

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA
UNIDADE CURRICULAR TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II
PROFESSORA BRUNA HELOÍSA SILVA RAIOL**

KENIA REGINA STREICH

EXOPLANETAS: NOVOS HORIZONTES A SEREM EXPLORADOS.

**JARAGUÁ DO SUL
MARÇO/2022**

KENIA REGINA STREICH

EXOPLANETAS: NOVOS HORIZONTES A SEREM EXPLORADOS

Trabalho de Pesquisa apresentado ao
Curso de Licenciatura em Física como
parte dos requisitos necessários à
aprovação na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso II.

Orientador: Dr. Luiz Henrique Martins Arthury

JARAGUÁ DO SUL
MARÇO/2022

EXOPLANETAS: NOVOS HORIZONTES A SEREM EXPLORADOS

KENIA REGINA STREICH

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção de título de Licenciado (a) em Física e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 03 de março de 2022.

Luiz Henrique Martins Arthury
Doutor em Educação Científica e Tecnológica

Luiz Fernando Macedo Morescki Junior
Doutor em Ciências Geodésicas

Jaison Vieira da Maia
Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica

*À minha família, que sempre me apoia e fortalece;
Ao universo, por ser uma fonte infinita de conhecimento e aprendizagem;
À divindade responsável (ou não) pelos fenômenos não aleatórios e perfeitos no universo;
Ao meu cão, Jack, pelas inúmeras horas de companhia enquanto eu escrevia este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a mim mesma por não ter desistido e por finalmente poder concluir esta importante etapa do curso de Licenciatura em Física.

Agradeço ao excelente e paciente orientador de pesquisa Luiz Henrique Martins Arthury pelos importantes e fundamentais direcionamentos realizados desde a criação do projeto até a finalização deste trabalho.

Agradeço a todos os docentes do curso de Licenciatura em Física que de alguma maneira contribuíram no meu processo formativo e que sempre servirão de exemplo, tanto na vida acadêmica e profissional, quanto pessoal.

Agradeço imensamente ao governo federal e a toda a população brasileira que paga seus impostos pela existência de instituições de ensino públicas de qualidade como é o Instituto Federal de Santa Catarina e espero do fundo do meu coração, que políticas deste tipo sejam futuramente replicadas e não extinguidas.

Obrigada a todos!!!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo elaborar um levantamento teórico sobre exoplanetas, partindo de uma perspectiva histórica e científica, buscando abordar processos interdisciplinares de descoberta, identificação e caracterização de planetas extrassolares, a fim de contribuir com fontes bibliográficas sobre o assunto para os professores de Física em atuação. Para isso, utilizou-se uma metodologia qualitativa e bibliográfica com a qual foram investigados artigos, trabalhos e estudos científicos e acadêmicos que tratam sobre a exoplanetologia. Os resultados apontam que as principais técnicas de medição e detecção de exoplanetas utilizadas atualmente são a velocidade radial, o trânsito planetário, a astrometria, o tempo de pulsar, o imageamento e as microlentes gravitacionais. O método da velocidade radial utiliza o bamboleio gravitacional provocado na estrela em decorrência de um corpo massivo que existe em suas vizinhanças. O trânsito planetário analisa as variações no brilho de uma estrela que ocorrem devido à passagem de um exoplaneta entre o observador e a hospedeira. A astrometria busca medir a posição de uma estrela em relação a referenciais fixos no espaço. As microlentes gravitacionais são formadas quando um corpo massivo passa em frente a uma estrela e provoca o desvio da luz de uma estrela de fundo, aumentando, momentaneamente o brilho do sistema. O imageamento, por sua vez, é o registro de imagens diretas dos exoplanetas por meio de fotografias. Por fim, destaca-se que a exoplanetologia é um campo de estudo que se encontra em pleno desenvolvimento, visto que, todos os dias são publicadas e divulgadas novas notícias e pesquisas envolvendo os planetas extrassolares.

PALAVRAS-CHAVE: Exoplanetas; missões espaciais; sistemas planetários.

ABSTRACT

This work aims to elaborate a theoretical survey on exoplanets, starting from a historical and scientific perspective, seeking to approach interdisciplinary processes of discovery, identification and characterization of extrasolar planets, in order to contribute with bibliographic sources on the subject for Physics teachers in acting. For this, a qualitative and bibliographic methodology was used, with which articles, works and scientific and academic studies dealing with exoplanetology were investigated. The results indicate that the main techniques for measuring and detecting exoplanets currently used are radial velocity, planetary transit, astrometry, pulsar time, imaging and gravitational microlensing. The radial velocity method uses the gravitational wobble caused in the star due to a massive body that exists in its surroundings. Planetary transit analyzes the variations in a star's brightness that occurs due to the passage of an exoplanet between the observer and the host. Astrometry seeks to measure the position of a star in relation to fixed references in space. Gravitational microlensing is formed when a massive body passes in front of a star and causes light to be deflected from a background star, momentarily increasing the brightness of the system. Imaging, in turn, is the recording of direct images of exoplanets through photographs. Finally, it should be noted that exoplanetology is a field of study that is in full development, as new news and research involving extrasolar planets are published every day.

KEY-WORDS: Exoplanets; espacial missions; planetary systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema geométrico de epiclos, equantes e deferentes proposto por Ptolomeu.....	15
Figura 2 – Breve linha do tempo com os principais acontecimentos, missões espaciais e descobertas envolvendo os exoplanetas	25
Figura 3 - Representação do trânsito planetário e da curva de luz resultante	27
Figura 4 - Gráfico relacionando a variação da luminosidade da estrela WASP-76 em função dos diferentes períodos do trânsito planetário	28
Figura 5 - Efeito Doppler no espectro eletromagnético de uma estrela em oscilação	30
Figura 6 - Curva de velocidade radial da estrela 51 Peg devido a presença do exoplaneta 51Peg b	31
Figura 7 - Simulação da oscilação de uma estrela (A) e da medição astrométrica da posição de uma estrela (B) para a detecção de exoplanetas	32
Figura 8 - Órbita da estrela Gliese B em torno do centro de massa de Gliese Aa-Ab.....	33
Figura 9 - Representação da formação de uma microlente gravitacional (A) e a respectiva curva de luz indicando um pico de luminosidade (B).....	34
Figura 10 - Gráfico da magnitude da estrela OGLE-2005-BLG-390 em função do tempo para uma microlente gravitacional	35
Figura 11 - Imagem direta de uma estrela (A) e imagem direta de um exoplaneta utilizando-se um coronógrafo na luz da estrela (B)	36
Figura 12 - Imagem direta do sistema planetário em torno da estrela HR 8799	37

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

AEC - Antes da Era Comum.

ALMA – Atacama Large Millimeter/submillimeter Array.

BDTD – Banco de Teses e Dissertações.

Caltech – California Institute of Technology (Instituto Tecnológico da Califórnia).

CGRO – Compton Gamma Ray Observatory (Observatório de Raios Gama Compton).

CNES – Centre National d'Études Spatiales (Centro Nacional de Estudos Espaciais da França).

CoRoT – Convection, internal Rotation and Transiting planets (Convecção, rotação interna e planetas em trânsito).

CSA – Canadian Space Agency (Agência Espacial Canadiana).

CXO – Chandra X-Ray Observatory (Observatório de Raio-X Chandra).

EC – Era Comum.

ESA – European Space Agency (Agência Espacial Europeia).

ESO – European Southern Observatory (Observatório do Sul Europeu).

FC – Física Clássica.

FM – Física Moderna.

FMC – Física Moderna e Contemporânea.

HARPS – High Accuracy Radial velocity Planet Searcher (Pesquisador de planetas de velocidade radial de alta precisão).

HIRES – High Resolution Spectrograph (espectrógrafo de alta resolução).

HST – Hubble Space Telescope (Telescópio espacial Hubble).

JWST – James Webb Space Telescope (Telescópio Espacial James Webb).

MIT – Massachusetts Institute of Technology (Instituto Tecnológico de Massachusetts).

MOST – Microvariability in Oscillations of Stars (Microvariabilidade das Oscilações das estrelas).

NASA – National Aeronautic and Space Administration.

pc – parsec = $3,1 \times 10^{16}$ metros.

PGO – Programa de Grandes Observatórios da NASA.

PLATO – Planetary Transits and Oscillations of stars (Trânsitos Planetários e Oscilações Estelares).

SAO – Smithsonian Astrophysical Observatory (Observatório Astrofísico Smithsonian).

TES – Telescópio Espacial Spitzer

TESS – Transiting Exoplanet Survey Satellite (Satélite de Pesquisa de Exoplanetas em Trânsito).

TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação

TOI – TESS Objects of Interest (Objetos de Interesse identificados com o TESS)

UA – Unidade astronômica = distância entre a Terra e o Sol = $1,5 \times 10^{11}$ metros.

UAI – União Astronômica Internacional

VLT – Very Large Telescope (Telescópio Very Large)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA

$M_{\odot}$ = Massa solar = $2,0 \times 10^{30}$ kg

$M_{\text{Júpiter}}$ = Massa de Júpiter = $1,89 \times 10^{27}$ kg

M_{Terra} = Massa da Terra = $5,97 \times 10^{24}$ kg

parsec = é equivalente a distância de um astro quando observado a partir da Terra com um ângulo de paralaxe de um segundo de um arco = $3,1 \times 10^{16}$ metros.

1 ano-luz = distância percorrida pela luz em 365 dias = $9,46 \times 10^{15}$ metros

1 UA (Unidade Astronômica) = equivale a distância entre a Terra e o Sol = $1,49 \times 10^{11}$ metros

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 A ASTRONOMIA ANTIGA	13
3 OS PLANETAS	20
4 O ESTUDO DOS EXOPLANETAS	23
4.1 GÊNESE DA EXOPLANETOLOGIA	24
4.2 COMO OS EXOPLANETAS SÃO DETECTADOS	25
4.2.1 Trânsito Planetário	26
4.2.2 Perturbação dinâmica da estrela	29
4.2.2.1 Velocidade Radial	29
4.2.2.2 Astrometria	32
4.2.2.3 Tempo de Pulsar	33
4.2.3 Microlentes Gravitacionais	34
4.2.4 Imagem Direta	36
4.2.5 Habitabilidade	38
4.3 A BUSCA DE EXOPLANETAS COM TELESCÓPIOS ESPACIAIS	40
4.4 AS DESCOBERTAS MAIS RECENTES	45
 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 48
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Há muito tempo os mistérios da vida e do Universo intrigam a humanidade, que por sua vez, se encontra em uma busca incessante pela sua compreensão, modelização, teorização e exploração da natureza e do cosmos. Perguntas como: “de onde viemos?”, “para onde vamos?”, “existe vida inteligente além do planeta Terra?”, “algum dia poderemos viajar entre sistemas solares e galáxias?”, “como o universo de originou?”, dentre tantas outras, instigam a curiosidade e impulsionam a busca de conhecimento. É nesse contexto que as ciências da natureza, isto é, Física, Química, Biologia, Astronomia, entre outras, começam a ser desenvolvidas e aprimoradas.

Os fenômenos físicos fazem parte do cotidiano das pessoas continuamente, seja através das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), da engenharia, de tratamentos e diagnósticos médicos (MOREIRA, 2018), no ato de preparar e cozinhar alimentos ou mesmo nos processos que permitem a manutenção da vida. Muitas das tecnologias e artefatos idealizados e construídos pelo homem, utilizados atualmente, só podem ser entendidos a partir de ideias e concepções da Física Moderna (FM) (que se inicia durante a virada do século XIX para XX) e da Física Contemporânea (FC). Desse modo, compreender os métodos e descobertas mais recentes da Física é fundamental para que o indivíduo possa vivenciar e participar do mundo tecnológico em que está inserido, visto que a sua capacidade de intervir na própria realidade está diretamente ligada a sua compreensão desta (TERRAZZAN, 1992).

Apesar disso, o que observamos nas instituições de ensino é a supressão do ensino de tópicos e conteúdos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), enquanto que a Física Clássica (limitada) é acentuada e colocada em foco. Como consequência, o cenário da educação básica, privilegia o ensino de ciências desconectado e distante da realidade que nos cerca (MOREIRA, 2018). Todavia, dizer que temos então de abandonar os conceitos clássicos é equivocado, visto que estes são a base de muitas explicações e teorias físicas válidas que continuam a ser utilizadas. Portanto, o que se defende é que sejam inseridos mais conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nos currículos escolares e que as devidas diferenciações, limitações e similaridades entre a Física Clássica e FMC sejam apontadas e destacadas, de modo que o estudante possa distingui-las e transpô-las para a sua realidade.

A Cosmologia e a Astrofísica são campos do conhecimento pertencentes aos conteúdos de FMC e podem servir como importantes pontos de partida para o ensino contextualizado e exemplificado de Física, além de apresentar ao estudante um conhecimento que pode lhe ser mais interessante e significativo. Desse modo, a inserção de conteúdos sobre

exoplanetas (planetas que estão além do sistema solar) no ensino de Física apresenta-se como uma possibilidade interessante para se introduzir aspectos da Física Moderna e Contemporânea aos assuntos trabalhados.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é elaborar um levantamento teórico sobre exoplanetas, partindo de uma perspectiva histórica e científica, buscando abordar processos interdisciplinares de descoberta, identificação e caracterização de planetas extrassolares, a fim de contribuir com fontes bibliográficas sobre o assunto para os professores de Física. Para isso, este trabalho adotou uma metodologia de pesquisa bibliográfica de abordagem qualitativa com a qual foram mapeados estudos, artigos e documentos que discorrem sobre a exoplanetologia em bases de dados como o Scielo, BDTD (Banco de Teses e Dissertações), periódicos e Google Acadêmico. A pesquisa qualitativa considera que existe uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito que não pode ser traduzido através de números, e, portanto, o ambiente natural é a fonte da coleta de dados e o pesquisador é o instrumento chave para tal (PRODANOV, DE FREITAS, 2013).

O presente trabalho está dividido em seis seções: a primeira seção consiste nesta breve introdução; a segunda seção aborda um resumo histórico da Astronomia antiga, o qual é fundamental para compreendermos como se deu a evolução do pensamento organizacional dos corpos celestes e do universo; a terceira seção é sobre planetas, onde são apresentadas informações acerca das características necessárias para que um astro seja classificado como um planetóide; depois, apresenta-se a seção sobre os exoplanetas (tópico quatro), a qual versa sobre a definição de planetas extrassolares e as suas classificações, seguida de uma breve linha do tempo com os principais acontecimentos envolvendo a temática, a descrição dos métodos de detecção destes corpos e quais as propriedades necessárias para que um planeta possa ser considerado habitável; já a seção cinco discorre sobre as principais missões, passadas, presentes e futuras, que estão relacionadas ao mapeamento e detecção de exoplanetas; e por fim, a seção seis consiste num breve levantamento das descobertas e estudos mais recentes envolvendo os planetas e outros corpos que estão além do sistema solar. Por último, elencam-se as principais considerações finais do presente trabalho.

2 A ASTRONOMIA ANTIGA

A Astronomia é considerada por muitos historiadores como sendo a ciência mais antiga da qual se têm registro, visto que em 3000 AEC, os povos Chineses, Babilônicos, Assírios e Egípcios já especulavam sobre a origem do universo. O estudo dos astros, por sua vez, teve origem tanto na necessidade de calendários para o controle e monitoramento das melhores épocas de plantio e colheita, quanto para fins astrológicos¹, como a previsão do futuro da vida das pessoas, dos volumes de chuva e do sucesso da colheita. Evidências dos estudos astronômicos da antiguidade são encontradas e estudadas até hoje, como é o caso do monumento de Stonehenge na Inglaterra que data entre 3000 AEC e 1500 EC (OLIVEIRA FILHO, 2013).

O ápice da ciência antiga (600 AEC à 200 EC) ocorreu na Grécia devido aos avanços na Astronomia e matemática, pois esses gregos acreditavam que a natureza poderia ser totalmente descrita matematicamente, inclusive o comportamento dos corpos celestes (OLIVEIRA FILHO, 2013). Desse modo, “com o desenvolvimento da matemática, a explicação dos fenômenos celestes exigia uma correspondência entre as observações realizadas sobre a trajetória dos corpos celestes e o cálculo geométrico-matemático” (LOPES, 2014, p. 4) o que resultou em diversas teorias e modelos que buscavam explicar a organização do sistema solar e o nosso lugar no universo.

Antes de adentrarmos nos modelos astronômicos, entretanto, o Quadro 1 apresenta alguns dos principais filósofos que tiveram contribuições no campo da Astronomia.

QUADRO 1 – Principais Astrônomos da Grécia Antiga e as suas contribuições.

Astrônomo	Contribuições
Tales de Mileto (624-546 AEC)	Apresentou a Astronomia para a Grécia; acreditava que a Terra era um grande disco plano que flutuava sobre uma extensa massa de água; previu um eclipse solar.
Anaximandro (610-546 AEC)	Propôs que o movimento dos corpos celestes não era determinado por deuses, mas seguiam modelos.
Pitágoras (572-497 AEC)	Defendia que os corpos celestes tinham forma esférica e criou o termo “Cosmos” para descrever a ordem racional, a simetria e a beleza.
Filolau (430-390 AEC)	Acreditava que a Terra girava em torno do seu próprio eixo, enquanto que todos os corpos celestes (inclusive a Terra e o Sol) estariam girando em torno de um fogo central.
Eudóxio (408-344 AEC)	Estimou a duração de um ano em 365 dias e 6 horas, e explicou o movimento dos corpos celestes utilizando esferas concêntricas.

¹ Atualmente classificamos a astrologia como uma pseudociência, mas na antiguidade, esta era a base de muitas crenças, as quais foram sendo superadas gradativamente com o desenvolvimento da ciência.

Aristóteles (384-322 AEC)	Buscou explicar racionalmente todos os fenômenos naturais, como as fases da lua e os eclipses. Acreditava que o universo era esférico e finito, enquanto que a Terra era esférica, estática e estava no centro de tudo.
Aristarco (310-230 AEC)	Imaginava que o Sol não poderia orbitar a Terra, então propôs o modelo heliocêntrico e definiu a ordem dos planetas.
Eratóstenes (276-194 AEC)	Estimou o diâmetro da Terra utilizando um poço de Siena e a sua distância até Alexandria.
Hiparco (160-125 AEC)	Foi o maior astrônomo da era pré-cristã, pois criou um compilado com a posição e magnitude de 850 estrelas, deduziu o período de precessão da Terra (26000 anos) e determinou a duração de um ano com um erro de 6 minutos.
Ptolomeu (85-165 EC)	Foi o último astrônomo importante da antiguidade. Montou uma representação geométrica do sistema solar (com a Terra no centro) utilizando epiciclos que permitiam prever o movimento dos planetas com grande precisão.

FONTE: Elaborado a partir de OLIVEIRA FILHO, 2013.

Uma das propostas cosmológicas foi o modelo geocêntrico idealizado por Aristóteles que predominou durante todo o período medieval. Na explicação de Aristóteles, a Terra se encontrava totalmente imóvel no centro do universo, que por sua vez era perfeito, imutável, eterno, circular e contínuo. A Lua e os demais astros não possuíam movimento próprio, pois estavam fixos na esfera celeste (LOPES, 2014), que consistia em “[...] uma esfera rotativa de material cristalino, incrustada de estrelas, tendo a Terra no centro” (OLIVEIRA FILHO, 2013, p. 2). Claudio Ptolomeu (85-165 EC) e outros pensadores, por sua vez, defendiam um agrupamento no qual o Sol e a Lua moviam-se, enquanto que a Terra permanecia estática no centro de tudo (assim como Aristóteles). De acordo com Ptolomeu,

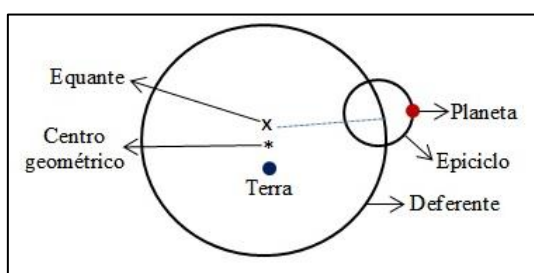
[...] o movimento de cada planeta passa a ser explicado a partir da ideia de que desenvolvem um movimento uniforme ao longo de um círculo denominado de epiciclo, e o seu centro desenvolve uma trajetória em torno de um outro círculo, denominado de deferente, tendo como referência o centro do universo, o planeta Terra, sempre imóvel (LOPES, 2014, p. 9).

Ao propor esta explicação para o movimento dos astros, Ptolomeu conseguiu atingir o seu principal objetivo que era prever com precisão a posição dos planetas a partir de um protótipo (SOTO, 2020). No entanto, surgiram alguns fenômenos que não se encaixavam nas previsões realizadas pelo modelo, como o movimento retrógrado² que Mercúrio desenvolvia, por exemplo. Na tentativa de manter sua explicação válida, para cada discrepância Ptolomeu adicionava mais epiciclos e equantes ao modelo, levando à concepção de uma proposta

² O movimento retrógrado é um fenômeno que ocorre devido às diferentes velocidades que os planetas possuem. Em alguns momentos, a trajetória de Mercúrio se move na mesma direção do Sol e da Lua, enquanto que em outros, o planeta parece se mover na direção oposta, o que nos dá a impressão de um deslocamento para trás.

extremamente complexa, que discordava da simplicidade da natureza e violava o princípio básico do movimento uniforme (SANTOS, 2019; OLIVEIRA FILHO, 2013). A Figura 1 apresenta o esquema de epiciclos de Ptolomeu. Um epiciclo é uma trajetória circular que se movimenta sobre outro círculo maior chamado de deferente, enquanto que o ponto equante é aquele ao redor do qual a velocidade angular do deferente é constante.

Figura 1 – Esquema geométrico de epiciclos, equantes e deferentes proposto por Ptolomeu.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o fim da Idade Média e início da renascença no século XVI, criou-se um novo cenário para o conhecimento científico e com ele, o modelo de universo finito e hierárquico de Aristóteles e Ptolomeu foi questionado. Copérnico e Giordano Bruno defendiam o heliocentrismo, rejeitado fortemente pela Igreja Católica e ignorado, inicialmente, por importantes astrônomos da época. Para o heliocentrismo, o centro do universo era ocupado pelo Sol, enquanto a Terra orbitava em seu entorno, e, portanto, esta não era mais estática e deixava de ser o centro de tudo. A principal diferença entre o geocentrismo de Aristóteles e o heliocentrismo de Copérnico, é que a Terra deixa de ser o foco principal do modelo de organização dos corpos celestes, o que desagradava a Igreja Católica, uma vez que para ela, Deus criou o universo e tudo que existe nele tendo a humanidade como foco, então a Terra deveria ocupar uma posição de destaque frente aos outros astros (OLIVEIRA FILHO, 2013; LOPES, 2014).

Nicolau Copérnico viveu entre os anos de 1473 e 1543 e durante este período realizou importantes contribuições para o renascimento da Astronomia, que só foram divulgadas e reveladas, entretanto, após a sua morte, a exemplo de sua obra “Sobre as revoluções das órbitas celestes” publicada ainda em 1543. Neste escrito, Copérnico resgata e defende o posicionamento manifestado por Aristarco, muitos séculos antes, de que um modelo heliocêntrico, no qual o Sol estava no centro do sistema, fazia muito mais sentido do que os sistemas geocêntricos propostos até então. Para Copérnico, a Terra era apenas mais um dos

seis planetas (conhecidos até então) girando em torno do Sol com movimentos circulares, eternos e uniformes (SANTOS, 2019; LOPES, 2014). Apesar disso, a grande obra de Copérnico não foi recebida pela comunidade acadêmica com o clamor esperado e recebeu inclusive diversas críticas de importantes astrônomos como Tycho Brahe, por exemplo (LOPES, 2014).

Ao organizar os planetas em sequência de acordo com sua proximidade do Sol, isto é, Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno (conhecidos até então), Copérnico percebeu que quanto mais próximo do Sol um planeta estava, maior era a sua velocidade orbital, o que inviabilizava totalmente a teoria de Ptolomeu. No entanto, ao propor uma explicação alternativa a de Ptolomeu, Copérnico também utilizou pequenos epiciclos (o que mais tarde seria percebido como um erro), considerou que as órbitas eram circulares, mas não inseriu as equantes em sua proposta (OLIVEIRA FILHO, 2013). Apesar do heliocentrismo endossado por Copérnico ter fornecido explicações mais simples, harmônicas e naturais para as observações, esta teoria ainda não conseguia prever sem erros quais as posições dos planetas e nem mesmo provava que o planeta Terra estava efetivamente em movimento (OLIVEIRA FILHO, 2013; SANTOS, 2019).

Giordano Bruno, um importante filósofo do século XVI e crítico do modelo aristotélico, apoiava a maioria das ideias copernicanas e foi o primeiro a perceber que se a Terra estivesse em movimento, a esfera celeste e a finitude do universo eram teorias equivocadas. Bruno foi além de Copérnico, pois criou um conceito de espaço infinito, homogêneo e inerte, com lugar para a existência de inúmeros sistemas heliocêntricos. Isto é, Giordano Bruno, é o primeiro filósofo a pensar em outros sistemas estelares. Os pensamentos deste filósofo contribuíram para a revolução científico-cultural que culminou com a publicação da obra de Copérnico e que deu origem, mais tarde, à Idade Moderna (SANTOS, 2019; LOPES, 2014).

No século XVII a obra de Copérnico ganha notoriedade e novos adeptos como Kepler e Galileu e com eles inicia-se um período histórico chamado de experimental para a Astronomia. Johannes Kepler (1571-1630) era o auxiliar e sucessor do importante astrônomo observacional Tycho Brahe (1546-1601). Tycho construía seus próprios instrumentos e observava as estrelas e os planetas, realizando registros de grande precisão, a fim de corroborar o geocentrismo. Após a morte de seu mentor, Kepler estudou detalhada e cuidadosamente os dados de 20 anos de observação de Brahe, sendo a maioria deles relativos ao planeta Marte. A partir da comparação com Marte, Kepler inicialmente estabeleceu a órbita

do planeta Terra e também a de Marte, como sendo circulares. Todavia, considerar a órbita de Marte circular não se adequava com as informações obtidas por Brahe e muitos anos depois, Kepler resolveu testar uma órbita elíptica, com a qual obteve êxito, uma vez que esta se ajustou mais satisfatoriamente aos dados observacionais. Kepler não teve o mesmo problema com a órbita da Terra, pois a excentricidade de sua elipse é tão suave que pode ser considerada circular, sendo que o Sol está levemente deslocado do centro (OLIVEIRA FILHO, 2013; HORVATH, 2008).

A partir de seus estudos, Kepler foi então capaz de elaborar as três leis do movimento planetário (BASTOS FILHOS, 1995; HORVATH, 2008):

- Primeira lei de Kepler: os planetas percorrem órbitas elípticas em torno do Sol, o qual ocupa um dos focos da elipse;
- Segunda Lei de Kepler: As áreas percorridas por um vetor que parte do Sol e toca o planeta, são as mesmas para os mesmos tempos;
- Terceira Lei de Kepler: “A razão entre o cubo do semi-eixo maior da órbita de um dado planeta em torno do Sol e o quadrado do período de translação desse mesmo planeta em torno do Sol é uma constante, independentemente do planeta” (BASTOS FILHOS, 1995, p. 235).

Por volta da mesma época em que Kepler trabalhava com os dados de Tycho, mais especificamente no ano de 1610, o italiano Galileu Galilei (1564-1642) iniciava as suas observações astronômicas utilizando um telescópio com um aumento de três vezes, construído por ele mesmo. O nome Galileu é sempre associado à invenção do telescópio, mas é necessário sempre lembrar que Hans Lippershey teve papel fundamental na criação dos telescópios antes mesmo de Galilei. Com seu equipamento astronômico, Galileu observou a vastidão de estrelas da Via Láctea e foi o primeiro a identificar os quatro maiores satélites naturais de Júpiter: Io, Europa, Calisto e Ganimedes (HORVATH, 2008; OLIVEIRA FILHO, 2013).

A descoberta de outras “luas” orbitado os diferentes planetas, abriu a possibilidade para a existência de outros núcleos de movimentação, ou seja, o Sol não era o centro do universo. Ao descobrir crateras na superfície da lua e manchas no Sol, Galileu também concluiu que os corpos celestes não eram esferas perfeitas. Em decorrência de todas as suas proezas e especialmente devido aos seus posicionamentos científicos (que retiravam a humanidade do centro de tudo), Galileu Galileu sofreu muitas perseguições da Inquisição da

Igreja Católica, a qual defendia o geocentrismo (mais especificamente o Teocentrismo – deus no centro de tudo) (HORVATH, 2008; OLIVEIRA FILHO, 2013).

Mais tarde, Isaac Newton (1643-1727) também contribuiu para o avanço dos conhecimentos e explicações da Astronomia, ao propor que o movimento dos planetas é produzido por uma força direcionada para o Sol, que chamamos de gravidade, a qual produz uma aceleração decorrente da mudança de direção da velocidade.

Diferentemente do que se costuma pensar, Newton não partiu das leis de Kepler para chegar na gravitação universal. Como defendido pelo filósofo Karl Popper este processo não ocorreu de forma indutiva. A indução da gravitação a partir da lei de Kepler não é possível, uma vez que as teorias de Kepler aplicavam-se a sistemas com vários corpos, enquanto que Newton tratava todas as situações em pares, isto é, com apenas dois corpos isolados (BASTOS FILHOS, 1995). Desse modo, a Lei da Gravitação Universal elaborada por Newton pode ser enunciada da seguinte maneira:

[...] Quaisquer dois corpos do universo, de massas, respectivamente, M_1 e M_2 , atraem-se com forças iguais em módulo, cada uma dessas forças agindo sobre cada corpo (ação e reação) e igual a $F = G.M_1.M_2/R^2$ onde os índices 1 e 2 da fórmula [...] dizem respeito a quaisquer pares de massa do Universo, podendo ser galáxias, átomos, etc.” (BASTOS FILHOS, 1995, p. 235).

Newton também provou matematicamente que as órbitas dos planetas em torno do Sol eram elipses, conforme previa Kepler. Além disso, Newton construiu o telescópio refletor, o qual permitiu que inúmeras novas possibilidades fossem criadas no campo da Astronomia e astrofísica (OLIVEIRA FILHO, 2013).

Hoje em dia a comunidade científica é adepta do modelo heliocêntrico e defende-se que:

O movimento observado de cada planeta é uma combinação do movimento do planeta em torno do Sol com o movimento da Terra em torno do Sol, e é simples de explicar quando sabemos que a Terra está em movimento, mas fica muito difícil descrever num sistema em que a Terra esteja parada e seja o centro do movimento dos outros astros, ou seja, num sistema geocêntrico (OLIVEIRA FILHO, 2013, p. 65).

Apesar disso, com o avanço da ciência, a busca pela compreensão e entendimento de como se formou o universo e qual o lugar que ocupamos dentro de sua imensidão não enfraqueceu. Pelo contrário, quando nossas tecnologias tornam-se capazes de identificar um planeta extrassolar, logo buscamos por instrumentos que possam encontrar planetas extragalácticos, pois nunca estamos suficientemente satisfeitos. E é em decorrência desse

processo (e de outros) que a ciência se desenvolve e leva a criação de novas tecnologias, de modo que a humanidade passa alcançar objetivos cada vez mais ambiciosos.

3 OS PLANETAS

O sistema planetário em que vivemos é formado por uma estrela, que é o Sol; por oito planetas divididos em duas categorias: os rochosos formados por Mercúrio, Vênus, Terra e Marte, os gigantes gasosos formados por Júpiter, Saturno e os gigantes de gelo que são Netuno e Urano; por planetas anões, como Plutão, Ceres, Makemake, Haumea e Eris; pelo cinturão de asteroides localizado entre Marte e Júpiter e pelo cinturão de Kuiper exterior a Plutão (NASA, 2022). Todo este sistema se encontra na Via Láctea, nossa galáxia, que recebeu este nome por ter uma aparência esbranquiçada e leitosa (de acordo com os Gregos antigos) quando observada a partir da Terra. Destaca-se que na Grécia Antiga, ainda não existia o conceito de galáxia como conhecemos hoje e por isso, a mancha no céu observada pelos Gregos era chamada apenas de “caminho leitoso”. Nossa galáxia, assim como todas as outras foi formada a partir da condensação e aglomeração de grandes massas gasosas e de matéria (PERRYMAN, 2000) que deram origem, gradativamente às estrelas, aos planetas e aos demais corpos celestes que a compõe.

Os planetas recebem este nome porque quando os gregos da antiguidade observavam o céu, percebiam que havia alguns corpos que se moviam em relação ao fundo de estrelas fixas, aos quais eles chamaram de andarilhos errantes, que significa planetas (VÁLIO, 2009; SOTO, 2020). A formação planetária ainda vem sendo estudada, mas de acordo com Perryman (2000) acredita-se que as diferentes etapas formativas se diferenciam devido à forma como as partículas interagem entre si. Na primeira etapa de constituição, os grãos de poeira e as partículas remanescentes da nuvem de formação estelar formam um disco protoplanetário, dentro qual se inicia um processo de aglomeração de matéria por meio de colisões, levando a formação gradativa de objetos com dimensões entre 0,01 e 10 metros que se movem na mesma direção de rotação da nuvem.

A segunda etapa de formação planetária tem uma duração de 10.000 a 100.000 anos, período em que os processos de colisão tiveram continuidade e levaram a formação de corpos planetesimais, isto é, objetos que possuem um quilômetro ou mais de largura. Nesta fase os corpos passam a sofrer a influência das interações gravitacionais, as quais provocam o prosseguimento do processo de aglomeração de matéria de modo a concentrar, progressivamente, todo o material que está na órbita do planetesimal (PERRYMAN, 2000).

Na terceira e última etapa, as interações gravitacionais entre os diferentes corpos massivos formados em torno de uma estrela, podem causar modificações nas órbitas de alguns destes objetos, o que pode acarretar nas colisões desses planetesimais. Os planetoides que se

chocam a baixas velocidades não são destruídos, mas, ao contrário, unem-se em um só objeto que é chamado embrião. Os embriões formados possuem massas de 10^{23} kg quando estão na região terrestre e massas superiores quando estão na região mais externa do sistema planetário (PERRYMAN, 2000; SOTO, 2020). Apesar de ainda não sabermos bem ao certo como se dá a formação planetária, é a partir do estudo de exoplanetas e de sistemas estelares mais novos que o nosso, que conseguiremos entender como ocorre este processo formativo.

De acordo com a União Astronômica Internacional (UAI), para que um corpo celeste seja considerado um planeta deve atender aos seguintes critérios, estabelecidos em 2006: orbitar uma estrela (o que sabemos hoje não ser obrigatório, visto que planetas livres já foram detectados); possuir massa suficiente para que a gravidade defina o formato do corpo de modo a atingir o equilíbrio hidrostático, isto é, uma configuração esférica; o planeta deve ser o objeto dominante em sua órbita, o que significa que este deve ter “limpado” gravitacionalmente as suas vizinhanças. Outro parâmetro fundamental para um planeta é possuir massa inferior a $13 M_{\text{Júpiter}}$, pois se for superior, torna-se capaz de fundir o deutério (isótopo do hidrogênio), e, nesse caso, deixa de ser um planeta e transforma-se em uma estrela. Já os corpos celestes que possuem massa elevada e conseguem fundir o deutério, mas não o Hidrogênio, são chamados de anãs marrons, os quais têm massas entre 0,013 e 0,075 $M_{\odot}$ (massas solares) (VÁLIO, 2009).

Stern e Levison (2002), por sua vez, propõem dois critérios para classificar um corpo como planeta: a massa do objeto deve ser suficientemente baixa para que em nenhum momento este gere energia por meio de fusão, pois neste caso, não seria encaixado como planeta, mas como anã marrom ou estrela; mas ao mesmo tempo, o astro deve possuir massa suficiente para que tenha a sua forma determinada pelas forças gravitacionais e assim atinja equilíbrio hidrostático em seu interior. De acordo com os mesmos autores, os planetas podem ser compostos por rochas, gelo, gás ou hidrogênio e são classificados com base em seu tamanho em subanão, anão, subgigante, gigante ou supergigante.

Nos últimos anos alguns fatores contribuíram diretamente para o avanço da Astronomia e especificamente para a detecção e estudo dos planetas (estrassolares ou não). O primeiro deles é que ocorreram diversos avanços nas teorias cosmológicas, especialmente nos modelos que buscam explicar como se deu a formação do sistema solar. O segundo fator está relacionado ao desenvolvimento e combinação de diversas técnicas e tecnologias para a detecção de planetas extrassolares e outros astros. E por fim, a implementação de diversos telescópios, observatórios, programas e missões espaciais permitiram a identificação de

milhares de planetas que se encontram além do nosso sistema solar (PERRYMAN, 2000), ampliando nossos conhecimentos acerca do universo que nos cerca.

4 O ESTUDO DOS EXOPLANETAS

Giordano Bruno, já no século XVI propôs a existência de inúmeros sistemas planetários independentes orbitando estrelas, mas foi somente no século XX que a humanidade foi capaz de corroborar esta teoria a partir da detecção de planetas extrassolares (SANTOS, 2019). Exoplanetas são planetas que estão localizados fora do nosso sistema planetário, isto é, que não orbitam o Sol e que atendem aos critérios de classificação planetária da União Astronômica internacional. Estes planetas extrassolares podem orbitar estrelas, assim como a Terra orbita o Sol ou podem estar vagando livremente pela galáxia orbitando o centro desta, sendo denominados, neste último caso, de planetas rogue ou rebeldes (NASA, 2022). Até meados de janeiro de 2022, de acordo com a NASA, foram confirmados 4903 exoplanetas e outros 8460 aguardam a validação, sendo que a cada dia estes números sofrem atualizações, visto que, a cada instante, mais dados de missões espaciais são processados. As estrelas orbitadas por exoplanetas possuem massas entre 0,1 e 30 $M_{\odot}$ (PERRYMAN, 2000), enquanto que os planetas extrassolares são classificados, de acordo com sua massa e características em: Netunianos, Super Terras, Gigantes gasosos ou Terrestres (NASA, 2022).

Os planetas do tipo Netuniano totalizam 1720 dos confirmados até o momento e são classificados nesta categoria por possuírem características muito similares às de Netuno e Urano (planetas do sistema solar), isto é, são gigantes de gelo. Já as Super Terras somam 1518 exoplanetas e são planetas exóticos, pois apesar de serem mais massivos que a Terra, são mais leves do que os gigantes netunianos e podem ser formados por rochas, gases ou uma combinação destes. Os gigantes gasosos, por sua vez, correspondem a 1474 planetas e possuem características semelhantes às de Júpiter e Saturno. Por fim, os Terrestres, cerca de 186 planetas, são planetas rochosos que possuem núcleos de ferro e, portanto, se assemelham a Mercúrio, Vênus, Terra e Marte (NASA, 2022).

Planetas (e outros corpos) que ficam muito próximos de sua estrela hospedeira podem sofrer de acoplamento de maré causado pela ação gravitacional intensa entre os dois corpos. Como resultado, o exoplaneta manterá sempre a mesma face orientada para a estrela, o que causará elevadas temperaturas nesta região, reduzindo as chances de habitabilidade. Este fenômeno de maré não é específico de planetas, mas é inerente a todo sistema gravitacional, inclusive de satélites naturais, como nossa Lua que sempre possui a mesma face direcionada para a Terra. No entanto, a existência de satélites naturais orbitando os planetas extrassolares pode evitar a ocorrência deste fenômeno de maré. Desse modo, atualmente, além de realizar-

se a busca por exoplanetas habitáveis, busca-se também pela existência de satélites naturais em torno deles a fim de avaliar o ambiente como favorável ou não para o desenvolvimento de vida baseada em carbono (MONZÓN, 2021).

4.1 GÊNESE DA EXOPLANETOLOGIA

Apesar do que podemos pensar a detecção do primeiro exoplaneta não foi acidental, mas uma consequência decorrente de uma série de observações e avanços tecnológicos promovidos ao longo dos anos (MONZÓN, 2021). Atualmente, podem ser utilizadas diversas técnicas e métodos para a detecção e identificação dos planetas extrassolares, sendo que cada uma delas possui suas vantagens e limitações frente às outras. A detecção de planetas extrassolares a partir da análise da modificação da assinatura fotométrica³ de uma estrela decorrente de um eclipse foi considerada pela primeira vez como possível no ano de 1952 por Struve (PERRYMAN, 2000). Entretanto, o primeiro exoplaneta foi descoberto apenas no ano de 1988 por Bruce Campbell, Gordon Walker e Stephenson Yang, descoberta esta que foi corroborada e validada apenas no ano de 2003 (SOTO, 2020).

No ano de 1992, Aleksander Wolszczan e Dale Frail identificaram o primeiro sistema planetário em torno de um pulsar. O pulsar PSR B1257+12 está a aproximadamente 500 pc da Terra e é orbitado por dois planetas rochosos com massas semelhantes a terrestre (SOTO, 2020; PERRYMAN, 2000; AMORIM; SANTOS, 2017). O primeiro planeta está a uma distância de 0,47 UA do pulsar, possui um período orbital de 98,22 dias e uma massa de 2,8 M_{Terra} . Já o segundo exoplaneta está a 0,36 UA do pulsar, possui um período orbital de 66,54 dias e uma massa de 3,4 M_{Terra} (PERRYMAN, 2000).

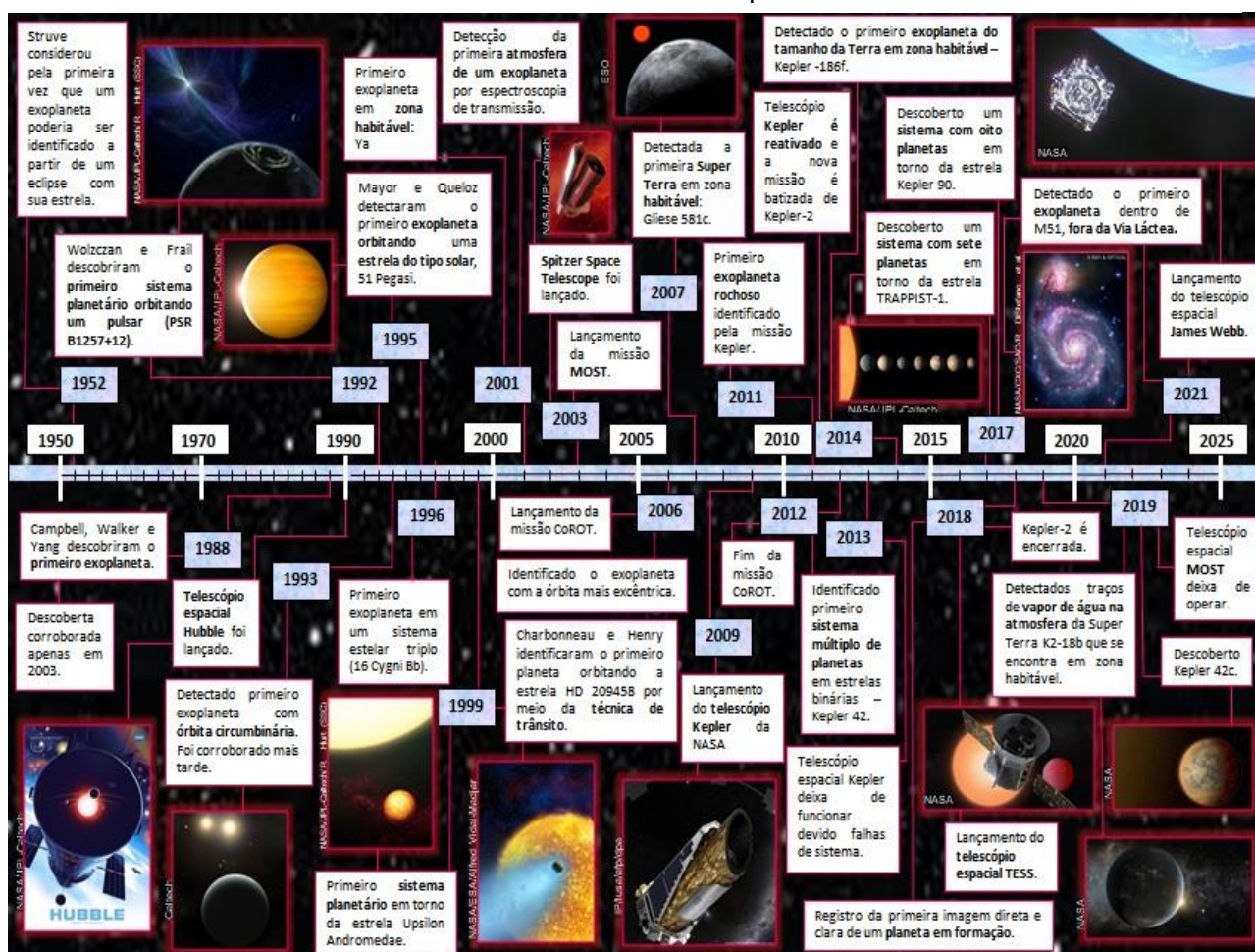
Já no ano de 1995, dois suíços, Michel Mayor e Didier Queloz detectaram, a partir do método da medição da velocidade radial (abordado na próxima seção juntamente com outras técnicas de detecção), um sistema do tipo solar com um exoplaneta orbitando a estrela 51 Peg, localizada a 14,7 pc da Terra (LENCHUK et al, 2021). O planeta “51 Pegasi a” possui um período orbital de 4,2 dias, a metade da massa de Júpiter e se localiza a 0,05 UA de sua estrela (PERRYMAN, 2000; VÁLIO, 2009; SOTO, 2020). Esta descoberta levou a revisão dos modelos de formação planetária que eram utilizados, pois até então, não se conhecia nenhum planeta com um ano de duração tão curta e tão próximo a sua estrela hospedeira.

³ A assinatura fotométrica de uma estrela é obtida a partir da análise espectral da luz emitida, isto é, o estudo dos diferentes comprimentos de onda da luz. Como cada elemento químico possui um espectro característico, cada estrela também possuirá uma assinatura específica e única.

Recentemente a descoberta de Mayor e Queloz foi laureada com o Prêmio Nobel de Física de 2019 (SOTO, 2020; MONZÓN, 2021).

A partir da metade da década de 1990, as descobertas envolvendo planetas fora de nosso sistema solar foram se acumulando e dando origem a novos estudos e missões espaciais. Desse modo, a Figura 2 apresenta uma breve linha do tempo com os principais acontecimentos, missões espaciais e descobertas envolvendo os exoplanetas.

Figura 2 – Breve linha do tempo com os principais acontecimentos, missões espaciais e descobertas envolvendo os exoplanetas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 COMO OS EXOPLANETAS SÃO DETECTADOS?

Existem diversas técnicas e métodos que podem ser utilizados para a detecção e posterior identificação de um exoplaneta. Neste estudo abordaremos o método do trânsito planetário, da velocidade radial, de astrometria, do tempo de pulsar, de microlentes

gravitacionais e de imagem direta⁴. Destaca-se que cada uma destas técnicas possui uma especificidade e, portanto, são mais adequadas em algumas situações do que em outras. Apesar disso, comumente as diferentes metodologias são empregadas em conjunto com o objetivo de obter-se o máximo de informações sobre o sistema planetário observado. As técnicas responsáveis pelo maior número de descobertas são a medição e observação do trânsito de um planeta, responsável por 76,6% das identificações e o método de medição da velocidade radial da estrela, que corresponde a 18,6% das detecções (NASA, 2022; MONZÓN, 2021).

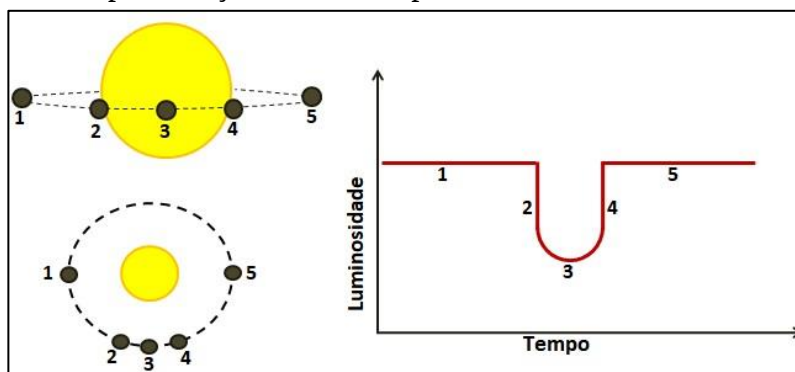
4.2.1 Trânsito Planetário

O trânsito planetário ocorre quando um planeta (ou outro corpo massivo) cruza em frente a sua estrela hospedeira e a linha de observação, provocando, assim a diminuição da luz que nos chega da estrela. Um trânsito ocorre em três etapas: o ingresso, quando o exoplaneta começa a adentrar no brilho da estrela; o trânsito efetivamente, que ocorre quando todo o exoplaneta está em frente a estrela; e o egresso que é quando o exoplaneta está evadindo-se da frente da estrela (LENCHUCK et al, 2021).

O método do trânsito planetário se fundamenta basicamente na análise das sombras que são provocadas em estrelas devido à passagem de um planeta entre o astro e o observador (NASA, 2022; PERRYMAN, 2000). Somos capazes de perceber este fenômeno ocorrendo porque há uma variação periódica na luminosidade da estrela que pode ser verificada analisando-se a sua curva luminosa (que relaciona o brilho da estrela em função do tempo) produzida a partir da observação, semelhante ao que é apresentado na Figura 3 (NASA, 2022; PERRYMAN, 2000). Na Figura 3 podemos ver a representação de um trânsito planetário em suas diferentes etapas e a respectiva curva de luz resultante. Nos momentos 1 e 5 não há trânsito, desse modo, a luminosidade da estrela é máxima; já nos momentos 2 e 4 há o início e fim, respectivamente, da passagem em frente a estrela, então ocorre uma diminuição gradativa da luminosidade recebida. Na etapa 3, o planeta está “eclipsando” a estrela, então é o momento em que ocorrerá a menor luminosidade que é percebido pela queda na curva do gráfico.

⁴ Existem ainda outras técnicas (mas que não abordaremos neste trabalho) que podem ser utilizadas para a prospecção e identificação de exoplanetas, como por exemplo, o brilho orbital, a modulação, a cinemática de disco, polarimetria (com aplicações bastante limitadas) e a variação no tempo de trânsito planetário.

Figura 3 – Representação do trânsito planetário e da curva de luz resultante.

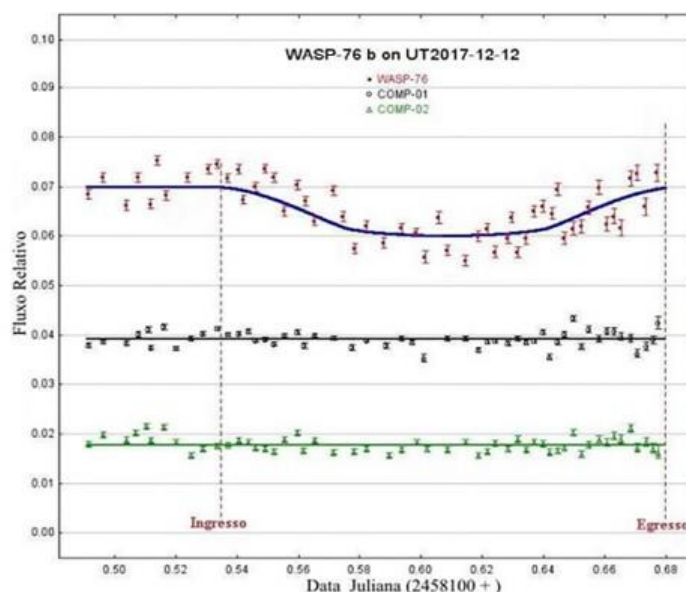


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando Júpiter transita em frente ao Sol, por exemplo, ocorre uma diminuição de 1% na luminosidade que é recebida da estrela, enquanto que no caso da Terra a redução é de aproximadamente 0,01% apenas (SOTO, 2020). Desse modo, “a diminuição da intensidade da luz da estrela é proporcional à razão entre as áreas do planeta e da estrela e se repete periodicamente de acordo com o período orbital” (VÁLIO, 2009, p. 31), mas para que um corpo seja realmente confirmado como exoplaneta, são necessárias pelo menos três medições de trânsito que resultem em valores próximos e sejam separadas por um mesmo período de tempo (LENCHUCK et al, 2021).

A curva de luminosidade é a relação entre o brilho recebido da estrela e o tempo, portanto, quando o planeta inicia seu processo de trânsito, a luminosidade da estrela cai e depois que o planeta deixa de eclipsar a estrela, a curva de luz volta a indicar os parâmetros normais (NASA, 2022; PERRYMAN, 2000). O gráfico da Figura 4 apresenta a variação da luminosidade da estrela WASP-76 ao longo do trânsito de um exoplaneta. Como se pode observar na curva azul, no momento em que o planeta ingressa no trânsito, ocorre uma diminuição no fluxo relativo que é recebido da estrela, enquanto que após o egresso do planeta, o fluxo retorna ao seu padrão. As curvas preta e verde do gráfico da Figura 4 são estrelas que não possuem exoplanetas em sua órbita, portanto, não sofrem diminuições em seu brilho.

Figura 4 – Gráfico relacionando a variação da luminosidade da estrela WASP-76 em função dos diferentes períodos do trânsito planetário.



Fonte: SILVA; ROBERTO JUNIOR; ALVES, 2020.

A técnica de trânsito é capaz de identificar planetas com massas inferiores a de Júpiter, cometas e satélites extrassolares. A partir da duração do trânsito e da diminuição do brilho da estrela podemos conhecer as características do planeta que orbita a estrela. Quanto maior o tempo de trânsito, mais distante o planeta está de sua estrela (PERRYMAN, 2000; NASA, 2022). Além disso, a partir deste método é possível obter-se informações acerca do raio, massa, inclinação e semieixo da órbita, temperatura e composição atmosférica do exoplaneta estudado (MONZÓN, 2021). Quando a luz da estrela passa pela atmosfera do planeta (durante o trânsito), esta pode ter o seu espectro eletromagnético registrado e a partir deste é possível determinar quais os elementos e compostos químicos que estão presentes na atmosfera planetária, como o metano, vapor de água, sódio, hidrogênio, oxigênio e carbono ionizado, por exemplo (VÁLIO, 2019; NASA, 2022).

As principais vantagens da técnica estão relacionadas a sua simplicidade, confiabilidade e baixo custo. Quando utilizada em conjunto com a velocidade radial é possível determinar-se a densidade média do planeta, além de permitir a observação simultânea de diversas fontes, isto é, diferentes sistemas. Contudo, existem também algumas limitações relacionadas ao método de trânsito, pois o sistema planetário observado precisa estar posicionado aproximadamente a 90° em relação ao plano do observador, o que nem sempre é possível. Além disso, nas detecções, precisamos supor que a estrela brilha

uniformemente e que a forma dos corpos celestes é esférica. O planeta precisa ser observado por um tempo mínimo para que se determine o período mínimo detectável do trânsito. Por fim, para confirmar a existência de um planeta extrassolar, é necessário, na maioria das vezes, combinar esta técnica com a de velocidade radial para estimar-se a massa do corpo celeste (SOTO, 2020; PERRYMAN, 2000; NASA, 2022; VÁLIO, 2009). Ainda assim, o trânsito planetário é o método de detecção com maior sucesso, visto que de acordo com a NASA (2022) o total de exoplanetas descobertos por meio desta técnica é de 3725 (dos confirmados).

A detecção do primeiro exoplaneta a partir do método de trânsito foi anunciada no ano de 1999 e consiste em um gigante gasoso de $0,7 M_{\text{Júpiter}}$ orbitando a estrela HD 209458 a 0,045 UA de distância com um período orbital de 3,5 dias. A passagem deste planeta em frente a sua estrela dura aproximadamente 2,5 horas e provoca uma diminuição de 1,8% na luminosidade da estrela (VÁLIO, 2009; PERRYMAN, 2000).

Durante a missão Kepler da NASA, que ocorreu de 2009 a 2013, foram coletados dados e imagens dos planetas tanto na faixa visível quanto no infravermelho a fim de possibilitar estudos espectroscópicos. Além disso, o emprego do trânsito planetário como técnica na prospecção de planetas extrassolares nesta missão permitiu detecção de milhares de candidatos, além de fornecer informações a respeito de como estes planetas estão distribuídos em nossa galáxia (NASA, 2022; VÁLIO, 2009).

4.2.2 Perturbação dinâmica da estrela

A existência de um planeta (ou outro corpo massivo) em torno de uma estrela provoca uma alteração de seu movimento em torno do baricentro, isto é, gera uma espécie de oscilação ou bamboleio da estrela devido às forças gravitacionais que os corpos exercem mutuamente (NASA, 2022; PERRYMAN, 2000). Em decorrência deste fenômeno, ocorrem três consequências diretas que podem ser utilizadas para estudar o sistema estrela/planeta, são elas: a alteração na velocidade radial da estrela, a alteração da posição angular da estrela e a modificação do período de chegada de um sinal luminoso de acordo com um referencial (PERRYMAN, 2000; VÁLIO, 2009). A seguir, apresentamos as técnicas de detecção baseadas nos eventos de perturbações dinâmicas de uma estrela.

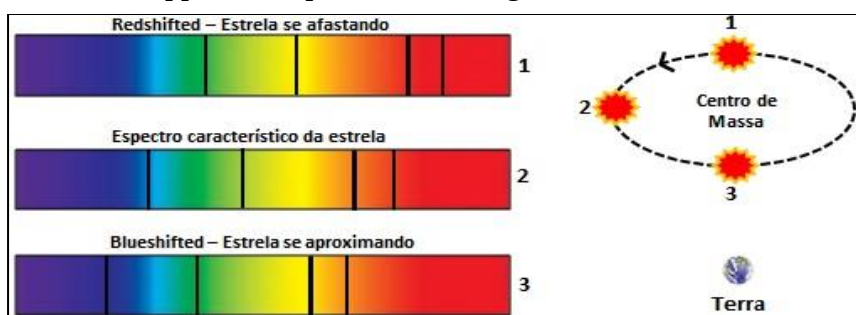
4.2.2.1 Velocidade Radial

O método da velocidade radial consiste na observação e medição da variação da velocidade de uma estrela, resultante de sua oscilação ocasionada pela presença de um corpo massivo nas vizinhanças deste astro. A amplitude da velocidade radial está diretamente

relacionada ao tamanho/massa da estrela, ao tamanho/massa do planeta e também ao período e excentricidade da órbita do exoplaneta (PERRYMAN, 2000; VÁLIO, 2009).

A oscilação de uma estrela é percebida na Terra devido às variações que ocorrem em sua cor em decorrência do efeito Doppler (deslocamento das linhas espectrais da estrela), e isto pode ser observado também em seu espectro eletromagnético característico (LENCHUK et al, 2021). Quando a estrela se aproxima da Terra, as ondas luminosas tem seu comprimento de onda diminuído (“amontoam-se”) e quando ela se afasta, as ondas luminosas tem seu comprimento de onda aumentado. Essa variação na configuração das ondas é constatada a partir da leitura do espectro da estrela, que possuirá um desvio para o azul (blushift) das linhas espectrais quando a estrela estiver se aproximando da Terra, e quando a estrela estiver se afastando, as linhas espectrais estarão com um desvio para o vermelho (redshift) (NASA, 2022), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Efeito Doppler no espectro eletromagnético de uma estrela em oscilação.

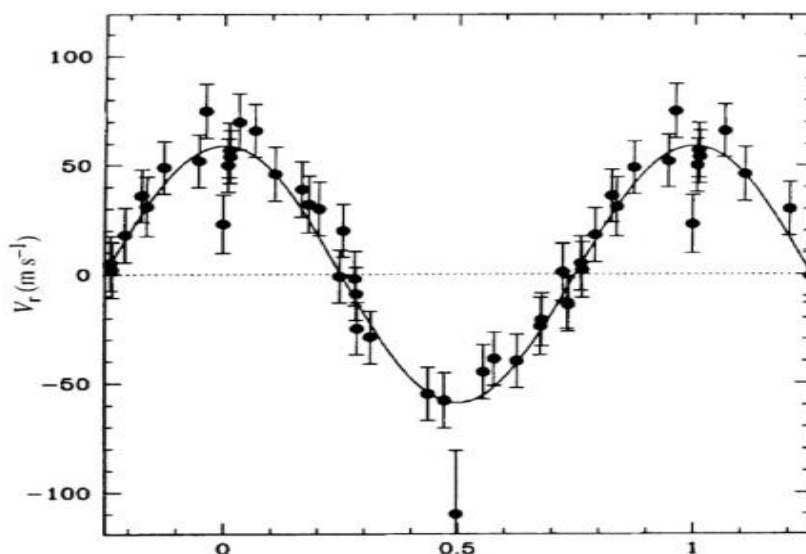


Fonte: Elaborado pelo autor.

O método da velocidade radial foi uma das primeiras técnicas a ser empregada na busca e detecção de planetas fora do nosso sistema solar e até hoje ainda é uma das metodologias de maior sucesso, pois de acordo com a NASA (2022), o total de exoplanetas descobertos empregando-se esta análise já é de 908 (confirmados). Geralmente, a velocidade radial é utilizada com êxito em estrelas que estão a distâncias de até 160 anos-luz da Terra e também como recurso de apoio para a confirmação de uma detecção que foi realizada a partir de outro método (AMORIM; SANTOS, 2017).

Os sinais recebidos da estrela que está sofrendo o bamboleio podem ser traduzidos na forma de um gráfico semelhante ao da Figura 6 que relaciona a velocidade do astro e o tempo. Neste caso, a figura relaciona a alteração da velocidade radial da estrela 51 Pegasi devido a presença do exoplaneta 51Peg b com o tempo e, como é possível observar, a curva resultante apresenta um comportamento senoidal típico.

Figura 6 – Curva de velocidade radial da estrela 51 Peg devido a presença do exoplaneta 51Peg b.



Fonte: MONZÓN, 2021 apud MAYOR; QUELOZ, 1995.

A técnica baseada na velocidade de bamboleio da estrela detecta, sobretudo, gigantes gasosos orbitando a 0,39 UA (unidades astronômicas) de sua estrela, ou seja, planetas que estão muito próximos à sua estrela hospedeira. Planetas com massas inferiores à de Júpiter ($9,5 \times 10^{-4} M_{\odot}$) dificilmente são identificados pelo método da velocidade radial, uma vez que provocam uma oscilação muito pequena em sua estrela mãe (VÁLIO, 2009; PERRYMAN, 2000). O primeiro sistema planetário identificado a partir deste método é o Andromedae no qual a estrela possui uma periodicidade de 4,6 dias em sua velocidade radial causada por um gigante gasoso localizado a 0,059 UA. Pouco tempo depois, outros dois planetas, também gigantes semelhantes a Júpiter, foram identificados orbitando a mesma estrela, mas provocando, dessa vez, períodos de oscilação de 241 e 1275 dias na velocidade da estrela (VÁLIO, 2009).

No entanto, esta técnica possui também, algumas limitações, uma vez que a partir dela é possível determina-se apenas a massa mínima do exoplaneta, já que não sabemos a inclinação deste em relação à Terra. A velocidade de rotação da estrela e seu próprio comportamento podem também prejudicar as leituras e possíveis detecções de novos exoplanetas, podendo, inclusive ofuscar a presença de um corpo ou mesmo reproduzir a falsa existência de um planeta (SOTO, 2020).

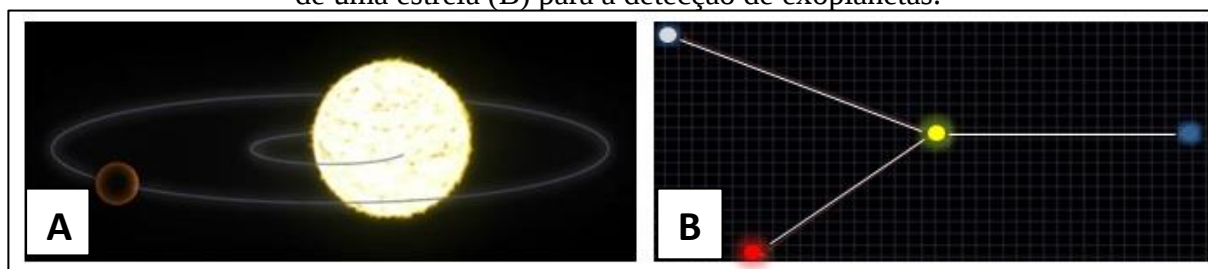
Os primeiros equipamentos capazes de medir a velocidade radial de estrelas a fim de identificar exoplanetas foram o espectrômetro HIRES no Hawái e o HARPS no Chile, ambos

com a capacidade de medir velocidades da ordem de 1m/s (MONZÓN, 2021). Os maiores exemplos que utilizam o método da velocidade radial como principal técnica de busca de exoplanetas atualmente em Terra é o telescópio Keck localizado no Hawaí e o observatório de La Silla no Chile (NASA, 2022).

4.2.2.2 Astrometria

A astrometria consiste na detecção de exoplanetas a partir da medição da posição de estrelas que sofrem pequenas modificações quando existe algum corpo massivo em sua vizinhança. Como mencionado na técnica de velocidade radial, a existência de um planeta orbitando uma estrela provoca leves oscilações elípticas ou sinusoidais em seu movimento em torno do baricentro planeta/estrela, conforme é representado na Figura 7A. A órbita da estrela tem o ângulo de seu semieixo maior determinado pela relação entre as massas da estrela e do planeta, pela distância entre o planeta e sua estrela e também pela distância do sistema até a Terra (PERRYMAN, 2000).

Figura 7- Simulação da oscilação de uma estrela (A) e da medição astrométrica da posição de uma estrela (B) para a detecção de exoplanetas.



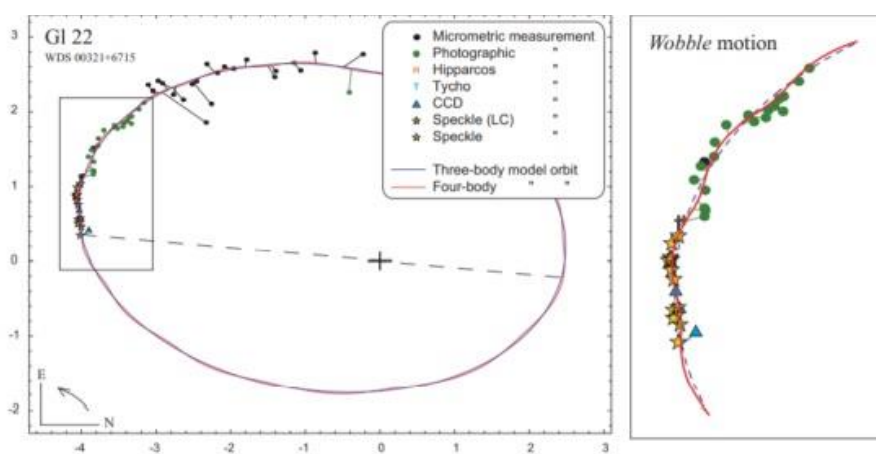
Fonte: Adaptado de NASA (2022).

A astrometria observa, então, as modificações de posição da estrela utilizando outras estrelas fixas como referência, conforme representado na Figura 7B. Neste caso, a estrela amarela central tem sua localização medida em relação a outras três estrelas que não sofrem oscilações. Quando o planeta é pouco massivo (do tamanho da Terra, por exemplo), o efeito provocado pela sua gravidade no movimento da estrela é ínfimo, nesse caso, a astrometria não é a técnica mais adequada para a detecção, já que a oscilação da estrela pode ser tão pequena que não é nem percebida (NASA, 2022; MONZÓN, 2021).

Para constatar-se a variação da posição da estrela decorrente de seu bamboleio, são registradas diversas imagens da mesma juntamente com um referencial, a fim de realizarem-se as comparações necessárias e assim determinar-se a existência ou não de um planeta extrassolar. Desse modo, é comum que os sistemas estudados por meio deste método sejam

de estrelas binárias (MONZÓN, 2021), pois enquanto uma oscila, a outra serve como referencial. A Figura 8 apresenta a representação da trajetória desenvolvida pela estrela Gliese B em volta do centro de massa de Gliese Aa-Ab (sistema de estrelas binárias). A área destacada e ampliada na órbita da estrela é uma região onde o astro sofre uma espécie de bamboleio e, portanto, tem alterações em sua posição. Sabe-se, atualmente, que a alteração no movimento de Gliese B é provocada pela presença de um exoplaneta.

Figura 8 – Órbita da estrela Gliese B em torno do centro de massa de Gliese Aa-Ab.



Fonte: MONZÓN, 2021 apud DOCOBO et al, 2008.

A astrometria é uma técnica que obtém resultados bastante precisos para exoplanetas que possuem um período orbital igual ou superior a um ano, sendo que na maioria das vezes, este método é utilizado como ferramenta adicional ao método da velocidade radial, a fim de obterem-se mais informações sobre o sistema estudado. Para estrelas muito quentes e de rotação acelerada, este método obtém melhores resultados em relação ao da velocidade radial (PERRYMAN, 2000). No entanto, para a implantação desta técnica são necessários equipamentos ópticos de elevada precisão que sejam capazes de realizar registros das posições do sistema que está sendo estudado em relação a outros referenciais em diferentes épocas (MONZÓN, 2021). Além disso, diversos fatores podem dificultar e interferir nas medições angulares a partir da Terra, como as distorções e os desvios de luz provocados pela atmosfera terrestre, por exemplo. Diante disso, a astrometria obtém resultados mais precisos quando é realizada a partir do espaço (NASA, 2022; PERRYMAN, 2000).

4.2.2.3 Tempo de Pulsar

O método de detecção de exoplanetas a partir do tempo de pulsar se fundamenta na observação e medição do pulso de luminosidade de uma estrela do tipo pulsar – estrelas de

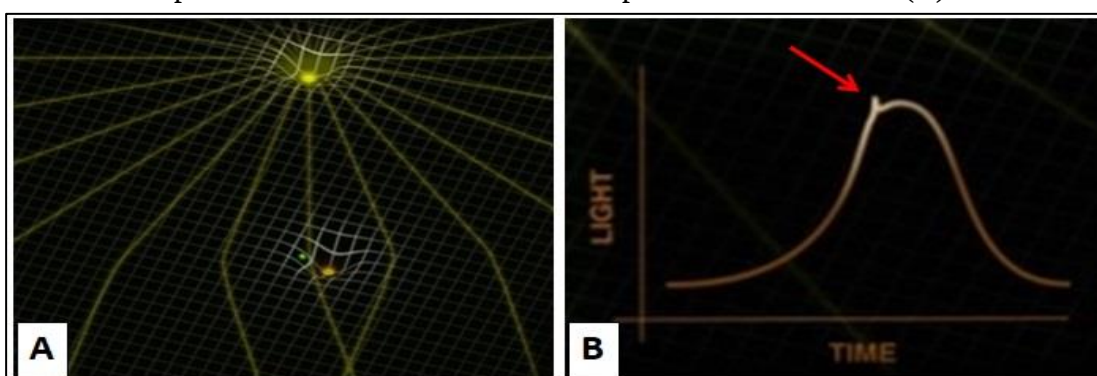
nêutrons (que sofre variação de magnitude). Quando existe um planeta orbitando um pulsar, o período dos pulsos pode sofrer interferências que podem ser utilizadas para determinar a existência de um planeta ou não em seu entorno (SOTO, 2020). Este é um método bastante preciso e de grande alcance que permite, inclusive, a detecção de planetas pouco massivos semelhantes à Terra. Apesar de o primeiro planeta descoberto a partir deste método ter sido anunciado em 1992, só foi confirmado muitos anos depois (PERRYMAN, 2000).

4.2.3 Microlentes Gravitacionais

O método de detecção de exoplanetas que utiliza as microlentes gravitacionais como forma de identificação consiste basicamente na leitura da luz de uma estrela de fundo que é desviada por uma lente gravitacional. A luz emitida pela estrela de fundo é ampliada e focada quando passa por uma lente, que por sua vez é formada por um objeto intermediário. A lente é formada por um ou mais corpos massivos que viajam pelas vizinhanças da estrela de fundo, isto é, pela ação da gravidade de um planeta (ou mesmo um planeta orbitando outra estrela) a luz de fundo é desviada e o brilho total do sistema que serve como lente aumenta momentaneamente (NASA, 2022; MONZÓN, 2021; SOTO, 2020; VÁLIO, 2009; PERRYMAN, 2000). O fenômeno do desvio da luz foi teorizado e previsto por Einstein na Teoria da Relatividade Geral (MONZÓN, 2021).

De acordo com Albert Einstein, a gravidade é resultado de distorção no tecido espaço-tempo e é, justamente devido a esta característica, que as microlentes se formam (NASA, 2022; MONZÓN, 2021). É a partir da distorção do tecido espaço-tempo, que o planeta/estrela provoca o desvio da luz da estrela de fundo e este fenômeno pode ser observado na Figura 9A. Já na figura 9B, constata-se que existe um pico na curva de luminosidade em função do tempo que é decorrente da ampliação da luz da estrela de fundo pela ação da microlente gravitacional. Logo após o pico, o brilho da estrela de fundo desaparece permanecendo apenas o brilho da estrela do sistema planetário principal.

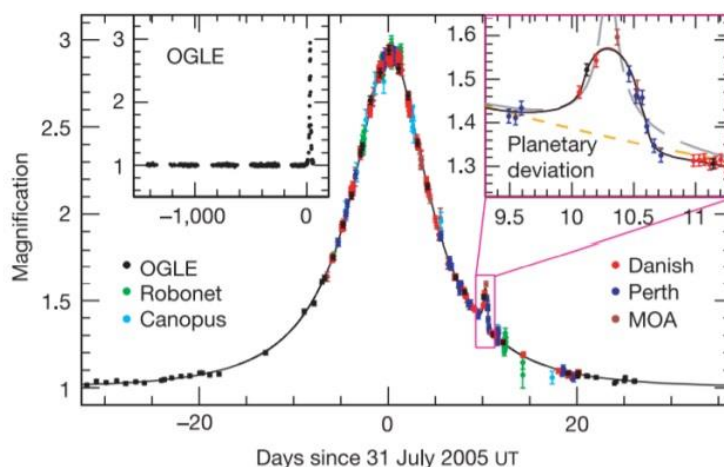
Figura 9 – Representação da formação de uma microlente gravitacional (A) e a respectiva curva de luz indicando um pico de luminosidade (B).



FONTE: Adaptado de NASA (2022).

Um caso prático da curva representada na figura 9B pode ser verificado na Figura 10, a qual apresenta um gráfico de magnitude em função do tempo para a estrela fonte OGLE-2005-BLG-390. O pico de magnitude que ocorre por volta do dia dez no gráfico, é o resultado da microlente gravitacional, pois é neste momento que a luz da estrela de fundo foi ampliada e por isso, durante um pequeno período ocorre um aumento na magnitude total, que logo em seguida volta a diminuir até que o brilho da estrela de fundo suma totalmente.

Figura 10 – Gráfico da magnitude da estrela OGLE-2005-BLG-390 em função do tempo para uma microlente gravitacional.



Fonte: MONZÓN, 2021 apud BEAULIEU et al, 2006.

Para que uma microlente gravitacional seja formada, e um exoplaneta seja detectado, é necessário que o planeta passe entre a estrela de fundo e a linha de visão do observador, o que por si só já é raríssimo. Além disso, não é possível prever quando uma lente deste tipo irá se formar, pois após um fenômeno deste ocorrer, a observação não poderá ser reproduzida novamente, pois uma microlente deste tipo não se formará novamente dentro de um tempo plausível para a humanidade. Como consequência, o número de sistemas que pode ser identificado pelo uso desse método é bastante reduzido (NASA, 2022; MONZÓN, 2021; VÁLIO, 2009; PERRYMAN, 2000).

A primeira descoberta utilizando as microlentes foi revelada no ano de 1998 e foi responsável por identificar um planeta pouco massivo orbitando uma estrela que está localizada no centro de nossa galáxia, isto é, a cerca de 30000 anos-luz de distância da Terra (PERRYMAN, 2000). A principal vantagem das microlentes gravitacionais, é que a detecção não sofre interferências das atividades estelares e a partir de seu uso é possível detectar-se planetas muito distantes (inclusive fora da Via Láctea) e pouco massivos, de até $0,1 M_{\text{Terra}}$ (LENCHUCK et al, 2021). Além disso, esta é a única técnica que não necessita de fótons

provenientes da estrela hospedeira para localizar um planeta, pois o que é medido é o efeito gravitacional (MONZÓN, 2021; PERRYMAN, 2000; VÁLIO, 2009).

Diante disso, é comum que os exoplanetas identificados por meio desta técnica sejam do tipo Rogue, isto é, aqueles que não orbitam nenhuma estrela, sendo que esta é uma das poucas técnicas capaz de detectar este tipo de planeta (NASA, 2022). De acordo com a NASA, até janeiro de 2022 foram identificados apenas nove planetas extrassolares utilizando-se esta técnica como ferramenta de busca.

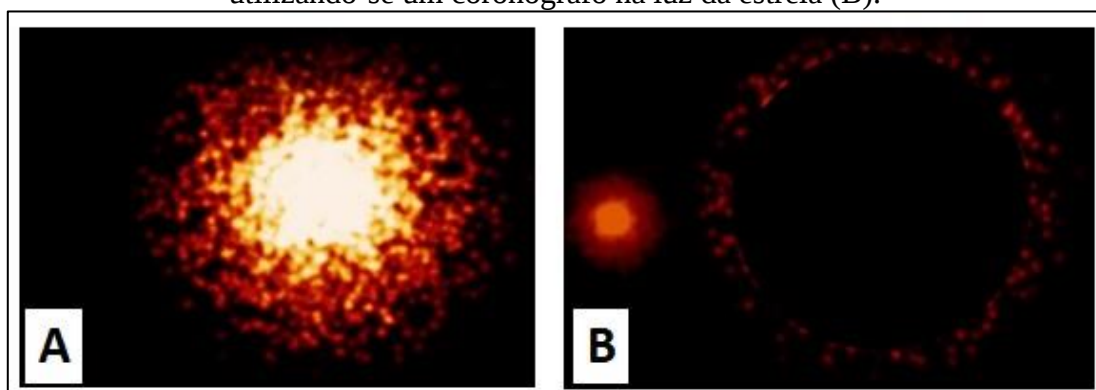
4.2.4 Imagem Direta

O método da imagem direta consiste na detecção direta da luz de um planeta a partir de fotografias. O registro fotográfico de exoplanetas, no entanto, pode ser bastante desafiador, uma vez que as estrelas em que estes orbitam, na maioria das vezes, são milhões de vezes mais brilhantes que o planeta, dificultando, assim, a observação de outros corpos (MONZÓN, 2021). O planeta reflete a luz de sua estrela hospedeira e por isso, é possível a sua observação. O brilho refletido depende diretamente do tamanho do planeta, de sua proximidade da estrela, da luminosidade da estrela e das propriedades atmosféricas do planeta (PERRYMAN, 2000; NASA, 2022). Para bloquear o brilho excessivo da estrela e permitir a observação do exoplaneta, os astrônomos empregam alguns recursos e técnicas como a máscara coronógrafa e o starshade, por exemplo.

A coronografia é uma técnica que acopla um coronógrafo⁵ no telescópio (espacial ou terrestre) utilizado para a observação, de modo que a luz da estrela seja reduzida consideravelmente e não chegue até os detectores do equipamento, permitindo, assim, que o planeta se revele e seja identificado a partir de seu brilho (NASA, 2022; PERRYMAN, 2000). A Figura 11 apresenta uma simulação do uso de uma máscara coronógrafa sobre a estrela hospedeira, de modo que a luz refletida pelo exoplaneta se destaque e seja registrada por imagem direta.

⁵ O coronógrafo é um anteparo posicionado em frente a lente de um telescópio de modo que a luz intensa da estrela que está sendo observada seja bloqueada permitindo a investigação de corpos menos brilhantes que orbitam o astro.

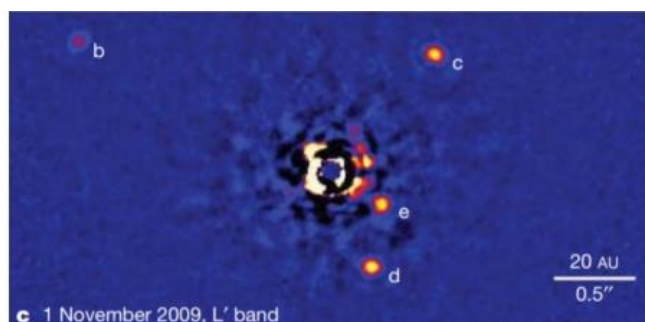
Figura 11 – Imagem direta de uma estrela (A) e imagem direta de um exoplaneta utilizando-se um coronógrafo na luz da estrela (B).



Fonte: Adaptado de NASA (2022).

Outro método que pode ser utilizado para cobrir a luz da estrela é denominado starshade, que consiste em posicionar-se um objeto estrategicamente em frente à luz da estrela. Contudo, diferente do coronógrafo, o objeto bloqueador não é um dispositivo acoplado ao telescópio, mas sim qualquer corpo (um asteroide, por exemplo) capaz de provocar a diminuição do brilho visível da estrela (NASA, 2022). Uma alternativa para a obtenção de mais informações acerca dos planetas extra-solares a partir da imagem direta é o uso do comprimento de luz do infravermelho ao invés do visível (PERRYMAN, 2000) na coleta e registro de dados. Na Figura 12 podemos observar um sistema planetário em torno da estrela HR 8799 que foi registrado por imagem direta. Os pontos identificados com as letras “b”, “c”, “d” e “e” são os planetas descobertos, dispostos na ordem alfabética de detecção.

Figura 12 – Imagem direta do sistema planetário em torno da estrela HR 8799.



Fonte: MONZÓN, 2021 apud MAROIS et al, 2010.

Os telescópios e a própria atmosfera da Terra podem interferir nas observações dos astros, por isso, são necessários equipamentos ópticos específicos de grande precisão, resolução e estabilidade para os registros de imagens planetárias (PERRYMAN, 2000; SOTO, 2020). Atualmente, as imagens diretas podem ser utilizadas para obterem-se informações sobre o semieixo da órbita, a massa e raio do planeta. Além disso, a temperatura do

exoplaneta pode ser estimada a partir de modelos de esfriamento, que também fornecem informações acerca da idade da estrela e do exoplaneta (MONZÓN, 2021). Como é de se supor, esta não é a melhor técnica de detecção para planetas muito distantes e sistemas estelares antigos. Se a estrela é nova, por consequência, se houver algum planeta orbitando-a, este também será novo e, portanto, estará bastante quente, facilitando a sua observação a partir do infravermelho (VÁLIO, 2009). No entanto, apesar de ser uma técnica bastante precoce e em desenvolvimento, o imageamento de exoplanetas poderá ser utilizado futuramente para a caracterização dos planetas a partir da identificação de oceanos, atmosfera e massas terrestres (NASA, 2022), oferecendo, assim, novas possibilidades para o estudo do cosmos.

Apesar disso, até janeiro de 2022, foram detectados 13 planetas a partir de fotografias diretas (NASA, 2022), sendo que em 2004 foi detectado o primeiro planeta (com massa de $25 M_{\text{Júpiter}}$ e distância de 55 UA) orbitando uma anã marrom com uma idade aproximada de oito milhões de anos, chamada 2M 107. Ainda no mesmo ano, foi fotografada a estrela GQLupi com apenas 2 milhões de anos juntamente ao seu exoplaneta, localizado a uma distância de 100 UA de sua hospedeira (VÁLIO, 2009). De modo geral, a maioria dos planetas que são detectados por imagem direta possui uma superfície muito quente, em torno de 2000 K a 10000 K, pois são muito novos (MONZÓN, 2021).

4.2.5 Habitabilidade

Para que um planeta seja considerado como potencialmente habitável, este deve atender a alguns requisitos e o principal (mais não único) deles é possuir água líquida em sua superfície, isto é, uma hidrosfera para que as reações químicas e a sustentabilidade sejam possíveis no ambiente (PERRYMAN, 2000; MONZÓN, 2021). A exploração espacial é o método mais adequado para a busca de vida em outros astros, entretanto, com a tecnologia atual, a realização de missões deste tipo para o estudo de exoplanetas e exosatelites ainda é inviável, uma vez que as distâncias entre os sistemas estelares impossibilitam a exploração humana além (e até mesmo dentro) do sistema solar em que vivemos. Desse modo, utilizamos técnicas indiretas para avaliar as condições e características dos corpos celestes observados.

Monzón (2021) define a habitabilidade como a capacidade que um planeta ou astro tem de abrigar vida. Esta capacidade está diretamente relacionada com a presença de água líquida, visto que esta é o solvente universal e o catalisador perfeito de reações químicas. Contudo, existem outros solventes que também poderiam indicar condições de habitabilidade,

como o amônio, metano e etano, por exemplo. Para determinar se um astro possui ou não água líquida, é necessário que tenhamos diversas informações físicas e dinâmicas sobre ele, como a temperatura, massa, raio, campo magnético, período orbital, período de rotação, excentricidade, forças de maré e também características temporais (visto que a vida pode ser pontual ou contínua). De modo geral, há uma distância adequada em que o planeta deve estar em relação a sua estrela para que este possa ter água em sua superfície. Esta distância delimita uma região que é chamada de zona de habitabilidade (MONZÓN, 2021).

A zona de habitabilidade de uma estrela é definida como a região onde a água na forma líquida pode existir na superfície de um planeta. Essa região é controlada pela distância de separação entre a estrela e o planeta, mas também é afetada pela rotação do planeta e a convecção da sua atmosfera (VÁLIO, 2009, p. 32).

Desse modo, o tamanho da zona de habitabilidade está diretamente relacionado ao tamanho, tipo e idade da estrela, pois quanto mais velha, maior sua luminosidade e fluxo de energia, portanto, mais distante da estrela esta zona se inicia. Esta região não poderá receber um fluxo de energia nem muito intenso e nem muito baixo para que a vida possa existir (MONZÓN, 2021; VÁLIO, 2009). O limite exterior é aquele onde começa a ocorrer a condensação de CO₂ e as glaciações. Já o limite interior inicia no local onde ocorre a perda de água para o espaço e é marcado pela existência de um efeito estufa fora de controle (VÁLIO, 2009). Para o Sol esta zona habitável encontra-se entre 0,7 e 1,5 UA e a Terra, obviamente, está inserida nesta delimitação.

Já de acordo com Monzón (2021) para definir-se a zona interna de habitabilidade, pode-se seguir três critérios, cada um com características específicas: a estufa úmida, a estufa fugitiva e o tipo Vênus recente. A estufa úmida ocorre quando o planeta perde vapor de água para o espaço por fotodissociação. A estufa fugitiva, por sua vez, ocorre quando a água de todos os oceanos evapora. E o tipo Vênus recente considera que este planeta solar já teve água líquida em sua superfície em algum momento. Dentre três delimitações possíveis para o limite interno de habitabilidade, o último critério é o mais “otimista”, pois sabemos que Vênus não é habitável (para humanos), pelo menos atualmente, por uma série de fatores, sendo que a inexistência e água líquida é apenas um deles.

O mesmo autor admite outros dois critérios possíveis para determinar a zona externa de habitabilidade de uma estrela: estufa máxima e Marte recente. A estufa máxima é determinada na localidade em que o efeito estufa decorrente de CO₂ ainda é capaz de manter uma temperatura de 0°C na superfície planetária. O tipo Marte recente se baseia na possibilidade de este planeta já ter possuído água líquida em sua superfície. Das duas

categorias, a última é a mais otimista, pois Marte não possui vida. Portanto, de acordo com a classificação de Monzón (2021), o planeta Terra está perfeitamente acomodado na Zona Habitável do Sol, isto é, entre Vênus e Marte.

Além de localizar-se dentro da região habitável, o exoplaneta deve possuir em sua atmosfera gás nitrogênio (N_2), vapor de água e dióxido de carbono (CO_2) e ter também um campo magnético como características fundamentais para o desenvolvimento de vida. O campo magnético protege a superfície do planeta das partículas altamente energéticas oriundas do espaço, causadas pelo vento solar, por raios cósmicos ou ejeções estelares, por exemplo. A ação destas partículas pode provocar a destruição e posterior desaparecimento da atmosfera do planeta quando este não possui um campo magnético protegendo-o (MONZÓN, 2021).

4.3 A BUSCA DE EXOPLANETAS COM TELESCÓPIOS ESPACIAIS

A primeira missão observacional espacial de grandes proporções foi o lançamento do telescópio Hubble no ano de 1990 pela Agência Espacial Americana. O conjunto de instrumentos acoplados à nave foi enviado para ocupar uma órbita acima da atmosfera terrestre, onde não ocorrem distorções e absorções decorrentes dos gases, evitando-se assim, que ocorram interferências nos dados coletados. O observatório Hubble foi projetado para receber visitas periódicas de reparo e atualização, sendo que a primeira delas foi realizada já no ano de 1993 devido a uma imperfeição existente no espelho primário da sonda. No total, foram realizadas quatro missões de restauração, compreendidas entre 1993 e 2009, nas quais os astronautas promoveram reformas e também melhorias a partir da adição de aparelhos tecnológicos emergentes no telescópio (NASA HUBBLESITE, 2022).

Hubble é um telescópio refletor Cassegrain com um espelho primário de 2,4 metros de diâmetro e um secundário de 0,3 metros de diâmetro, que realiza observações na faixa de comprimento de ondas do visível, do infravermelho próximo e também do ultravioleta. Operado a partir de comandos do solo terrestre, a sonda espacial foi planejada e lançada com os seguintes objetivos: investigar a composição, as características físicas e dinâmicas dos corpos celestes; determinar a natureza dos processos que ocorrem nas estrelas e em outros objetos da galáxia; estudar a história e evolução do universo; confirmar a universalidade das leis da Física; e promover a instalação de uma pesquisa espacial de longa duração para a Astronomia óptica. Percebendo a potencialidade do equipamento, vários outros projetos foram adicionados à pauta de observações, o que levou, entre outras descobertas, a primeira

observação direta da atmosfera de um exoplaneta no ano de 2001 (NASA HUBBLESITE, 2022).

O telescópio espacial Hubble ajudou a revelar, a partir de suas observações, que a idade aproximada do universo é de 13,8 bilhões de anos e que existe uma energia escura no espaço que é responsável pela expansão acelerada do universo. O Hubble também observou galáxias e sistemas estelares em diferentes fases evolutivas, ajudando-nos a entender como pode ter ocorrido a formação da Via Láctea e do sistema solar. Apesar de ter contribuído para inúmeros estudos espaciais, o projeto Hubble continua sendo fonte de diversas descobertas, sendo que a mais recente delas foi a detecção de planetas inchados que, gradativamente, perdem sua atmosfera e tornam-se super-terras (NASA HUBBLESITE, 2022).

O telescópio Hubble faz parte do Programa de Grandes Observatórios (PGO) da NASA composto por quatro aparatos de sondagem espacial, cada um com a capacidade de realizar registros em comprimentos de ondas diferentes. Além do Telescópio Espacial Hubble (HST), fazem parte deste programa o Observatório de Raios Gama Compton (CGRO), o Observatório de Raios-X Chandra (CXO) e o Telescópio Espacial Spitzer (TES). A missão Spitzer, lançada em 2003, foi a última missão do programa colocada em órbita.

O telescópio espacial Spitzer é um observatório de infravermelho refrigerado criogenicamente e foi proposto com o objetivo de sondar regiões do espaço com clareza, nitidez e precisão, as quais são ocultas aos telescópios ópticos. O Spitzer foi projetado para operar por pelo menos 2,5 anos, mas coletou informações por 5,5 anos na fase fria, e depois trabalhou sem combustível refrigerante até o ano de 2020. Durante o período de atividade, o telescópio Spitzer permitiu que os astrônomos observassem tanto corpos quentes como estrelas, quanto astros mais frios como as anãs marrons e os exoplanetas (CALTECH, 2022).

O MOST –Microvariability an Oscillations Of Stars também foi lançado em 2003, mas pela Agência Espacial Canadiana (CSA) com o objetivo de coletar informações para determinar a idade do universo e também utilizar as curvas de luz detectadas para buscar por exoplanetas. Após reunir inúmeros dados, este telescópio deixou de operar em 2019 devido a uma falha ocorrida no sistema (SOTO, 2020).

A missão CoROT – Convection, internal ROTation and Transiting planets, por sua vez, foi lançada em 2006 pela Agência Espacial Francesa (CNES) em uma operação conjunta com a Espanha. O aparato experimental tinha como principal objetivo a coleta de informações sobre os movimentos de convecção interna e de rotação das estrelas além de registrar suas curvas de luz para a identificação de planetas a partir do método de trânsito. A CoROT começou a ser

planejada no ano de 1980 e fez parte de um programa chamado “Petit mission” que financiava projetos com pequenos orçamentos na França (BAGLIN et al, 2016; USP, 2022).

Entre os objetivos da missão CoRoT estavam o estudo da sismologia estelar e a busca de exoplanetas através do método de trânsito e para que as observações não sofressem interferências decorrentes de eclipses solares, o satélite percorria uma órbita polar. Com uma precisão fotométrica capaz de atingir uma resolução em frequências de 0,1mHz, o CoRoT era capaz de identificar planetas semelhantes à Terra e localizados dentro da Zona Habitável dos sistemas estelares. Depois de lançada, a sonda permaneceu em operação até 2012, quando parou de funcionar abruptamente. Cientistas e astrônomos realizaram esforços na tentativa de reativar o CoRoT, mas sem êxito, o que levou ao encerramento oficial da missão em 2013. Apesar disso, apenas em 2016 todas as curvas de luz acumuladas pelo satélite foram processadas e disponibilizadas para a comunidade científica (SOTO, 2020; MONZÓN, 2021; BAGLIN et al, 2016; USP, 2022).

O telescópio Kepler foi lançado em 2009 pela NASA e possuía elevada capacidade e precisão fotométrica para mapear cerca de 170000 estrelas em busca de exoplanetas do tipo Terra (ou menores) que estivessem localizados dentro da zona habitável de seus sistemas. A sonda espacial começou a ser planejada por seu idealizador, William Boruki, em 1983, mas após ter seu projeto negado pela NASA por quatro vezes, o satélite de Boruki só começou a ser construído em 2001 (NASA, 2022). O observatório era capaz de identificar uma variação de 0,0023 milésimos de magnitude no brilho de uma estrela para posteriormente determinar a presença de um trânsito planetário. O fotômetro do instrumento, por sua vez, era capaz de observar mais de 150.000 astros simultaneamente, os quais podiam estar localizados a distâncias entre 500 e 3000 anos-luz da Terra (FLÓRIO, 2014).

No ano de 2013 o telescópio Kepler teve falhas em seu equipamento de estabilidade e a primeira missão foi encerrada. Apesar disso, os cientistas encarregados pela missão iniciaram uma busca por uma forma alternativa de operar a sonda, já que esta estava com defeito em duas de suas quatro rodas de equilíbrio. Em junho de 2014 a missão foi reativada e rebatizada com o nome de Kepler 2 visto que os astrônomos descobriram uma forma de controlar o telescópio. Para que a segunda missão fosse possível, os cientistas passaram a utilizar uma técnica inovadora e muito criativa baseada no aproveitamento da pressão do vento solar para auxiliar na estabilização do apontamento do Kepler. Durante o segundo período observacional, o telescópio continuou a coleta de dados até que em 2018 seu combustível chegou ao fim e as operações foram encerradas definitivamente, totalizando 9

anos de informações acumuladas (SOTO, 2020; MONZÓN, 2021; AMORIM; SANTOS, 2017; FLÓRIO, 2014).

O TESS- Transiting Exoplanet Survey Satellite é um satélite que faz parte do programa “Astrophysics Explorer mission” da NASA e foi lançado em 2018 para substituir o então desativado telescópio Kepler. As primeiras discussões envolvendo a criação do TESS iniciaram em 2005 e 2006 quando o MIT (Massachusetts Institute of Technology) submeteu em conjunto com o SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory) uma proposta de missão para a NASA. Com um campo de visão mais amplo que Kepler, o telescópio espacial TESS tem o objetivo de mapear as vizinhanças de 200.000 estrelas semelhantes ao sol a fim de detectar quedas temporárias em seu brilho, identificando, assim, milhares de exoplanetas a partir do método de trânsito. Para isso, a sonda, que percorre uma órbita de 13,7 dias em torno da Terra está equipada com instrumentos de ponta, como espectroscópios que auxiliam na determinação da massa de um planeta e de sua composição atmosférica (SOTO, 2020; MONZÓN, 2021; RICKER et al, 2014).

Lançado dia 25 de dezembro de 2021, a partir da Guiana Francesa, o Telescópio Espacial James Webb (JWST) custou cerca de 10 bilhões de dolares e tem a função de substituir o aposentado telescópio Hubble. Para isso, o James Webb está equipado com um conjunto de instrumentos tecnológicos de alta precisão sem precedentes. O JWST é resultado da colaboração entre a NASA, a ESA (Agência Espacial Europeia) e CSA (Agência Espacial Canadiana) e teve a sua construção iniciada em 2004, sendo que ao longo dos anos o projeto passou por diversas prorrogações no prazo de entrega do protótipo final (MONZÓN, 2021; WEBB MEDIA KIT, 2021).

O espectroscópio do James Webb permitirá estudar as atmosferas dos exoplanetas e até mesmo identificar oceanos em suas superfícies, viabilizando, assim, avanços nos estudos envolvendo a habitabilidade desses astros. Além disso, este satélite poderá analisar planetas, estrelas, nebulosas e galáxias com grande precisão, podendo inclusive, observar as primeiras formações que ocorreram no universo, milhões de anos após a sua formação. Webb possui capacidade óptica excepcional e é capaz de realizar o registro de planetas extrassolares a partir da imagem direta e com suas observações no infravermelho pode espiar através do gás e da poeira existentes no espaço (MONZÓN, 2021; WEBB MEDIA KIT, 2021).

Diversos equipamentos e tecnologias, como espelhos ultraleves e resistentes à baixas temperaturas e grandes detectores de infravermelho de elevada sensibilidade foram inventados para que o projeto James Webb se tornasse viável, tornando o telescópio um dos

mais inovadores e avançados de todos os tempos. Uma das inovações é o espelho de observação da sonda, que teve que ser lançado dobrado (fato que ocorreu pela primeira vez na história) e assim que chegou em sua órbita no Lagrange 2⁶, após 1 mês do lançamento, iniciou o processo de abertura e centralização. O espelho possui 6,5 metros de diâmetro divididos em 18 peças hexagonais que permitirão a captura de imagens dos objetos celestes e o registro de espectros luminosos para a determinação de propriedades químicas e físicas da matéria cósmica (WEBB MEDIA KIT, 2021).

Uma pequena parte dos exoplanetas é observada de maneira direta, sendo que a sua maioria é detectada por efeitos secundários que provocam em suas estrelas, como a diminuição do brilho, por exemplo. O telescópio Webb realizará as observações dos trânsitos planetários em diferentes comprimentos de onda, o que possibilitará o estudo da temperatura superficial e da composição atmosférica do exoplaneta por meio de seu espectro eletromagnético. As moléculas de água, por exemplo, absorvem os comprimentos de onda do infravermelho, então planetas que possuem esta substância em grande quantidade criam a ilusão de serem maiores, uma vez que a atmosfera planetária irá bloquear a maior parte da luz recebida da estrela (COULOMBE, 2022).

Outras missões espaciais com objetivos relacionados à busca de exoplanetas estão em desenvolvimento no mundo todo e representam possibilidades infinitas para um futuro próspero da exploração espacial. Destacamos aqui a Missão Pandora que faz parte do novo programa da NASA, o “Astrophysics Pionners”, o qual tem como objetivo fomentar pequenas missões e de baixo custo que buscam desvendar os segredos do universo. Pandora tem seu lançamento previsto para o final de 2024 ou início de 2025 e terá como finalidade estudar pelo menos vinte estrelas e exoplanetas a partir dos dados de trânsitos espectroscópicos. Alguns dos principais diferenciais desta missão é que o telescópio possui a capacidade de observar no infravermelho e no visível simultaneamente; e o telescópio de ½ metro pode diferenciar os sinais atmosféricos daqueles que são causados por manchas estelares, permitindo, assim, a realização de estudos mais precisos a cerca das atmosferas dos planetas extrassolares. Portanto, Pandora auxiliará e complementarará a coleta de dados que será feita pelo Telescópio James Webb (BELL, 2022).

⁶ O ponto Lagrange 2 é o local onde a atração gravitacional entre o Sol e a Terra equilibram a força centrípeta necessária para que o telescópio se mova com eles (Terra e Sol). Este ponto fica a 1,5 milhões de quilômetros da Terra e neste local o uso do combustível do telescópio é reduzido.

Já o telescópio PLATO (Planetary Transits and Oscillations of stars) que está sendo construído pela Agência Nacional Europeia tem seu lançamento previsto para 2026 com a missão de estudar planetas em zona habitável que orbitam estrelas do tipo solares e para isso, o telescópio terá um campo de observação fixo (SOTO, 2020).

4.4 AS DESCOBERTAS MAIS RECENTES

Milhares de dados coletados por telescópios espaciais ativados e desativados ainda não foram analisados. Todos os dias novas descobertas são publicadas e divulgadas, desde novos exoplanetas com características peculiares e extremas, até planetas em zona habitável que apresentam biosinais que indicam as condições necessárias para o desenvolvimento da vida. Nesta seção, apresentaremos algumas das principais notícias, descobertas e estudos que vem sendo realizados e divulgados acerca dos planetas extrassolares e objetos relacionados.

A descoberta de um novo exoplaneta gigante, o TOI - 530b (TOI - TESS Objects of Interest), a partir do uso do telescópio espacial TESS foi anunciada no dia 08 de outubro de 2021. O grupo de cientistas liderado por Tianjun Gan da Universidade de Tsinghua na China analisou as curvas de luz da estrela mãe TOI 530 a fim de identificar possíveis trânsitos planetários evidenciados por diminuições no brilho recebido do astro. Foi a partir da combinação de diferentes técnicas de fotometria em diferentes comprimentos de onda, espectroscopia de alta resolução e de imagens de resolução angular elevada, que os astrônomos conseguiram determinar que TOI - 530b é 17% menor que Júpiter. O período orbital do gigante em torno de sua estrela é de 6,39 dias, estando localizado a apenas 0,052 UA de sua hospedeira (NOWAKOWSKI, 2021).

O sistema planetário em torno de TOI 530, estrela que tem a metade do tamanho do Sol, está a 41 anos-luz da Terra e a temperatura de equilíbrio do exoplaneta descoberto é de aproximadamente 565 K (ou 292 °C) em sua superfície. Apesar de ser uma grande descoberta, TOI 530b não representa um bom candidato para a realização de estudos sobre composições atmosféricas, uma vez que sua estrela mãe é pouco luminosa, dificultando a coleta de espectros eletromagnéticos de qualidade. Além disso, os astrônomos responsáveis pelo estudo destacam que devem ser realizadas mais análises baseadas em outras técnicas, como a de velocidade radial, por exemplo, para que seja possível entender-se melhor este sistema planetário (NOWAKOWSKI, 2021).

Outro grupo de astrônomos foi capaz de identificar pela primeira vez um disco de matéria formando satélites naturais em torno de um exoplaneta. A observação realizada em julho de 2021 pela equipe liderada por Myriam Benisty a partir do ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) possibilitou aos cientistas a observação de um disco em torno de um exoplaneta. O sistema planetário em torno da estrela PDS 70 está a 400 anos-luz da Terra e possui dois planetas do tipo Júpiter, sendo que em torno de um deles, PDS 70c, existe um disco de material, semelhante ao que observamos em Saturno, por exemplo. De acordo com os levantamentos do estudo, o disco existente possui material suficiente para gerar três satélites naturais do tamanho da Lua e parece estar em processo de formação desses corpos (SEROTE; REIS NETO, 2021).

Os exoplanetas PDS 70b e PDS 70c descobertos em 2018 e 2019, respectivamente, pelo Very Large Telescope (VRL) do ESO (European Souther Observatorio) no Chile, são os únicos planetas extrassolares detectados que estão em processo de formação. Desse modo, estes planetoides podem fornecer informações cruciais para a compreensão dos processos de formação planetária e de “luas” (SEROTE, 2021). De acordo com os cientistas participantes do estudo do disco planetário:

Os planetas se formam em discos de poeira em torno de estrelas jovens, esculpindo cavidades à medida que ‘engolem’ material do disco circumestelar para crescer. Durante esse processo, um planeta pode adquirir o seu próprio disco circumplanetário, o que contribui para o crescimento do planeta, regulando a quantidade de material que cai sobre ele. Ao mesmo tempo, o gás e a poeira do disco circumplanetário podem se juntar em corpos progressivamente maiores por meio de colisões múltiplas, levando por fim ao nascimento de luas em órbita desses planetas (SEROTE; REIS NETO, 2021).

Recentemente, observações realizadas com o telescópio Hubble indicaram dois exoplanetas do tipo mini-Netuno que estão perdendo suas atmosferas inchadas e, gradativamente, se tornarão Super Terras. Planetas do tipo mini-Netunos representam uma pequena parcela dos exoplanetas detectados, pois possuem características peculiares, visto que são versões menores e mais densas de Netuno, mas ao mesmo tempo possuem também núcleos rochosos envoltos por uma espessa camada de gases. O gás atmosférico nesses planetas inicia um processo de escape formando um casulo gasoso em torno dele, deixando-o com uma aparência inchada. De acordo com o estudo desenvolvido no Caltech, a radiação das estrelas hospedeiras está destruindo as atmosferas planetárias e como consequência o gás aquecido escapa para o espaço (CLAVIN, 2022).

O grupo de estudo do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech) utilizou o observatório W. M. Keck no Hawái para analisar o sistema planetário em torno da estrela TOI 560 que está a 103 anos-luz da Terra. A mesma equipe, no entanto, estudou também, dois mini-Netunos em torno da estrela HD 63433 à 73 anos-luz a partir de dados do Hubble. De acordo com os dados levantados pelos astrônomos, os exoplanetas TOI 560.01 e HD 63433c estão perdendo as suas respectivas atmosferas gasosas, o que sugere que ambos tornem-se Super Terras. Apesar de os astrônomos já terem suspeitas acerca deste fenômeno há bastante tempo, ainda não existia nenhum registro comprovando-o, pelo menos até agora (CLAVIN, 2022).

No caso do planeta TOI 560.01, que está 0,06 UA de sua estrela, o gás está evadindo em direção a hospedeira, o que contrapõe o pensamento dos cientistas até então, isto é, a ideia de que o gás escaparia para longe da estrela. Como a velocidade do gás nas atmosferas dos mini-Netunos é muito elevada e a massa desses planetas é reduzida, não existe gravidade suficiente para reter a atmosfera. Como consequência, a perda atmosférica de um mini-Netuno (2 a $4 M_{\text{Terra}}$) pode levar milhões de anos até que este se torne uma Super Terra ($1,6 M_{\text{Terra}}$). Depois de decorrido o período de transformação, o exoplaneta rochoso resultante ainda poderá ter uma atmosfera, mas neste caso, esta será mais estreita e semelhante a da Terra (CLAVIN, 2022).

Todos os dias são anunciados novas descobertas envolvendo os exoplanetas e corpos extrassolares, sendo impossível citarem-se todas neste estudo, visto que este é um campo que se encontra em franco desenvolvimento. As noticiais apresentadas aqui tem como função fornecer um breve contato do leitor com alguns dos novos estudos na área e não esgotá-los.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do apresentado neste estudo, acredita-se que os resultados estão de acordo com os objetivos estabelecidos na gênese deste trabalho, uma vez que, a presente pesquisa produziu um levantamento acerca dos exoplanetas que engloba discussões que partem da Astronomia antiga e passam pela categorização dos planetas, pelas principais técnicas de detecção e estudo dos planetas extrassolares, pelas missões espaciais, e finda com algumas das notícias mais recentes sobre a exoplanetologia.

A seção deste estudo referente à Astronomia na antiguidade nos revela a otimização do pensamento acerca da organização do universo e qual o lugar que ocupamos dentro dele. Evoluímos gradativamente, de um modelo geocêntrico proposto por Aristóteles e defendido por Ptolomeu com epiciclos e deferentes para um modelo heliocêntrico proposto primeiramente por Aristarco e retomado mais tarde por Copérnico e Giordano Bruno no qual o Sol passa a ocupar o centro do sistema planetário. O movimento dos planetas em torno do Sol é confirmado posteriormente a partir das três leis do movimento planetário de Kepler, enquanto Newton enuncia a lei da Gravitação Universal e explica a interação entre os diferentes corpos do sistema Solar.

Observa-se que para que um corpo seja considerado um planeta, este deve atender aos critérios estabelecidos pela União Astronômica Internacional em 2006. Já os exoplanetas, são os planetas que estão localizados além do nosso sistema planetário e que estão sendo estudados atualmente por diversas técnicas. Desde a detecção do primeiro exoplaneta em 1992, as tecnologias envolvendo os métodos de detecção de planetas extrassolares não param de avançar, sendo que podemos dividi-los em: técnicas que se baseiam nas perturbações dinâmicas causadas na estrela; técnicas que avaliam a variação do brilho de uma estrela; e técnicas de medições diretas. As técnicas de detecção exoplanetária que utilizam as perturbações dinâmicas que são causadas nas estrelas pela presença de outros corpos massivos são o método de velocidade radial, a astrometria e o tempo de pulsar. Já as técnicas que analisam a variação do brilho de uma estrela ao longo do tempo são chamadas de trânsito planetário e microlentes gravitacionais. E, por fim, o método de identificação por observação direta é chamado de imageamento de exoplanetas.

Desse modo, defende-se que as possibilidades de inserção dos conteúdos relativos ao ensino de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física a partir do estudo dos exoplanetas são inúmeras. A exoplanetologia pode ser utilizada tanto como recurso

ilustrativo, quanto como de contextualização dos conteúdos e fenômenos físicos/astronômicos estudados durante as aulas. Ou, ainda, como o foco principal de uma sequência didática temática dedicada ao estudo específico dos planetas extrassolares, das técnicas de detecção e estudo dos mesmos, além de sua habitabilidade.

O ensino dos conteúdos sobre a óptica geométrica pode relacionar-se diretamente com as tecnologias dos espelhos, lentes, câmeras e recursos que compensam a dispersão cromática, por exemplo, empregados nos telescópios espaciais e terrestres utilizados, entre outras coisas, para a busca e observação de exoplanetas. É a partir do estabelecimento deste tipo de conexão, entre o conhecimento estudado e as tecnologias que nos envolvem que os estudantes tornam-se mais interessados e podem compreender de que forma a humanidade avança e tende a enxergar cada vez mais longe. Para isso, podem ser exploradas as tecnologias ópticas existentes no Telescópio Espacial Hubble, posteriormente na Sonda Espacial Kepler e atualmente, no mais novo satélite espacial, James Webb, de capacidade sem precedentes. São a partir de momentos como este que os conteúdos estudados podem relacionar-se com conhecimentos já estabelecidos na mente dos alunos e criar significado para o que foi abordado em sala de aula.

O Efeito Doppler, comumente abordado apenas no estudo das ondas mecânicas, mais especificamente nas ondas sonoras (com o típico exemplo da sirene da ambulância), também se aplica às ondas eletromagnéticas, isto é, a luz em diferentes comprimentos de onda. Como foi apresentado neste trabalho, a técnica de detecção de exoplanetas pela velocidade radial baseia-se no fenômeno Doppler que as ondas eletromagnéticas de uma estrela apresentam em decorrência de seu movimento causado pela presença de um exoplaneta em sua órbita. Os espectros eletromagnéticos em diferentes comprimentos de onda das estrelas observadas a partir dos telescópios são um recurso fundamental para o estudo das características e composições de estrelas e atmosferas exoplanetárias. Contudo, para compreender a formação dos espectros, é necessário, compreender-se a teoria de quantização da luz de Max Planck, o que pode ser explorado, portanto, em sala de aula, também.

Já as microlentes gravitacionais podem ser consideradas como fenômeno de comprovação e ilustração da teoria da relatividade de Einstein, que para muitos alunos apresenta-se bastante abstrata. Outros tópicos de Física Moderna e Contemporânea, como a Lei de luminosidade de Stefan-Boltzmann e a lei de deslocamento de Wien, podem ser abordados em sala de aula a partir do uso da exoplanetologia como campo de aplicação destes conhecimentos.

Destaca-se ainda, que os exoplanetas podem ser abordados durante: o estudo da gravitação e de seus efeitos sobre os corpos que possuem massa, como a formação planetária, por exemplo; no estudo de efeitos eletromagnéticos, acentuando-se a importância e as características dos campos magnéticos existentes no Planeta Terra, mas também nos exoplanetas; e por fim, pode-se explorar até mesmo, unidades de medida com as quais os estudantes têm pouco contato em seu cotidiano imediato, mas ouvem falar em filmes e séries televisivas, como o “ano-luz” e a “Unidade Astronomica”.

Outra forma de utilizar-se este trabalho para a inserção de conteúdos de FMC no ensino de Física é abordar a Astronomia a partir da Exoplanetologia percorrendo os tópicos aqui apresentados, iniciando-se, portanto com as discussões da antiguidade a cerca dos corpos celestes. Em seguida, trabalha-se o sistema solar e os astros que o compõe, os planetas e suas especificidades, as estrelas e seus processos de formação, vida e morte. Depois, parte-se para os corpos extrassolares (planetas, estrelas e satélites naturais) destacando-se os principais métodos de detecção, isto é, trânsito planetário, velocidade radial, astrometria, tempo de pulso, imageamento e microlentes gravitacional, assim como o estudo sobre a habitabilidade destes astros. Dentro de cada técnica, podem ser realizados experimentos e simulações que auxiliam na compreensão das mesmas. Seguindo-se uma sequência didática deste tipo, podem ainda ser abordadas as principais missões espaciais e quais as suas maiores contribuições para a humanidade e também as notícias mais recentes sobre exoplanetas e exosatélites, as quais costumam despertar a curiosidade dos estudantes.

Espera-se que o levantamento realizado neste trabalho possa de alguma forma contribuir como referencial de consulta sobre exoplanetas para os professores de Física em atuação, para que o ensino desta disciplina se torne mais dinâmico e interessante para os estudantes. Diversos conceitos físicos podem ser explorados a partir do estudo dessas técnicas de detecção dos exoplanetas, como o efeito doppler, por exemplo. Como perspectiva futura pretende-se elaborar a partir do presente trabalho um artigo teórico e/ou material didático que possa auxiliar os docentes a inserirem mais conteúdos de Física Moderna e Contemporânea em suas aulas por meio da exoplanetologia, uma área que se encontra em pleno desenvolvimento.

A inserção de Tecnologias de Informação e Comunicação no ensino de um modo geral, e especialmente de Física, deve tornar-se uma prática comum, tanto na vida do docente, como no contexto da sala de aula, de modo a possibilitar o acesso a recursos interativos e educativos diferenciados e estimulantes. Desse modo, empregar recursos auxiliares como

vídeos pode ser fundamental para a compreensão dos conteúdos ensinados nas aulas de Física.

No que se refere aos exoplanetas recomenda-se o uso dos links citados abaixo:

- <https://www.nasa.gov/>
- <https://exoplanets.nasa.gov/>
- <https://exoplanets.nasa.gov/eyes-on-exoplanets/#/>
- <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/>
- <https://www.eso.org/public/>
- <https://phys.org/space-news/>
- <https://phys.org/search/?search=exoplanets&s=0>
- <https://www.esa.int/>

REFERÊNCIAS

AMORIM, R.G.G.; SANTOS, W.C. Determinação da massa e dados orbitais de exoplanetas pelo método Doppler. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.39, n.1, e1310, 2017.

BAGLIN, A. et al. The CoRoT legacy Book: **The CoRoT Story**. Disponível em: <edp-pen.org/images/stories/books/contentes/corot/cl_3.pdf>, acesso em 10 de fevereiro de 2022.

BASTOS FILHOS, Jenner Barreto. A unificação de Newton da Física de Galileu com a astronomia de Kepler à luz da crítica Popperiana à indução. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.17, n.3, setembro, 1995.

BELL, Kassandra. **Pandora mission to study stars and exoplanets continues toward flight**. Publicado em 12 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://www.phys.org/news/2022-01-pandora-mission-stars-exoplanets-fligh.html>, acesso em 14 de janeiro de 2022.

CALTECH – CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **Spitzer Space Telescope: Mission Overview**. Disponível em: www.spitzer.caltech.edu/mission/mission-overview, acesso em 17 de fevereiro de 2022.

CLAVIN, Whitney. **Puffy planets lose atmospheres, become super-Earths**. Publicado em 03 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.phys.org/news/2022-02-puffy-planets-atmospheres-super-earths.html>, acesso em 05 de fevereiro de 2022.

COULOMBE, Louis-Philippe. **The James Webb Space Telescope will map the atmosphere of exoplanets**. Publicado em 07 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://phys.org/news/2022-01-james-webb-space-telescope-atmosphere.html>, acesso em 10 de janeiro de 2022.

FLÓRIO, Victório. Descobrindo mundos: a reinvenção da sonda espacial Kepler. **Ciência e Cultura**, v.66, n.4, São Paulo, out./dez. 2014.

HORVATH, J.E. **O ABCD da Astronomia e Astrofísica**. 2ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.

LOPES, Ideusa Celestino. Giordano Bruno: entre o geocentrismo e o heliocentrismo. **Griot-Revista de Filosofia**, v.9, n.1, junho 2014.

LENCHUCK, Adryan P.; FERREIRA, Aline M.; VETTORACI, Davi B.; BAYERL, Livia C.; GOMES, Roger de T. Como identificar exoplanetas. **Cadernos de Astronomia**, v.2, n.1, pp. 191-196, 2021.

MONZÓN, Carlos Vásquez. Detección, dinámica y habitabilidad de exoplanetas e exosatélites. **Tese de doutorado**. Universidade de Santiago de Compostela: Santiago de Compostela, 2021.

MOREIRA, Marco Antonio. Uma análise crítica do ensino de Física. **Estudos avançados**, v.32, n.94, pp. 73-80, 2018.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Exoplanet exploration: **Planets beyond our solar system**. Atualizado em 28 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://exoplanets.nasa.gov/>, acesso em 28 de janeiro de 2022.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Kepler timeline. Disponível em: <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/kepler-timeline/#kepler-final-stare>, acesso em 28 de janeiro de 2022.

NASA HUBBLESITE. **Hubble's journey and the technology that makes it possible**. Disponível em: www.hubblesite.org/mission-and-telescope, acesso em 17 de fevereiro de 2022.

NOWAKOWSKI, Tomasz. **Novo exoplaneta gigante foi detectado pelo TESS**. Publicado em 18 de outubro de 2021. Disponível em: <https://phys.org/news/2021-10-giant-exoplanet-tess.html>, acesso em 19 de outubro de 2021.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza. **Astronomia e Astrofísica**. 3ªed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2013.

PERRYMAN, M.A.C. Extra-solar planets. **Rep. Prog. Phys**, v.63, pp. 1209-1272, 2000.

PRODANOV, Cleber C.; DE FREITAS, Ernani C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2ª ed. Rio Grande do Sul: Novo Hamburgo, Universidade Feevale, 2013.

RICKER et al, George R. **The transiting exoplanet survey satellite**. 2014. Disponível em: <https://www.authors.library.caltech.edu/7375/1/914320.pdf>, acesso em 10 de fevereiro de 2022.

SANTOS, Willian Ricardo. “Natura est deus in rebus”: a filosofia da natureza de Giordano Bruno e a ideia de mínimo. **Tese de doutorado em Filosofia**. Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2019.

SEROTE, Margarida; REIS NETO, Eugênio. **Astrônomos detectam claramente, e pela primeira vez, um disco formando satélites (luas) em torno de exoplaneta**. Publicado em 22 de julho de 2021. Disponível em: <https://www.eso.org/public/brazil/news/eso2111/?lang>, acesso em 19 de outubro de 2021.

SILVA, José Carlos; ROBERTO JUNIOR, Artur Justiniano; ALVES, João Carlos Pereira. Detecção do trânsito planetário de um exoplaneta com um telescópio de pequena abertura. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.42, 2020.

SOTO, Diego Hidalgo. Detección y caracterización de exoplanetas com telescópios espaciales. **Tese de doutorado em ciências físicas**. Instituto de Astrofísica de Canarias: Universidade de La Laguna, 2020.

STERN, S.A.; LEVISON, H.F. Regarding the criteria for planethood and proposed planetary classification schemes. **Highligts of Astronomy**, v.12, Internacional Astronomical Union, 2002. pp. 205-213.

TERRAZZAN, Eduardo A. A inserção de Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na escola de 2º Grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.9, n.3, pp. 209-214, dez.1992.

USP – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. A missão CoRoT: “**Do interior das estrelas aos planetas habitáveis**” – **A participação brasileira**. Disponível em: http://www.astro.iag.usp.br/~corot/princ_1.htm, acesso em 13 de fevereiro de 2022.

VÁLIO, Adriana. Procuram-se planetas. **Ciência e Cultura**, v.61, n.4, São Paulo, 2009.

WEBB MEDIA KIT. **Webb Space Telescope: Media Kit**. Publicado em 2021. Disponível em: <https://webb.nasa.gov/content/webbLaunch/assets/documents/webbmediakit.pdf>, acesso em 10 de fevereiro de 2022.