidade maior, há períodos em que o planeta se aproxima mais de sua estrela, o que torna a exolua suscetível a perturbações mais intensas causadas por ela.

Em valores extremos de excentricidade para o planeta, como 0.7, a zona estável se encontra muito próxima deste, o que por consequência causa efeitos de maré mais acentuados na exolua. Nesse caso, o valor máximo de excentricidade para o satélite não pode passar de 0.3, pois isso resultaria em uma colisão.

$$a_I = (1.0891 \pm 0.0049) + (0.4576 \pm 0.0472)e_{sat} + (2.9559 \pm 0.0932)e_{sat}^2 \quad (1)$$

$$a_E = (7.0051 \pm 0.0363) - (1.9180 \pm 0.0687)e_{sat} - (7.2189 \pm 0.0543)e_P \quad (2)$$

$$a_I = (1.1271 \pm 0.1367) + (5.4003 \pm 0.2289)e_{sat}^2 \quad (3)$$

$$a_E = (13.3214 \pm 0.4974) - (14.3395 \pm 0.6791)e_P - (13.0716 \pm 1.177)e_{sat} + (12.5821 \pm 1.877)e_P e_{sat} \quad (4)$$

As equações de (1) a (4) relacionam os parâmetros de excentricidade do planeta e do satélite com os semieixos maiores críticos (referentes à região de estabilidade) interno (a_I) e externo (a_E) das simulações de Domingos, Winter e Yokoyama (2006). As duas primeiras equações representam o caso em que a órbita do satélite é prógrada, ou seja, a inclinação do satélite é menor do que 90° em relação à do planeta; e as restantes são da órbita retrógrada, cuja inclinação é maior do que 90° . Pode-se perceber que a_I tem dependência da excentricidade do satélite e de seu valor ao quadrado, já a_E depende das excentricidades do satélite e também do planeta.

No estudo de Kipping, Fossey e Campanella (2009), é considerado que uma exolua deve induzir variações no tempo de trânsito em seu planeta. A previsão é de que esses efeitos exibam uma diferença de fase de $\pi/2$ nos resultados obtidos, culminando em uma característica única de exolua. Também é afirmado que medindo ambos os efeitos de tempo (variações no tempo e duração do trânsito), é possível determinar a massa e a distância orbital da exolua.

De acordo com Heller (2012), o aquecimento por maré é uma importante fonte de energia em exosatélites, por exemplo, em órbitas excêntricas cujas exoluas potencialmente habitáveis distanciam-se da zona ideal ao redor de seu exoplaneta.

O autor cita que o período da exolua ao redor do exoplaneta deve ser menor que $1/9$ do período deste ao redor da estrela, para que o satélite permaneça orbitando o planeta.

Em sistemas com estrelas pequenas e de pouca massa há menores chances de se ter uma lua habitável, segundo Heller (2012), pelo fato de irradiarem menos do que o Sol. Em tais sistemas, para estar em uma região de fluxo solar ideal, a lua e o planeta devem estar mais próximos da estrela, o que por sua vez causa perturbações mais intensas na órbita do satélite.

3.1.2 Métodos de detecção

Pelo fato de satélites possuírem menos massa e tamanho que seus planetas, a detecção de exoluas é mais complicada em comparação com a dos exoplanetas, já que seus efeitos verificados pelas mesmas técnicas são menos proeminentes.

Uma das maneiras de se detectar exoluas é por meio de análises fotométricas, como em um trânsito, mas dependendo do tipo de estrela e do tamanho do satélite, casos de luas pequenas podem se perder no meio dos dados e ruídos obtidos em trânsitos, conforme explica Heller (2018). Como comparação, em uma simulação de trânsito de Heller (2014), um planeta do tipo Júpiter com 3 luas de 0.62, 0.52 e 0.86 $R_{\oplus}$ produzem um decréscimo na luz vinda da estrela de aproximadamente 2.7% (planeta) enquanto seus satélites produzem um ocultamento da escala de 10^{-4} , dificilmente alterando o brilho verificado de 97.3%. No entanto, os efeitos dinâmicos de exoluas em seus exoplanetas podem ser verificados com menos chance de serem perdidos em análises de variações temporais de trânsitos.

Um método para obter medições precisas de um trânsito é o *Orbital Sampling Effect* (Efeito de Amostragem Orbital), em que são feitas medidas de várias curvas de luz e em seguida a combinação delas em apenas uma, de acordo com Heller (2018). Desse modo, a curva de luz derivada das demais é mais precisa e possíveis desvios podem ser mais facilmente identificados na busca por exoluas. A aplicação da técnica pode trazer informações como o tamanho da exolua e sua distância até o exoplaneta, segundo Heller (2014).

Outra opção possível é o imageamento direto, que pode ser usado para tentar identificar sombras ou trânsitos de satélites na frente de planetas, ou alterações nas distâncias que eles se encontram de outros objetos (como em astrometria).

3.1.3 Kepler-1625 b-I

Kepler-1625-I é uma possível exolua orbitando Kepler-1625 b, a mais de 1200 pc (*parsec*, 1 pc equivale a aproximadamente 3.1×10^{16} m, 2.1×10^5 AU ou 3.3 anos-luz) de distância da Terra.

A candidata a exolua possui dimensões e massa similares às de Netuno, que orbita um planeta com dimensões e mais massivo que Júpiter, segundo dados de Teachey e Kipping (2018), orbitando uma estrela semelhante ao Sol a uma distância de 1 AU. Análises fotométricas indicaram que os modelos compostos por uma lua eram consistentes, embora também tenham sido encontradas variações no tempo de trânsito de Kepler-1625 b.

Para investigar características sobre os dados obtidos, foram abordadas técnicas para estimar suas massas e tamanhos por meio de relações empíricas. Foram encontradas evidências pelos autores que apoiavam a órbita da possível exolua como coplanar e também inclinada em relação à órbita do planeta, tanto prógrada quanto retrógrada.

As características encontradas da candidata pelos autores são um raio de aproximadamente $4 R_{\oplus}$, e massa de cerca de $17 M_{\oplus}$, cujo semieixo maior aproxima-se de $40 R_{Jup}$.

Os autores, os primeiros a apresentarem a hipótese da exolua, reconhecem que a análise é complicada em que fatores como um pequeno efeito qualquer deixado de lado poderia mudar completamente o modo como lidam com o problema. Como não houve ainda nenhuma exolua confirmada, há dificuldades na compreensão de que o que se obtém são realmente os resultados corretos, ou mesmo a maneira correta de se interpretar os dados obtidos, já que não há conhecimento prévio a ser utilizado no tema.

A existência da possível exolua Kepler-1625 b-I ainda não foi confirmada nem rejeitada, há divergências de dados e conclusões de autores sobre o tema, o que deixa essa delicada questão em aberto.

3.2 SUB-LUAS

Sub-luas são sub-satélites, satélites de satélites; um planeta orbita ao redor de uma estrela, sua lua orbita o planeta, e a sub-lua orbita a lua do planeta.

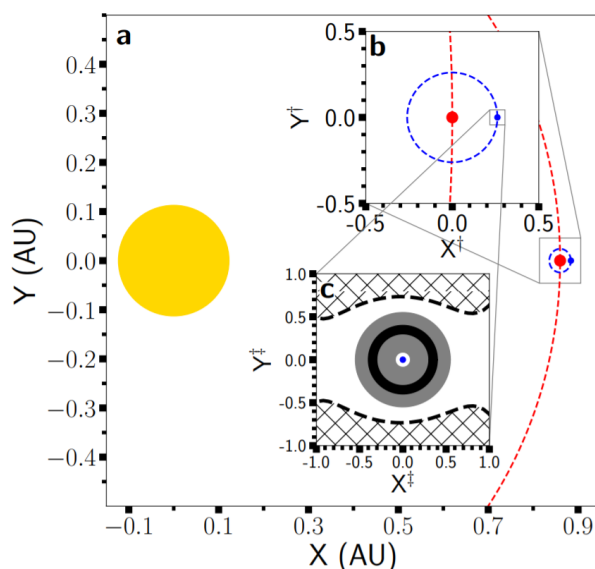
Sub-luas trazem discussões interessantes, tais como: a maneira como sua órbita deve evoluir e se manter com perturbações do planeta e da estrela; como se daria seu acoplamento e aquecimento de maré, visto que ambos, exolua e exoplaneta, poderiam exercer forças significativas sobre ela; entre outros.

Existe um caso semelhante mas não de exatamente sub-luas no Sistema Solar: é o caso de Tétis, quinta maior lua de Saturno; possivelmente composta de água e rocha, ela está em acoplamento de maré com Saturno, sempre com a mesma face voltada para o planeta, conforme diz Barnett (2019c). Tétis é co-orbital com outros dois satélites menores de Saturno, Telesto e Calipso, que estão nos pontos de equilíbrio L_4 e L_5 da lua.

Apenas grandes luas, a grandes distâncias de seus planetas, são capazes de ter sub-luas por períodos mais longos de tempo, de acordo com Kollmeier e Raymond (2018). Se a lua estiver próxima do planeta, a perturbação deste na órbita da sub-lua será intensa de forma a alterá-la drasticamente, podendo levar a uma colisão. Rosario-Franco et al. (2020) constata que sub-luas podem sofrer perturbações orbitais do exoplaneta e da exolua. Há tipos específicos de perturbações que podem ter influência gravitacional atuando na sub-lua, como diferentes concentrações de massa na exolua.

Segundo Kollmeier e Raymond (2018), a maioria das grandes luas do Sistema Solar é incapaz de abrigar uma sub-lua, justamente por estarem muito próximas de seu planeta. É o caso das luas de Urano e Netuno. Se havia sub-luas no Sistema Solar, elas podem ter sido removidas por meio da migração sofrida pelas luas, por conta da interação de seu acoplamento de maré com o planeta. Suas órbitas então se reduziriam ou estenderiam-se significativamente. Isso poderia causar uma provável colisão da sub-lua com o planeta ou a lua, ou sua expulsão dos arredores.

Figura 35 – Diagrama de um sistema estrela-exoplaneta-exolua-sub-lua



Fonte: Rosario-Franco et al. (2020)

A Figura 35 mostra um diagrama de um sistema usado por Rosario-Franco et al. (2020), em que existe uma região possível para sub-luas. A estrela é o ponto amarelo, o exoplaneta o ponto vermelho e a exolua o ponto azul.

O painel b exibe uma aproximação do sistema planeta-satélite e o painel c, do satélite e as regiões de possíveis sub-luas. A linha tracejada preta e a região hachurada no painel c representam respectivamente a região de velocidade zero e a região proibida, regiões limite que corpos não ultrapassam. Os eixos dos painéis b e c estão em termos do raio de Hill (região de influência gravitacional) do exoplaneta e da exolua, respectivamente.

As regiões circulares cinza e preta no painel c representam possíveis órbitas de sub-luas nas simulações de 100 mil e de 10 milhões de anos, respectivamente. Uma região de maior tempo de estabilidade (região preta) está a uma distância média do planeta, comparando com a região de menor tempo de estabilidade.

Levando em conta a equação (1) do estudo de Kollmeier e Raymond (2018), infere-se que há maiores chances de uma sub-lua existir e permanecer em um sistema quanto maior for a massa da lua e a distância dela ao planeta, para que a atração gravitacional exercida pela lua seja intensa o suficiente para que eventuais perturbações não interfiram de maneira significativa na órbita da sub-lua.

Em um estudo semelhante da estabilidade de exoluas feito por Domingos, Winter e Yokoyama (2006), Rosario-Franco et al. (2020) simularam também limites de estabilidade de sub-luas, resultando em um comportamento análogo ao obtido por Domingos, Winter e Yokoyama. Os autores obtiveram

um limite superior de semieixo maior estável de sub-luas que é reduzido conforme a excentricidade do exoplaneta cresce; quanto mais o planeta se afasta de uma órbita circular, maior influência gravitacional da estrela será exercida na sub-lua, em encontros próximos durante a órbita. Pelo fato de ser uma órbita excêntrica, haverá momentos na órbita que o conjunto planeta, lua e sub-lua se encontrará mais próximo da estrela do que no restante do período, sendo que nesses momentos pode haver a chance de ocorrer perturbações gravitacionais mais intensas causadas pela estrela.

Há um limite de estabilidade, visto quando o valor da excentricidade está próximo de 0.5, em que ele está na faixa do limite de Roche (distância mínima que um corpo pode orbitar sem ser fragmentado por forças gravitacionais) da lua; ou seja, o sistema estará completamente instável pois haverá fortes perturbações, se não já ocorrer a fragmentação da sub-lua.

O limite de estabilidade para o semieixo maior de sub-luas no estudo é de, então, um terço do raio de Hill da exolua.

Rosario-Franco et al. (2020) também faz uma estimativa de como se daria a influência de exosatélites no sistema Kepler 1625 no escopo de velocidade radial, como método para detectá-los: enquanto uma exolua causaria um movimento de aproximadamente 150 m/s no planeta, uma sub-lua causaria um reflexo de apenas 0.3 mm/s no satélite, considerado desprezível pelos autores. Apenas o reflexo da velocidade radial causado pela exolua seria detectável, com condições de observação favoráveis e equipamentos precisos; o efeito da sub-lua seria minúsculo mesmo para corpos mais massivos, sendo incapaz de ser medido com instrumentos atuais.

3.3 EXOANÉIS

Estudar o conjunto de anéis de um determinado planeta é como ter um laboratório compacto do Sistema Solar: o análogo do Sol é o planeta; e os análogos aos planetas do Sistema Solar são os satélites que orbitam o planeta principal. E em meio a isso existem as partículas de gelo, poeira e objetos que formam os anéis ao redor do planeta principal, conforme explicado em Barnett (2018b).

Nesse sistema compacto há o corpo principal, corpos menores e partículas orbitando e interagindo entre si, constantemente. Há perturbações causadas pelos satélites nas partículas, o que pode alterar suas órbitas.

Em um sistema assim, podem ser estudadas as interações entre os objetos de forma análoga à que acontece no Sistema Solar de forma a entender como se dão as interações entre o Sol, os planetas, satélites e objetos menores como asteroides e cometas. Outra vantagem é que esses sistemas são compactos e os intervalos de tempo entre possíveis interações são bem menores comparados com os do Sistema Solar.

Há ainda o estudo sobre a formação dos anéis, conforme dizem Charnoz et al. (2009) e Barnett (2019b), em que possíveis satélites, cometas ou asteroides tenham se aproximado além do limite permitido (limite de Roche) e se fragmentado devido à grande atração gravitacional e força de maré do planeta, espalhando seus fragmentos ao seu redor.

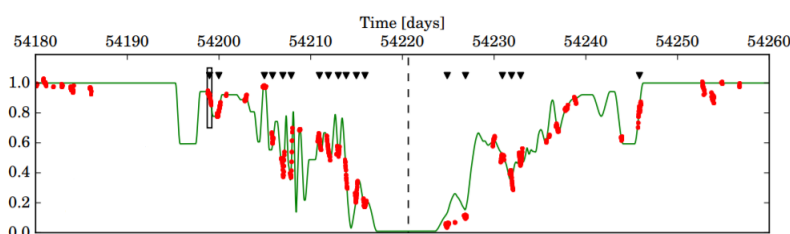
No caso, poderiam ser confirmações tanto de exoanéis quanto de que no passado existiram exoluas orbitando exoplanetas. Dessa forma, os exoanéis podem ser usados para entender a dinâmica e evolução dos sistemas em que se encontram.

Um método para a detecção de um sistema de anéis ao redor de um exoplaneta é o de trânsito. Assim como o planeta, os anéis também passam na frente da estrela, ocultando partes de sua luz que chegam ao observador. Outro efeito interessante citado por Heller (2014) é o da difração que a luz sofre ao passar pelo sistema de anéis. No efeito, partículas dos anéis de micrômetros até metros espalham a luz na direção do observador, o que pode causar até pequenas mudanças numa curva de luz.

1SWASP J140747.93-394542.6 (J1407) é uma estrela do tipo K5 a 133 pc da Terra, que em 2007 passou por uma série de eclipses devidos a trânsitos. Segundo Kenworthy e Mamajek (2015), os eclipses ocorreram por cerca de 56 dias e foram associados a um gigante sistema de anéis ao redor de um possível exoplaneta, J1407 b.

Entre os modelos elaborados, o que mais teve relação com os dados obtidos foi o que propunha que o sistema é composto por 37 anéis com um comprimento total de 0.6 AU (90 milhões de quilômetros).

Figura 36 – Curva de luz do sistema de anéis de J1407 b



Fonte: Adaptado de Kenworthy; Mamajek (2015)

A Figura 36 mostra os dados obtidos e o modelo elaborado para o trânsito de J1407 e seu sistema de anéis na frente da estrela, de Kenworthy e Mamajek (2015). Os pontos vermelhos são os dados e a curva verde o modelo elaborado para a explicação destes. Pode-se notar que há uma série de alterações significativas e rápidas do brilho verificado da estrela, especialmente próximo do dia 54210, embora também haja variações menores após o tempo médio do trânsito.

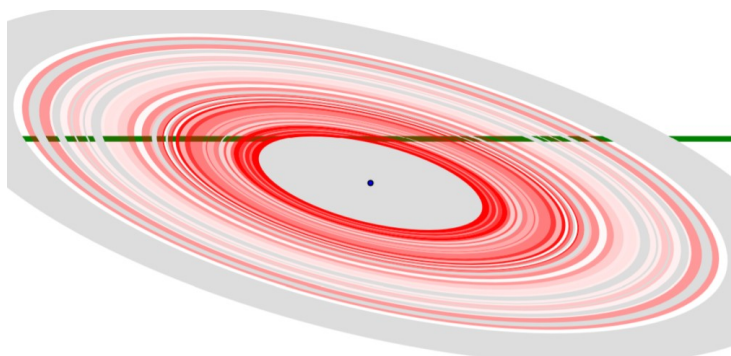
No estudo, os pequenos triângulos pretos invertidos representam momentos do trânsito que são vistos em mais detalhes, aproximados. Em alguns desses períodos há pequenas variações dos dados verificados e do modelo proposto, mas ele se encaixa satisfatoriamente na maioria dos picos e vales de brilho verificados.

Nos cálculos de Kenworthy e Mamajek (2015), chegou-se que a massa total dos anéis do sistema corresponde a aproximadamente $100 M_{L_{ua}}$. Pelo fato da estrutura se estender até além do limite de Roche e ocupar uma parte do raio de Hill do possível exoplaneta, segundo os autores isso implica que ela ainda está em evolução, o que implicará na futura formação de exosatélites por meio de acreção, nas regiões mais afastadas do disco.

Há uma região do disco vazia, que para os autores pode ser uma indicação de uma exolua menor do que a Terra, orbitando J1407 b. Foi estimada uma massa de aproximadamente $0.8 M_{\oplus}$ para o possível satélite.

O modelo dos anéis elaborado por Kenworthy e Mamajek (2015) está representado na Figura 37. Quanto mais intenso o tom de vermelho, menos luz é transmitida através do anel. A linha verde representa a posição da estrela J1407 durante o trânsito, e as regiões cinzas não possuem dados

Figura 37 – Modelo de anéis de J1407 b



Fonte: Adaptado de Kenworthy; Mamajek (2015)

fotométricos. Com um comprimento total de 0.6 AU (90×10^6 km), são muito maiores que os anéis de Saturno, de 2.82×10^5 km, segundo Barnett (2019b).

É interessante notar que na figura o planeta não passa na frente da estrela, somente seus anéis. Portanto, ele não participa do trânsito obtido de J1407.

Há também casos possíveis de anéis ao redor de outros exoplanetas, mas nenhum ainda foi confirmado.

3.4 EXOCOMETAS

Exocometas são, segundo Strøm et al. (2020, tradução nossa), “pequenos corpos que liberam gás e poeira que orbitam outras estrelas com exceção do Sol”, identificados quando “mostram atividade consistindo de uma nuvem de gás e poeira (coma) e/ou caudas de íons e/ou poeira.” Suas caudas ou nuvens aparecem quando sofrem sublimação de materiais voláteis dentro de si, liberando gás. Eles também possuem uma órbita parabólica.

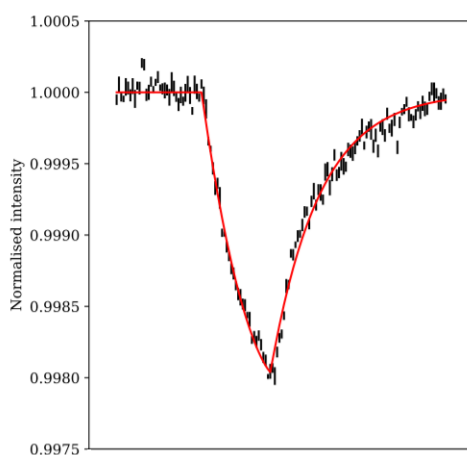
Sendo assim, exocometas estão sujeitos às mesmas condições de evolução que cometas, com a diferença de situarem-se em sistemas extrassolares e por isso dependerem de suas configurações e variadas condições específicas, tipos, massas, raios e distâncias das estrelas, planetas, e outros objetos. Dessa forma, de acordo com os autores, da mesma maneira como no Sistema Solar, cometas de sistemas externos ao solar são capazes de trazer informações acerca de suas formações e evoluções.

O estudo de exocometas é interessante pois remete a uma das hipóteses que acredita-se ter acontecido no Sistema Solar, com a Terra: ela era um planeta com pouca ou nenhuma água quando um corpo celeste colidiu consigo e trouxe água para ela; Raymond e Izidoro (2017) discutem a origem da água na Terra, em que modelos elaborados indicam que os responsáveis por isso foram os planetas gigantes gasosos. Em sua fase de crescimento, os planetas gasosos interagiram gravitacionalmente com vários corpos menores e os jogaram para regiões interiores do Sistema Solar. Interagindo com o disco de gás espalhado pelo Sistema Solar ainda em formação, esses corpos assumiam órbitas excêntricas e por fim cruzaram a região dos planetas terrestres, fornecendo água à Terra.

O estudo de tais objetos também pode ser usado para investigar o passado de sistemas extrassolares, da mesma maneira que os exoanéis.

A Figura 38 exibe a forma de um trânsito de um exocometas do sistema β Pictoris, quando observada

Figura 38 – Trânsito de um exocometa



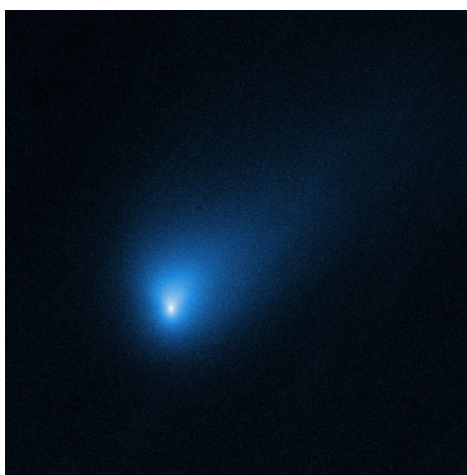
Fonte: Zieba et al. (2019)

de maneira fotométrica, conforme os dados de Zieba et al. (2019). A figura mostra a curva de luz e o modelo que se encaixa com os dados obtidos é a curva vermelha. De acordo com Strøm et al. (2020), o formato das curvas de luz dos exocometas se dá por conta do aumento da absorção da luz estelar, caracterizada pela queda verificada no fluxo, e seu retorno ao nível normal vem da diminuição da absorção da luz pela cauda do cometa.

Um exocometa identificado é 2I/Borisov, e 1I/‘Oumuamua foi primeiramente considerado um exocometa, depois um asteroide, e por fim designado a uma nova classe de corpos interestelares, segundo Barnett (2019a), da qual 2I/Borisov também faz parte.

2I/Borisov foi descoberto por um astrônomo amador - Gennady Borisov - com um telescópio que ele mesmo construiu, em 30 de agosto de 2019. Contando com uma excentricidade de 3.38, e o fato de que veio de longe do plano elíptico, foi concluído por Guzik et al. (2019) que a explicação plausível seria de que 2I/Borisov se originou fora do Sistema Solar. A estimativa dos autores é de que seu núcleo tem um raio de aproximadamente 1 km, semelhante às dimensões dos cometas no Sistema Solar, apesar de haver incertezas relacionadas aos métodos adotados. O exocometa possui uma cor um pouco mais vermelha que os cometas do Sistema Solar.

Figura 39 – Exocometa 2I/Borisov



Fonte: NASA; ESA; Jewitt (2019)

A Figura 39 é uma imagem da missão Hubble tirada do exocomete a aproximadamente 418 milhões de quilômetros da Terra, segundo Barnett (2020a). Segundo a autora, há poeira acumulada ao redor do núcleo, mas ele permaneceu oculto devido ao seu pequeno tamanho.

‘Oumuamua, descoberto em 2017, foi o primeiro objeto interestelar a passar pelo Sistema Solar. Seu periélio calculado foi de 0.25 AU, passando mais próximo do Sol do que a órbita de Mercúrio, e possui uma excentricidade de 1.20, segundo os dados de Bannister et al. (2019). Por meio de medições em seu brilho na luz visível, a indicação foi de que seu núcleo possuía aproximadamente 100 m de raio. Como 2I/Borisov, ‘Oumuamua também é vermelho da mesma forma que vários dos pequenos corpos do Sistema Solar. Na sua aproximação em relação ao Sol, análises mostraram que estava em rotação com um período de 8.67 horas ao redor de seu eixo menor.

A existência de ‘Oumuamua e 2I/Borisov implica que sistemas extrassolares possuem corpos pequenos passíveis de serem expulsos de si, viajarem enormes distâncias e sobreviverem até um encontro com outro sistema, para então continuarem seu caminho.

4 CONCLUSÃO

Há milhares de planetas espalhados pela galáxia, que possuem as mais variadas características e orbitam os mais diferentes sistemas.

Com o consequente avanço da tecnologia, os métodos para detectá-los irão tornar-se cada vez mais precisos e capazes de revelar mais informações importantes sobre as características tanto intrínsecas quanto externas a esses mundos, como a extensão de suas zonas habitáveis, em planetas que orbitam sistemas binários, ou até compostos por mais estrelas; como a influência de outros planetas no sistema influencia no seu movimento, habitabilidade, satélites; como se dá a evolução em um planeta com um complexo sistema de anéis, no limite de proximidade com sua estrela; entre várias outras situações conhecidas e ainda desconhecidas.

O fato de que a maioria dos exoplanetas é descoberta por trânsito significa que uma boa parte desses sistemas extrassolares estão em órbitas aproximadamente coplanares à do Sistema Solar, o que se traduz em uma maior facilidade de registrar a queda periódica na luz verificada de suas estrelas, por conta do ângulo de observação, em comparação com as condições ideais para outros métodos de detecção serem usados.

Isso não quer dizer, necessariamente, que existam mais sistemas com inclinação semelhante à do Sistema Solar do que com outras inclinações; apenas que com a capacidade atual de detecção, os sistemas mais facilmente detectáveis são aqueles que possuem essa característica.

Entre todos os exoplanetas confirmados existem aqueles que se assemelham à Terra, em composição, dimensões, e órbitas. Há também aqueles que se encontram na zona ideal ao redor de suas estrelas para abrigarem água líquida, fundamental para a vida que se conhece hoje. E estudá-los pode ser análogo a estudar como a Terra era em seus primórdios, tornando a humanidade capaz de ter um vislumbre de como foi o passado do próprio planeta e como se deram seus estágios iniciais de evolução.

Até o momento não há nenhum exoplaneta detectado que possua vida, e se houver, essa confirmação seria complicada de ser feita. Análises por trânsito e espectroscopia poderiam ser feitas para determinar sua composição atmosférica, mas imagens não teriam nitidez o suficiente para ilustrar como seria sua superfície, e outros métodos funcionam principalmente para a confirmação do planeta em si. Com o tempo pode haver a elaboração de métodos específicos para isso, ou mesmo o refinamento de métodos já existentes adaptados para esse fim.

Pode ser feito o estudo de sistemas e objetos extrassolares de forma a entender como se dão suas evoluções através do tempo e interações com outros objetos presentes em seus sistemas. Exocometas e asteroides, corpos interestelares, podem ser estudados para compreender a dinâmica de seus sistemas e como eles se relacionam com o Sistema Solar.

A primeira confirmação de novos tipos de corpos e objetos é complicada pois requer muita análise e descarte de falsas possibilidades, além do fato de não possuir nenhum outro dado para comparação.

Com o futuro avanço na tecnologia será possível não só a detecção e caracterização mais precisa de novos sistemas e objetos extrassolares, além do refinamento de dados já existentes sobre objetos conhecidos, como também a possível descoberta de corpos e classes totalmente novas, que até o

momento estavam ocultas por conta da precisão insuficiente dos equipamentos atuais.

REFERÊNCIAS

- BANNISTER, M. T. et al. The natural history of ‘oumuamua. **Nature Astronomy**, Berlin, v. 3, p. 594–602, 2019. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41550-019-0816-x>>. Acesso em: 22 fev. 2021.
- BARBOSA, G. O. et al. Earth-size planet formation in the habitable zone of circumbinary stars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Piccadilly, v. 494, n. 1, p. 1045–1057, 2020. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article-abstract/494/1/1045/5815436>>. Acesso em: 6 fev. 2021.
- BARCLAY, T. **TESS Mission Objectives**. Greenbelt, 2021. Disponível em: <<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/objectives.html>>. Acesso em: 5 mar. 2021.
- BARCLAY, T. **TESS The Extended Mission**. Greenbelt, 2021. Disponível em: <<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/tess/extended.html>>. Acesso em: 6 mar. 2021.
- BARNES, J. R. et al. An ablating $2.6 m_{\oplus}$ planet in an eccentric binary from the dispersed matter planet project. **Nature Astronomy**, Berlin, v. 4, p. 419–426, 2020. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41550-019-0972-z>>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- BARNETT, A. **Enceladus Science**. La Cañada: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/science/enceladus/>>. Acesso em: 25 out. 2020.
- BARNETT, A. **Rings Science**. La Cañada: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/science/rings/>>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- BARNETT, A. **In Depth ‘Oumuamua**. La Cañada: [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/oumuamua/in-depth/>>. Acesso em: 24 fev. 2021.
- BARNETT, A. **In Depth Saturn**. La Cañada: [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/planets/saturn/in-depth/>>. Acesso em: 19 fev. 2021.
- BARNETT, A. **In Depth Tethys**. La Cañada, 2019. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/tethys/in-depth/>>. Acesso em: 19 fev. 2021.
- BARNETT, A. **In Depth Uranus**. La Cañada: [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/planets/uranus/in-depth/>>. Acesso em: 28 jan. 2021.
- BARNETT, A. **In Depth 2I/Borisov**. La Cañada: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/2I-Borisov/in-depth/>>. Acesso em: 26 fev. 2021.
- BARNETT, A. **What is a Lagrange Point?** La Cañada: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://solarsystem.nasa.gov/resources/754/what-is-a-lagrange-point/>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- BARRAGÁN, O. et al. K2-141 b, a $5-m_{\oplus}$ super-earth transiting a K7 V star every 6.7 h. **Astronomy & Astrophysics**, Les Ulis, v. 612, 2018. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2018/04/aa32217-17.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2020.
- BOND, I. A. et al. Ogle 2003-blg-235/moa 2003-blg-53: a planetary microlensing event. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 606, n. 2, p. L155–L158, 2004. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/420928/pdf>>. Acesso em: 8 jan. 2021.

- BOSS, A. P. Darwin/tpf and the search for extrasolar terrestrial planets. In: **Proceedings of the Conference on Towards Other Earths**. Heidelberg: ESA Publications Division, 2014. p. 143–150. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/41194694_Towards_other_Earths_DARWINTPF_and_the_search_for_extrasolar_terrestrial_planets>. Acesso em: 30 jan. 2021.
- BRENNAN, P. **Gas Giant Planet Types**. La Cañada, 2020. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/gas-giant/>>. Acesso em: 25 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **How We Find and Characterize**. La Cañada, 2020. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/discovery/how-we-find-and-characterize/>>. Acesso em: 19 jan. 2021.
- BRENNAN, P. **Neptune-like Planet Types**. La Cañada, 2020. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/neptune-like/>>. Acesso em: 23 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **Super-Earth Planet Types**. La Cañada, 2020. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/super-earth/>>. Acesso em: 22 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **Terrestrial Planet Types**. La Cañada, 2020. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/terrestrial/>>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **2MASS J01225093-2439505 b**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7062/2mass-j01225093-2439505-b/>>. Acesso em: 26 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **51 Pegasi b**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7001/51-pegasi-b/>>. Acesso em: 25 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **Discoveries Dashboard**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/discovery/discoveries-dashboard/>>. Acesso em: 28 nov. 2021.
- BRENNAN, P. **GJ 436 b**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/6534/gj-436-b/>>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **HAT-P-26 b**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/1348/hat-p-26-b/>>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **KELT-9 b**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/3508/kelt-9-b/>>. Acesso em: 25 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **Kepler-11 b**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/1806/kepler-11-b/>>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **Kepler-1655 b**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/6282/kepler-1655-b/>>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **Kepler-22 b**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/1599/kepler-22b/>>. Acesso em: 22 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **Overview Planet Types**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/overview/>>. Acesso em: 22 fev. 2021.
- BRENNAN, P. **TRAPPIST-1 d**. La Cañada, 2021. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/5502/trappist-1-d/>>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- CABRERA, J. et al. The planetary system to kic 11442793: A compact analogue to the solar system. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 781, n. 1, 2014. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/781/1/18/pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2021.

CAPUZZO-DOLCETTA, R.; CESARE, G. D.; MARINO, A. Stability of planetary motion in binary star systems. **arXiv e-prints**, 2020. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/2008.11107.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2021.

CHARBONNEAU, D. et al. Detection of planetary transits across a sun-like star. **The Astrophysical Journal Letters**, Bristol, v. 529, n. 1, p. L45–L48, 2000. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/312457/pdf>>. Acesso em: 8 jan. 2021.

CHARNOZ, S. et al. Origin and evolution of saturn's ring system. In: _____. **Saturn from Cassini-Huygens**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. ISBN 9781402092169. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4020-9217-6_17>. Acesso em: 21 fev. 2021.

CHEN, R. **Kepler-90 Planets Orbit Close to Their Star**. Mountain View: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/image-feature/ames/kepler-90-planets-orbit-close-to-their-star>>. Acesso em: 26 jan. 2021.

CHEN, R. **Top Science Results from the Kepler Mission**. Washington: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/kepler/topscience>>. Acesso em: 30 jan. 2021.

COFIELD, C. **What Are Pulsars?** New York: [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://www.space.com/32661-pulsars.html>>. Acesso em: 8 mar. 2021.

CULLER, J. **Kepler-186 and the Solar System**. Mountain View: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/ames/kepler/kepler-186-and-the-solar-system>>. Acesso em: 3 fev. 2021.

DAI, F. et al. Homogeneous analysis of hot earths: Masses, sizes, and compositions. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 883, n. 1, 2019. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ab3a3b/pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2020.

DOMINGOS, R.; WINTER, O.; YOKOYAMA, T. Stable satellites around extrasolar giant planets. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Piccadilly, v. 373, n. 3, p. 1227–1234, 2006. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article/373/3/1227/1063626>>. Acesso em: 6 nov. 2020.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **Artist's impression of PLATO**. Paris, 2019. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/plato/-/artist-s-impression-of-plato-2>>. Acesso em: 3 fev. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **CoRoT Fact Sheet**. Paris, 2019. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/corot/-/47350-fact-sheet>>. Acesso em: 22 jan. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **CoRoT Summary**. Paris, 2019. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/corot/-/31709-summary>>. Acesso em: 21 jan. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **PLATO Payload**. Paris, 2019. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/plato/-/61111-payload>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **PLATO Science Goals**. Paris, 2019. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/plato/-/42277-science>>. Acesso em: 6 fev. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **SOHO Summary**. Paris, 2020. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/soho/-/30854-summary>>. Acesso em: 25 jan. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **CoRoT**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/corot>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **The PLATO Mission**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://www.cosmos.esa.int/web/plato>>. Acesso em: 3 fev. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **PLATO Mission Operations**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/plato/-/60594-mission-operations>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **PLATO Spacecraft**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/plato/-/42279-spacecraft>>. Acesso em: 6 fev. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **PLATO Status**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/plato/-/45404-mission-status>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

ESA SCIENCE & TECHNOLOGY. **PLATO Summary**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://sci.esa.int/web/plato/-/42276-summary>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. **TRAnsiting Planets and PlanetesImals Small Telescope–South**. Garching. Disponível em: <<https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/trappist/>>. Acesso em: 13 set. 2020.

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. **Hertzsprung-Russell Diagram**. Garching, 2007. Disponível em: <<https://www.eso.org/public/images/eso0728c/>>. Acesso em: 11 fev. 2021.

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. **A planet in the habitable zone**. Garching, 2021. Disponível em: <<https://www.eso.org/public/images/eso0915b/>>. Acesso em: 28 nov. 2020.

GARNER, R. **Lucy Mission - Animations of Jupiter’s Trojans**. Greenbelt: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/content/goddard/lucy-mission-animations-of-jupiters-trojans>>. Acesso em: 29 jan. 2021.

GARNER, R. **TESS Exoplanet Mission Overview**. Washington: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/content/about-tess>>. Acesso em: 5 mar. 2021.

GILLON, M. et al. Temperate earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star. **Nature**, London, v. 533, n. 7602, p. 221–224, 2016. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature17448>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

GILLON, M. et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star trappist-1. **Nature**, London, v. 542, n. 7642, p. 456–460, 2017. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature21360>>. Acesso em: 9 ago. 2020.

GRIMM, S. L. et al. The nature of the trappist-1 exoplanets. **Astronomy & Astrophysics**, Les Ulis, v. 613, p. 221–224, 2018. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2018/05/aa32233-17.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2020.

GUZIK, P. et al. Initial characterization of interstellar comet 2i/borisov. **Nature Astronomy**, Berlin, v. 4, p. 53–57, 2019. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41550-019-0931-8>>. Acesso em: 23 fev. 2021.

HELLER, R. Exomoon habitability constrained by energy flux and orbital stability. **Astronomy & Astrophysics**, Les Ulis, v. 545, n. 2, 2012. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2012/09/aa20003-12.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2021.

HELLER, R. Detecting extrasolar moons akin to solar system satellites with an orbital sampling effect. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 787, n. 1, 2014. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/787/1/14/pdf>>. Acesso em: 23 out. 2020.

HELLER, R. On the detection of extrasolar moons and rings. In: _____. **Handbook of Exoplanets**. Cham: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-55332-0. Disponível em: <https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-319-55333-7_35>. Acesso em: 20 fev. 2021.

ILIADIS, C. **Nuclear Physics of Stars**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2015. Disponível em: <<https://www.wiley.com/en-us/Nuclear+Physics+of+Stars-p-9783527618767>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION. **Commission F2 Exoplanets and the Solar System**. Paris, 2020. Disponível em: <https://www.iau.org/science/scientific_bodies/commissions/F2/info/documents/>. Acesso em: 11 jan. 2021.

INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION. **Pluto and the Developing Landscape of Our Solar System**. Paris, 2020. Disponível em: <<https://www.iau.org/public/themes/pluto/>>. Acesso em: 11 jan. 2021.

JOHNSON, M. **Kepler's Second Light: How K2 Will Work**. Washington: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/kepler/keplers-second-light-how-k2-will-work>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

JOHNSON, M. **Reborn Kepler Can Still Find Planets**. Mountain View: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/ames/kepler/reborn-kepler-can-still-find-planets>>. Acesso em: 29 jan. 2021.

JOHNSON, M. **Spacecraft and Instrument**. Washington: [s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/spacecraft/index.html>. Acesso em: 28 jan. 2021.

JOHNSON, M. **Mission overview**. Washington: [s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html>. Acesso em: 28 jan. 2021.

JOHNSON, M.; HARRINGTON, J. D. **NASA's Kepler Mission Announces a Planet Bonanza, 715 New Worlds**. Mountain View: [s.n.], 2014. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/ames/kepler/nasas-kepler-mission-announces-a-planet-bonanza>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

JOHNSON, M.; HARRINGTON, J. D.; CULLER, J. **NASA's Kepler Discovers First Earth-Size Planet In The 'Habitable Zone' of Another Star**. Mountain View: [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/ames/kepler/nasas-kepler-discovers-first-earth-size-planet-in-the-habitable-zone-of-another-star>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

KANE, S. R.; GELINO, D. M. The habitable zone and extreme planetary orbits. **Astrobiology**, New Rochelle, v. 12, n. 10, p. 940–945, 2012. Disponível em: <<https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ast.2011.0798>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

KANE, S. R. et al. Revised orbit and transit exclusion for hd 114762b. **The Astrophysical Journal Letters**, Bristol, v. 735, n. 2, 2011. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/735/2/L41/pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2021.

KANE, S. R.; HINKEL, N. R. On the habitable zones of circumbinary planetary systems. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 762, n. 1, p. 419–426, 2013. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/762/1/7/pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

KASTING, J. F.; WHITMIRE, D. P.; REYNOLDS, R. T. Habitable zones around main sequence stars. **Icarus**, San Diego, v. 101, n. 1, p. 108–128, 1993. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103583710109>>. Acesso em: 31 out. 2020.

KEMMER, J. et al. Discovery of a hot, transiting, earth-sized planet and a second temperate, non-transiting planet around the m4 dwarf gj 3473 (toi-488). **Astronomy & Astrophysics**, Les Ulis, v. 642, n. 2, 2020. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2020/10/aa38967-20.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2021.

KENWORTHY, M. A.; MAMAJEK, E. E. Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of j1407b: Sculpting by exomoons? **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 800, n. 2, 2015. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/800/2/126/pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2021.

KIPPING, D.; FOSSEY, S. J.; CAMPANELLA, G. On the detectability of habitable exomoons with kepler-class photometry. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Piccadilly, v. 400, n. 1, p. 398–405, 2009. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article/400/1/398/1071576>>. Acesso em: 5 nov. 2020.

KLESMAN, A. **Can solar systems exist in a binary star system?** Auckland: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://astronomy.com/magazine/ask-astro/2020/01/can-solar-systems-exist-in-a-binary-star-system>>. Acesso em: 2 fev. 2021.

KOLLMEIER, J. A.; RAYMOND, S. N. Can moons have moons? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Piccadilly, v. 483, n. 1, p. L80–L84, 2018. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnrasl/article/483/1/L80/5195537>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

KONACKI, M. et al. An extrasolar planet that transits the disk of its parent star. **Nature**, London, v. 421, n. 6922, p. 507–509, 2003. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature01379>>. Acesso em: 8 jan. 2021.

KOPPARAPU, R. K.; WOLF, E. T.; MEADOWS, V. S. Characterizing exoplanet habitability. In: _____. **Planetary Astrobiology**. Tucson: University of Arizona Press, 2020. p. 449–476. ISBN 9780816540068. Disponível em: <<https://uapress.arizona.edu/book/planetary-astrobiology>>. Acesso em: 17 fev. 2021.

MALAVOLTA, L. et al. An ultra-short period rocky super-earth with a secondary eclipse and a neptune-like companion around k2-141. **The Astronomical Journal**, Bristol, v. 155, n. 3, 2018. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/aaa5b5/pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2020.

MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, H. et al. Exomoons in the habitable zones of m dwarfs. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 887, n. 2, 2019. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ab5640/pdf>>. Acesso em: 23 out. 2020.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **TESS Mission Overview**. Cambridge. Disponível em: <<https://tess.mit.edu/science/>>. Acesso em: 4 mar. 2021.

MAYOR, M. et al. The harps search for southern extra-solar planets. xviii. an earth-mass planet in the gj 581 planetary system. **Astronomy and Astrophysics**, Les Ulis, v. 507, n. 1, p. 487–494, 2009. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2009/43/aa12172-09.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2020.

MAYOR, M.; QUELOZ, D. A jupiter-mass companion to a solar-type star. **Nature**, London, v. 378, p. 355–359, 1995. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/378355a0>>. Acesso em: 2 nov. 2020.

- MURRAY, C. D.; DERMOTT, S. F. **Solar System Dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/books/solar-system-dynamics/108745217E4A18190CBA340ED5E477A2>>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- NASA; TEAM, W. S. **The Life and Death of Stars**. Greenbelt, 2010. Disponível em: <https://map.gsfc.nasa.gov/universe/rel_stars.html>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- NASA EXOPLANET ARCHIVE. **Exoplanet and Candidate Statistics**. Pasadena, 2021. Disponível em: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html>. Acesso em: 28 nov. 2021.
- NASA EXOPLANET ARCHIVE. **GJ 581 Overview**. Pasadena, 2021. Disponível em: <<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/Gliese%20581>>. Acesso em: 9 fev. 2021.
- NASA EXOPLANET EXPLORATION. **Kepler Timeline**. La Cañada, 2018. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/kepler-timeline/>>. Acesso em: 29 jan. 2021.
- NASA EXOPLANET EXPLORATION. **Historic Timeline**. La Cañada, 2019. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/historic-timeline/>>. Acesso em: 18 fev. 2021.
- NASA EXOPLANET EXPLORATION. **5 Ways to Find a Planet**. La Cañada, 2020. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/#>>. Acesso em: 19 jan. 2021.
- NASA EXOPLANET EXPLORATION. **Gravitational Microlensing**. La Cañada, 2020. Disponível em: <<https://exoplanets.nasa.gov/resources/2167/gravitational-microlensing/>>. Acesso em: 18 fev. 2021.
- NGUYEN, T. G. et al. Modelling the atmosphere of lava planet k2-141b: implications for low- and high-resolution spectroscopy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Piccadilly, v. 499, n. 4, p. 4605—4612, 2020. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article/499/4/4605/5948140>>. Acesso em: 24 nov. 2020.
- NIDEVER, D. L. et al. Radial velocities for 889 late-type stars. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, Bristol, v. 141, n. 2, p. 503—522, 2002. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/340570/pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2021.
- PETIGURA, E. A.; HOWARD, A. W.; MARCY, G. W. Prevalence of earth-sized planets orbiting sun-like stars. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 110, n. 48, p. 19273—19278, 2013. Disponível em: <<https://www.pnas.org/content/pnas/110/48/19273.full.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2020.
- PLANETARY HABITABILITY LABORATORY. **Habitable Planets Catalog**. Arecibo, 2020. Disponível em: <<http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>>. Acesso em: 22 fev. 2021.
- QUINTANA, E. V. et al. An earth-sized planet in the habitable zone of a cool star. **Science**, Washington, v. 344, n. 6181, p. 277—280, 2014. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1249403>>. Acesso em: 3 fev. 2021.
- RAYMOND, S. N.; IZIDORO, A. Origin of water in the inner solar system: Planetesimals scattered inward during jupiter and saturn's rapid gas accretion. **Icarus**, San Diego, v. 297, p. 134—148, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103517302592?via%3Dihub>>. Acesso em: 28 nov. 2021.
- ROBNIK, J.; SELJAK, U. Kepler data analysis: non-gaussian noise and fourier gaussian process analysis of star variability. **The Astronomical Journal**, Bristol, v. 159, n. 5, 2020. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/ab8460/pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2021.

- ROSARIO-FRANCO, M. et al. Orbital stability of exomoons and submoons with applications to kepler 1625b-i. **The Astronomical Journal**, Bristol, v. 159, n. 6, 2020. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/ab89a7/pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2021.
- SAHLMANN, J. et al. Astrometric orbit of a low-mass companion to an ultracool dwarf. **Astronomy & Astrophysics**, Les Ulis, v. 556, 2013. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2013/08/aa21871-13.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2021.
- SCHRÖDER, K. P.; SMITH, R. C. Distant future of the sun and earth revisited. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Piccadilly, v. 386, n. 1, p. 155–163, 2008. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article/386/1/155/977315>>. Acesso em: 10 fev. 2021.
- SCHWARZ, R. **Catalog of Exoplanets in Binary Star Systems**. Vienna: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.univie.ac.at/adg/schwarz/multiple.html>>. Acesso em: 2 fev. 2021.
- SIGURDSSON, S. et al. A young white dwarf companion to pulsar b1620-26: Evidence for early planet formation. **Science**, Washington, v. 301, n. 5630, p. 193–196, 2003. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1086326>>. Acesso em: 25 jan. 2021.
- SIMOLA, U.; DUMUSQUE, X.; CISEWSKI-KEHE, J. Measuring precise radial velocities and cross-correlation function line-profile variations using a skew normal density. **Astronomy & Astrophysics**, Les Ulis, v. 622, n. A131, 2018. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2019/02/aa33895-18.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2021.
- STRØM, P. A. et al. Exocomets from a solar system perspective. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, Chicago, v. 132, n. 1016, p. 1058, 2020. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/aba6a0/pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- SUTTER, P. **Brown Dwarfs: The Coolest Stars or the Hottest Planets?** New York: [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://www.space.com/42790-brown-dwarfs-coolest-stars-hottest-planets.html>>. Acesso em: 24 mar. 2021.
- SWINBURNE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. **Stellar Evolution**. Melbourne. Disponível em: <<https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/S/Stellar+Evolution>>. Acesso em: 17 fev. 2021.
- TEACHEY, A.; KIPPING, D. M. Evidence for a large exomoon orbiting kepler-1625b. **Science Advances**, Washington, v. 4, n. 10, 2018. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aav1784>>. Acesso em: 19 jan. 2021.
- THE EUROPEAN SPACE AGENCY. **Artist's view of the COROT satellite**. Paris, 2006. Disponível em: <https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2006/11/Artist_s_view_of_the_COROT_satellite>. Acesso em: 22 jan. 2021.
- THE EUROPEAN SPACE AGENCY. **Stellar evolution**. Paris, 2018. Disponível em: <https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/03/Stellar_evolution>. Acesso em: 12 fev. 2021.
- THE EUROPEAN SPACE AGENCY. **COROT Objectives**. Paris, 2020. Disponível em: <https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/COROT/COROT_objectives>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- THE EUROPEAN SPACE AGENCY. **COROT Overview**. Paris, 2020. Disponível em: <https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/COROT_overview>. Acesso em: 22 jan. 2021.
- THE EXTRASOLAR PLANET ENCYCLOPAEDIA. **Exoplanet Catalog Listing**. 2021. Disponível em: <<http://exoplanet.eu/catalog/>>. Acesso em: 22 mar. 2021.

THEBAULT, P.; HAGHIGHIPOUR, N. Planet formation in binaries. In: _____. **Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances**. Berlin: [s.n.], 2015. p. 309–340. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45052-9_13>. Acesso em: 6 fev. 2021.

TORRES, G. et al. Validation of 12 small kepler transiting planets in the habitable zone. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 800, n. 2, 2015. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/800/2/99/pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

UDALSKI, A. et al. A jovian-mass planet in microlensing event ogle-2005-blg-071. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 628, n. 2, p. L109–L112, 2005. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/432795/pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2021.

UDRY, S. et al. The harps search for southern extra-solar planets. xi. super-earths (5 and 8 $m_{\oplus}$) in a 3-planet system. **Astronomy and Astrophysics**, Les Ulis, v. 469, n. 3, p. L43–L47, 2007. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2007/27/aa7612-07.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2020.

VLADILO, G. et al. The habitable zone of earth-like planets with different levels of atmospheric pressure. **The Astrophysical Journal Letters**, Bristol, v. 767, n. 1, 2013. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/767/1/65/pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2020.

WILLIAMS, D. R. **Moon Fact Sheet**. Greenbelt, 2020. Disponível em: <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

WOLSZCZAN, A.; FRAIL, D. A. A planetary system around the millisecond pulsar psr1257 + 12. **Nature**, London, v. 355, n. 6356, p. 145–147, 1992. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/355145a0>>. Acesso em: 6 nov. 2020.

WUNDERLICH, F. et al. Distinguishing between wet and dry atmospheres of trappist-1 e and f. **The Astrophysical Journal**, Bristol, v. 902, n. 2, 2020. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aba59c/pdf>>. Acesso em: 16 out. 2020.

ZIEBA, S. et al. Transiting exocomets detected in broadband light by tess in the β pictoris system. **Astronomy & Astrophysics**, Les Ulis, v. 625, 2019. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2019/05/aa35552-19.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2021.