




Exoplaneta WASP-2 A b: Um Estudo de Viabilidade Observacional no OAA/MACT-UEFS

Exoplanet WASP-2 A b: An Observational Feasibility Study at OAA/MACT-UEFS

Raquel Silva Freitas,* Vera Aparecida Fernandes Martin , Paulo César da Rocha Poppe , José Henrique Costa Pinto Souza, Elis Cristina Silva Sales, Bianca Ramielly Bomfim de Jesus, Matheus do Carmo Carvalho, Toni Cordeiro de Almeida, e Mariana da Silva Lima Santos
Departamento de Física/Observatório Astronômico Antares – UEFS
Av. Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, Feira de Santana – BA – 44031-460

Maximiliano Faúndez-Abans e Mariângela de Oliveira-Abans 
Laboratório Nacional de Astrofísica – MCTI
R. Estados Unidos, 154, Bairro das Nações, Itajubá – MG – 37504-364

Priscila Freitas-Lemes
IPD – Universidade do Vale do Paraíba
Av. Shishima Hifumi, 2911, Urbanova,
São José dos Campos – SP – 12244-390

(SUBMETIDO: [20/11/2021] – ACEITO: [02/03/2022] – PUBLICADO: [07/04/2022])

A descoberta do primeiro exoplaneta fora do Sistema Solar inaugurou um novo campo de intensa investigação científica na Astronomia, abrindo várias perspectivas de estudos através de técnicas diferenciadas em observatórios instalados no solo e no espaço. As descobertas realizadas já acumulam, atualmente, mais de 4500 exoplanetas confirmados em mais de 3300 sistemas planetários. Como parte dos estudos realizados de Iniciação Científica no DFIS/UEFS, esta contribuição descreve os principais resultados relacionados ao exoplaneta WASP-2 A b, descoberto em 2006 através da técnica de Trânsito Planetário. As observações fotométricas realizadas no Observatório Astronômico Antares – UEFS, com o telescópio MEADE 10" LX200 GPS, a CCD SBIG ST-7XME-D e o filtro ExoPlanet-BB (*Blue Blocking*), foram suficientes para realizar um estudo preliminar da curva de luz obtida com o software MaxIm DLTM e confirmar a viabilidade para o início de um potencial programa observacional com os telescópios de pequena abertura ora disponíveis: MEADE e CDK20.

Palavras-chaves: Exoplaneta; Fotometria Diferencial; Curva de Luz.

The discovery of the first exoplanet outside the Solar System inaugurated a new field of intense scientific investigation in Astronomy, opening up several perspectives for studies through different techniques in observatories installed on the ground and in space. The discoveries made already accumulate, currently, more than 4500 exoplanets confirmed in more than 3300 planetary systems. As part of the Scientific Initiation studies carried out at DFIS/UEFS, this contribution describes the main results related to the exoplanet WASP-2 A b, discovered in 2006 through the Planetary Transit technique. The photometric observations carried out at the Antares Astronomical Observatory – UEFS with the MEADE 10" LX200 GPS telescope, the CCD SBIG ST-7XME-D and the ExoPlanet-BB (Blue Blocking) filter were sufficient to carry out a preliminary study of the light curve obtained with the MaxIm DLTM software and confirm the feasibility of starting a potential observational program with the now available small aperture telescopes: MEADE and CDK20.

Keywords: Exoplanet; Differential Photometry; Light Curve.

I. INTRODUÇÃO

Buscamos, desde o início, entender a grandiosidade do Universo, estudando os mais

* Endereço Eletrônico: raquel.uefs7@gmail.com

variados objetos nele existentes, como os planetas, as estrelas, as galáxias, etc. O pensamento sobre a existência de “mundos diversos” é uma dessas inquietações humanas que remonta a séculos atrás, explícita, por exemplo, na obra do escritor, filósofo e monge dominicano Giordano Bruno (1548-1600), queimado vivo em Roma como herege por seus pensamentos e convicções sobre a existência de um Universo infinito e sem limites, além de outros possíveis mundos, totalmente contrários aos dogmas impostos, na época, pela antiga Igreja Católica. Nas palavras do próprio autor:

“Existem, portanto, inúmeros sóis e uma infinidade de mundos em órbitas definidas, como os sete mundos que orbitam o nosso próprio Sol.”

– Giordano Bruno
‘On the Infinite Universe and Worlds’, (1584).

Como sucessor do astrônomo e matemático polonês Nicolau Copérnico (1473-1543), Giordano Bruno defendia a tese do Heliocentrismo, em oposição ao modelo Geocêntrico do alexandrino Claudio Ptolomeu (~90 a.C. ~170 d.C.), idealizado a partir do problema apresentado inicialmente por Platão no século IV a.C., ou seja, de explicar de forma simples as variações cíclicas observadas no céu. Portanto, a partir de uma visão mais plural, Giordano Bruno corroborou com uma nova percepção do Universo, mas, pagando para isso um preço muito alto. Em 17 de Fevereiro de 1600, no “Campo das Flores”, Roma, Itália, a Inquisição acabou condenando-o a morte, por defender que nenhuma verdade absoluta poderia existir.

Mas, o que seriam esses “novos mundos”? Esta expressão é atribuída à visão revolucionária de que as diversas estrelas que ora observamos em uma noite escura e sem nuvens são verdadeiros sistemas como o nosso Sistema Solar, ou seja, com planetas rochosos (tipo Terra) e gasosos (tipo Júpiter) seguindo as leis formuladas pelo astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630). Na literatura, o termo científico empregado é ‘exoplaneta’, portanto, planetas que estão fora do Sistema Solar, ou seja, que orbitam uma estrela que não seja o Sol e,

desta forma, pertencem a um sistema planetário distinto, a princípio, do nosso [1]. Os exoplanetas também são encontrados em órbitas de sistemas binários, a exemplo do Kepler-47 [2], e até mesmo em um pulsar, PSR1257 + 12 [3]. Observações em estrelas do tipo tardio, em anãs do tipo M, também vem sendo alvos de intensos estudos [4].

No caso particular do Sol, tipo espectral G2V, a análise no diagrama Hertzsprung-Russel (Figura 1) revela que esta estrela não apresenta nenhuma característica particular que a diferencie das demais estrelas da Galáxia que se distribuem relativamente próximas, sendo, na verdade, um objeto bastante comum. Diante da estimativa de estrelas existentes na nossa Galáxia (100-400 bilhões [5]) e do número de galáxias presentes no Universo (da ordem de 200 bilhões [6]), a probabilidade de existirem sistemas estelares com planetas (semelhantes aos do Sistema Solar) é bastante significativa. Portanto, o estudo observacional pautado na detecção de exoplanetas representa um campo extremamente fértil, empolgante e que vem recebendo muita atenção da comunidade científica (astrônomos, físicos, biólogos, químicos, geólogos, etc.) desde a primeira descoberta oficial ocorrida em 1992 [3], em que foram detectados 2 exoplanetas com massa terrestre orbitando o pulsar PSR B1257 + 12 (um terceiro foi descoberto mais tarde e encontra-se em aberto a existência de um quarto).

O primeiro exoplaneta (51 Pegasi b) descoberto orbitando uma estrela da Sequência Principal (51 Pegasi) ocorreu logo em seguida, em 1995, utilizando o método de Velocidade-Radial [7]. Esta descoberta rendeu em 2019 a premiação com o Nobel de Física. A descoberta do primeiro exoplaneta (GLIESE 591D) com massa do tipo terrestre na zona habitável de sua estrela aconteceu em 2011 [8].

O presente trabalho, desenvolvido no âmbito da Iniciação Científica, descreve um primeiro estudo no campo da observação e da detecção de exoplanetas através do método de Trânsito Planetário, sendo aplicado na estrela variável WASP-2 A (magnitude aparente 11,98 V), empregando o telescópio Meade Schmidt-Cassegrain com abertura de 254 mm e distân-

Características das estrelas

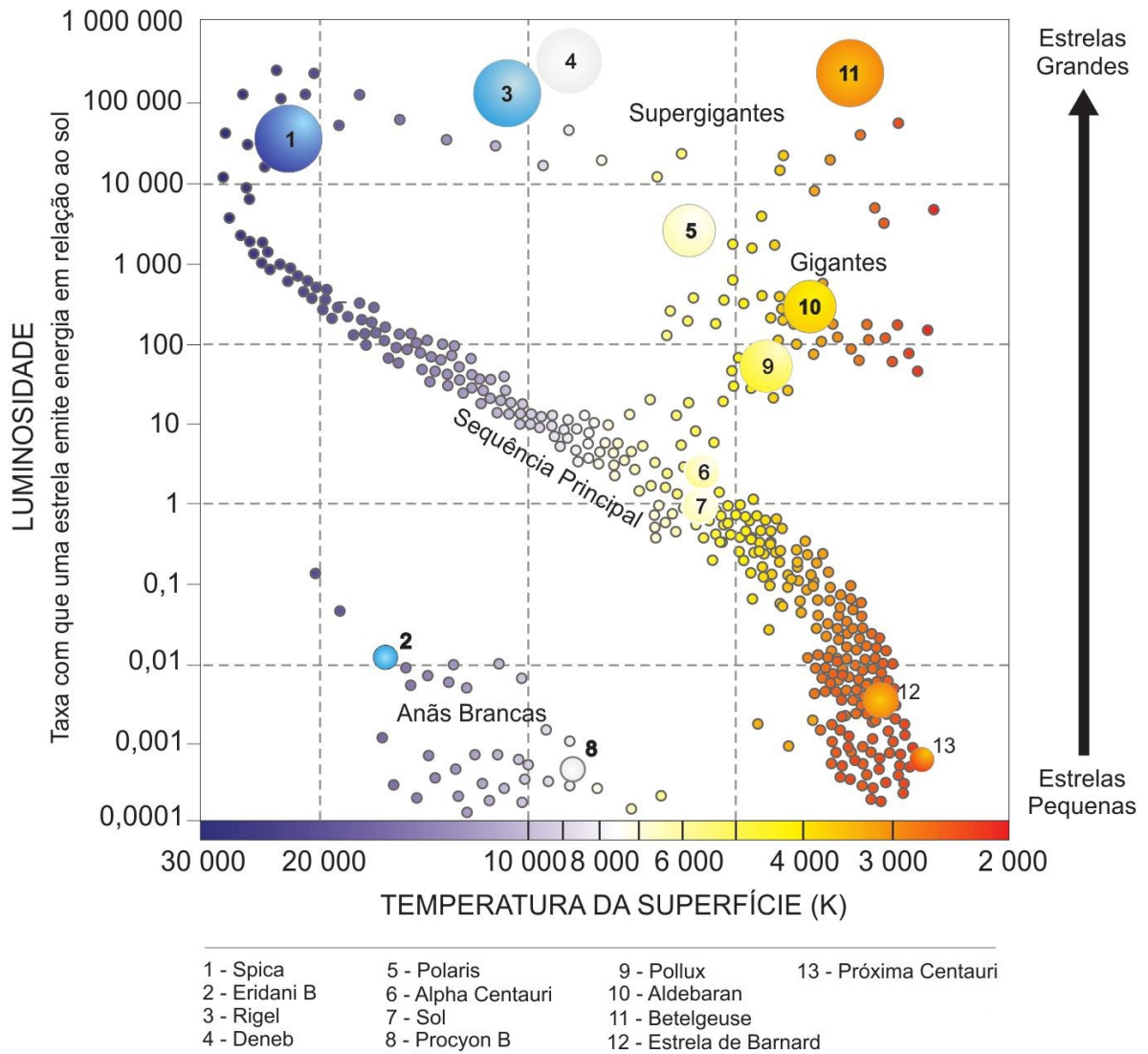


FIGURA 1. Diagrama HR (Hertzsprung-Russel com a localização do Sol e de algumas estrelas conhecidas: Fonte: Kepler de Oliveira e Maria de Fátima Saraiva, *Astronomia e Astrofísica*. [9].)

cia focal de 2500 mm, instalado no Observatório Astronômico Antares (UEFS). A estrela possui o exoplaneta descoberto em 2006 pelo método de Trânsito [10, 11], com período orbital de 2,15222144 ($\pm 4e-07$) dias [12] e massa 0,847 ($\pm 0,045$) M_{Jup} [13].

O propósito deste estudo é verificar a viabilidade para o início de uma campanha observacional de exoplanetas com telescópios de pequeno porte. Utilizamos o software comercial MaxIm DLTM para a redução e construção

da curva de luz fotométrica.

Para uma melhor compreensão, o artigo está estruturado da seguinte forma: na Seção II abordamos alguns dos métodos de detecção de exoplanetas e o método utilizado; apresentamos o nosso objeto de estudo na Seção III, o equipamento aplicado nas observações, a coleta e análise dos dados; na Seção IV explanamos sobre os resultados obtidos sendo feita toda uma análise comparativa com os dados encontrados na literatura; e, por fim, na Seção V e-

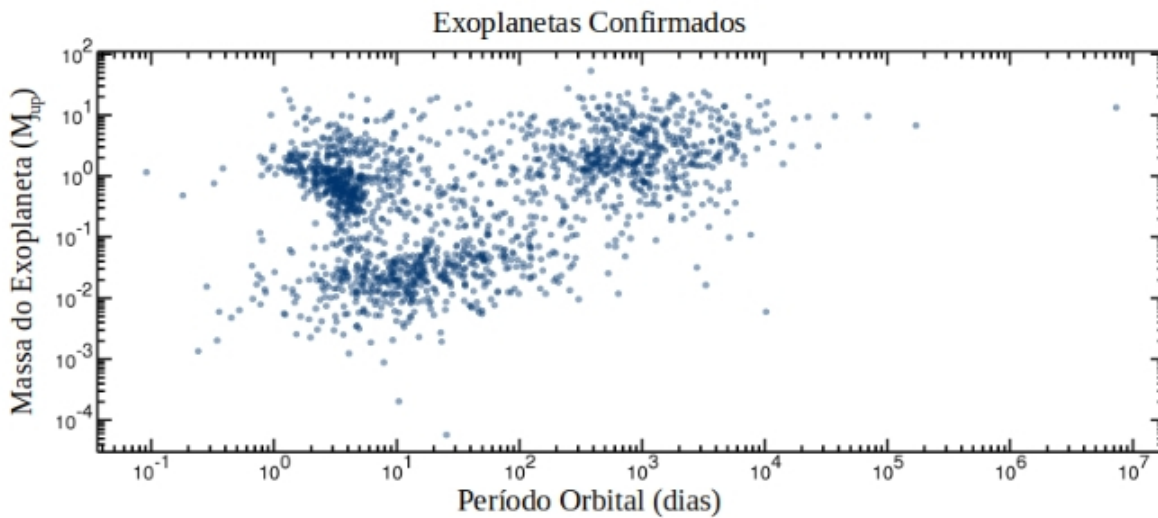


FIGURA 2. Exoplanetas confirmados. Adaptado de: Exoplanet Archive IPAC Caltech [14].

videnciamos a concepção e as conclusões.

II. EXOPLANETAS: Como detectá-los?

A detecção de exoplanetas é uma tarefa observacional que demanda paciência, persistência e perseverança, pois envolve dificuldades inerentes à natureza destes objetos quando comparados com as estrelas hospedeiras: são pequenos, de baixa massa, temperatura e luminosidade. Para entendermos melhor o contexto apresentado, imaginemos uma lâmpada LED de 100 W acesa, na qual recebe a passagem frontal de um pequeno inseto, ocasionando, assim, uma sensível atenuação no brilho intrínseco da mesma. Qual seria a probabilidade de detectarmos tal alteração na luminosidade e relacionarmos este efeito com o inseto, ou seja, com as características mais fundamentais deste, como o tamanho, massa e a distância em relação à lâmpada de LED? Este é um bom exemplo que ilustra a dificuldade observacional associada a este campo científico de estudo. Mas, apesar deste particular contexto, até a presente redação desta contribuição, mais de 4500 exoplanetas já foram confirmados em mais de 3300 sistemas planetários, havendo ainda quase 8000 candidatos [15] aguardando análise (veja

a Figura 2). Também é preciso lembrar que fontes de incertezas estão presentes em qualquer ciência experimental e devem ser muito bem mapeadas para evitar possíveis interpretações equivocadas.

Vamos exemplificar para o sistema estelar de Alpha Centauri (o sistema é formado por três estrelas unidas gravitacionalmente: o par Alpha Centauri A e B, duas estrelas brilhantes e próximas no céu, e uma anã vermelha pequena mais afastada, Alpha Centauri C (Próxima Centauri)) localizado na constelação do Centauro, o mais próximo do Sistema Solar, situado a uma distância de $4,3650 \pm 0,0068$ anos-luz [16].

Em 2012, foi anunciada a descoberta de um exoplaneta (Alpha Centauri Bb), via velocidade radial, orbitando a estrela Alpha Centauri B, com uma massa estimada em $1,13 M_{\oplus}$ em uma órbita com período de 3,2357 dias [17]. Contudo, em 2015, três anos após o anúncio da descoberta inicial, pesquisadores da Universidade de Oxford publicaram um artigo intitulado “*Ghost in the Time Series*”, demonstrando falhas na análise original. A detecção prévia era, na verdade, um artefato matemático introduzido na análise dos dados observacionais [18]. Mas, um novo estudo reacendeu a questão com a publicação da detecção

de um objeto com período mediano de 12,4 dias, associado a um novo exoplaneta [19].

Em agosto de 2016 foi, então, anunciada a descoberta de um exoplaneta no sistema, mas agora ao redor da estrela *Próxima Centauri*, denominado *Próxima Centauri b* [20]. O exoplaneta possui uma massa mínima de $1,29 \pm 0,13 M_{\oplus}$ e período de $11,218 \pm 0,029$ dias [21].

Alguns anos mais tarde, em 2019, o exoplaneta *Próxima Centauri c* foi descoberto pelo método de Velocidade Radial [22], com uma massa estimada de $7 M_{\oplus}$ ($0,030 \pm 0,005 M_{\text{Jup}}$) e período orbital de $1928,0 \pm 20,0$ dias [23]. O semieixo maior foi calculado em $1,489 \pm 0,049$ UA [24] e a temperatura efetiva de 39 K ($-234,2$ °C) [22].

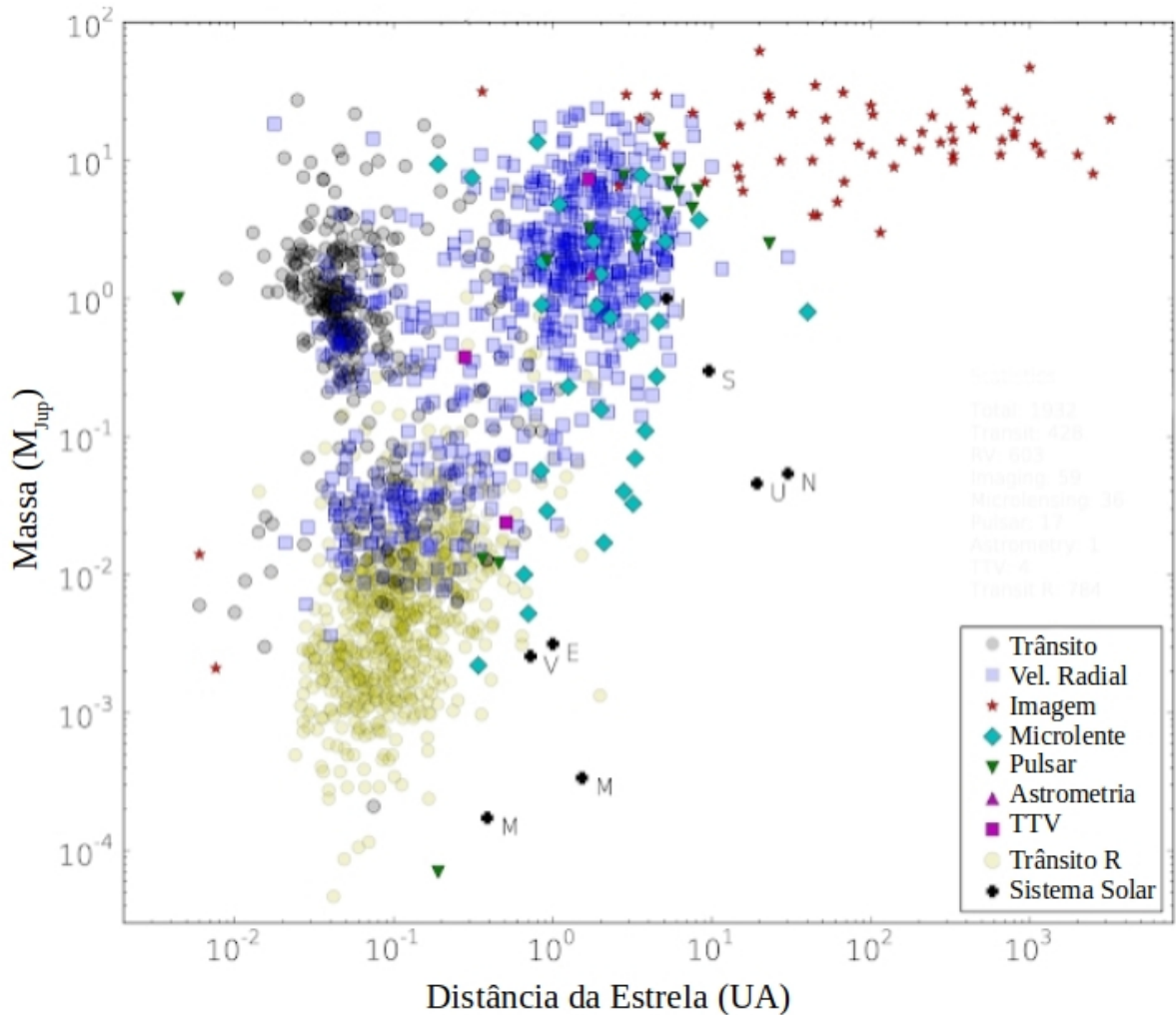


FIGURA 3. Diferentes técnicas empregadas para a detecção dos exoplanetas. Abscissa: semieixo maior (UA); Ordenada: Massa (M_{Jup}). Fonte: disponível em *Exoplanet EU*, (adaptado) [26].

Finalmente, temos ainda o objeto *Alpha Centauri Ab*, um candidato a exoplaneta obtido diretamente em imagens ao redor de *Alpha Centauri A* em 2021 [25]. Se confirmado como um exoplaneta, ele orbitaria a aproximadamente 1,1 UA de distância de *Alpha Cen-*

tauri A com período de cerca de 1 ano e teria uma massa estimada entre as de Netuno e Saturno. Portanto, provavelmente um gigante gasoso. Contudo, é importante salientar que o candidato ainda não foi confirmado como um sinal exoplanetário; observações adicionais são

necessárias para confirmar tal natureza.

No que segue, descreveremos brevemente os métodos comumente empregados para a detecção de exoplanetas.

III. MÉTODOS USADOS

A descoberta de exoplanetas e a correspondente caracterização é feita mediante o emprego de diversos métodos indiretos, embora já tenhamos imagens diretas de alguns deles [27]. Contudo, é importante destacar que a lista disponível no link acima também inclui objetos formados através de processos distintos daqueles esperados para os planetas, ou seja, de companheiros com massa planetária que orbitam uma estrela, mas que são oriundos de processos de formação diferentes (estrelas binárias, por exemplo). De qualquer forma, o método de detecção direta funciona melhor para exoplanetas jovens que emitem luz na banda do infravermelho e se encontram relativamente longe do forte brilho da estrela hospedeira [28–32].

O exoplaneta mais leve, mais frio e mais antigo obtido através deste método é o *Proxima Centauri c*, com as características descritas acima. A lista de exoplanetas obtidas com imageamento direto e indicada no link anterior, também inclui os quatro membros (b,c,d,e) do sistema multiplanetário HR 8799, detectados pelas técnicas de imageamento angular diferencial e de combinação de imagens otimizadas localmente [33, 34]. Diferente do método ‘direto’ abordado acima, os astrônomos dispõem de outros mecanismos ‘indiretos’ para a detecção dos exoplanetas [35]. A Figura 3 ilustra os principais métodos empregados e os resultados obtidos em termos do semieixo maior (em unidades astronômicas) e das massas determinadas em função da massa de Júpiter. Os diferentes símbolos (com cores distintas) representam os específicos métodos empregados para detectar um exoplaneta. Os dados usados foram extraídos de [36].

A Figura 3 também ilustra uma categoria particular para a técnica de trânsito: ‘Trânsito R’ (círculos amarelos), que representam todos os pequenos exoplanetas detectados por trânsito, mas que ainda não tiveram suas massas

totalmente confirmadas. Portanto, as massas dos círculos amarelos estão provavelmente incorretas em alguma ordem, mas fornecem uma estimativa aproximada de onde elas podem ser encontradas no gráfico.

No que segue, apresentamos uma pequena discussão para os seguintes métodos: Velocidade Radial, Astrometria, Microlentes Gravitacionais e Trânsito Planetário.

III.1. Velocidade Radial

Este foi o método utilizado na primeira evidência de um exoplaneta orbitando uma estrela da Sequência Principal, 51 Pegasi b, [7], estando em primeiro lugar do ranking de detecções com cerca de 70% das descobertas. Atualmente, representa a principal técnica empregada na busca de novos exoplanetas, na qual emprega o Efeito Doppler, onde uma breve descrição será apresentada a seguir.

Vamos imaginar que estamos parados em uma calçada e nos deparamos com a passagem de uma ambulância com a sirene ligada. Certamente, notamos uma alteração no efeito sonoro da sirene nesse percurso, indo do grave para o agudo à medida que a ambulância se aproxima e se afasta de nós. Esse exemplo, por sua vez, é um dos mais clássicos da Física envolvendo ondas, descrevendo simplesmente como estas são alteradas pelo movimento relativo entre a fonte e o observador, ou seja, quanto maior a frequência do som mais agudo escutamos.

Bom! Mas o que isso tem a ver com exoplanetas? Sabemos que as ondas, no espectro da radiação eletromagnética, estão sujeitas ao efeito Doppler. No entanto, por conta da velocidade da luz (299.792, 458 km/s) que é extremamente alta, esse efeito é melhor observado em objetos astronômicos. Entretanto, diferente do som, a luz não varia de grave para agudo, mas altera (ou desloca) para valores menores ou maiores o seu comprimento de onda, do qual denominamos de “*blueshift*” e “*redshift*”, respectivamente. Portanto, para um observador solidário à Terra, quando um corpo se aproxima, o espectro parece azulado e quando se afasta, o mesmo parece avermelhado, como exemplificado na Figura 4.

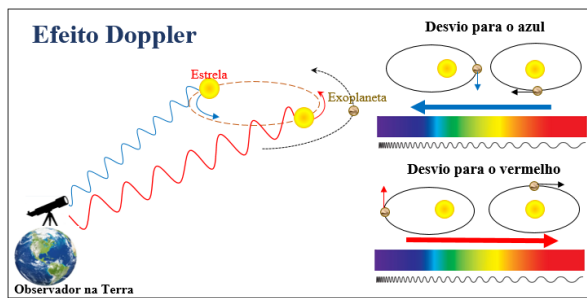


FIGURA 4. O efeito Doppler mede a projeção sobre a linha de visada da velocidade da estrela em relação ao observador na Terra, que também está em movimento, exigindo uma análise detalhada das medidas realizadas. Figura fora de escala. Fonte: Autora.

Do exposto acima, podemos agora compreender melhor o que acontece no método de Velocidade Radial, no qual deve ser entendido como a velocidade de um objeto na direção da linha de visada do observador, isto é, a velocidade com que o objeto se aproxima ou se afasta do observador. No caso da detecção de um exoplaneta, observa a variação na posição da estrela ao longo do tempo. Essa técnica é uma maneira bastante eficiente de investigar o movimento de uma estrela, usando, portanto, o efeito Doppler para medir a velocidade com que a estrela se desloca, analisando as variações nas posições das linhas do espectro da estrela.

Esta técnica possibilita a observação de exoplanetas com uma grande variedade de massa (ver Figura 3). Um exemplo sobre a detecção da massa e de parâmetros orbitais por esta técnica pode ser obtido em [37].

III.2. Astrometria

Esta técnica baseia-se em um método bastante antigo e objetiva medir o deslocamento geométrico da estrela no sistema estudado. A partir da medida precisa da posição da estrela, Astrometria, é possível determinar se a mesma move-se devido ao “arrasto” de um planeta que a orbita (Figura 5).

Esta técnica pode ser empregada tanto em observações no óptico (solo e espaço [38]) quanto no rádio, e as projeções podem atingir exoplanetas com massas da ordem de $10 M_{\oplus}$.

A missão Gaia [39] emprega esta técnica para procurar exoplanetas do tipo terrestre. Contudo, é importante ressaltar que o método apresenta uma melhor resposta para objetos de longos períodos, sendo, portanto, contrário ao método da velocidade radial.

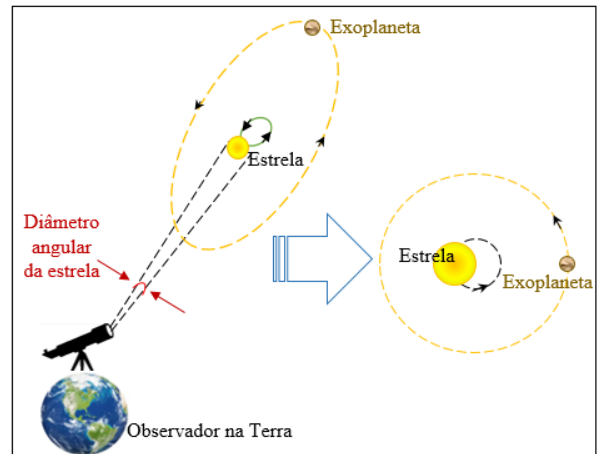


FIGURA 5. Nesta representação, a presença de um exoplaneta produz um movimento periódico em torno do centro de massa do sistema, cujo resultado é percebido pela mudança periódica da posição dessa estrela relativamente a um referencial (observador). Figura fora de escala. Fonte: Autora.

III.3. Microlentes Gravitacionais

A detecção de exoplanetas por esta técnica emprega o acompanhamento fotométrico (curva de luz) de uma estrela. O efeito de Microlente Gravitacional acontece quando os campos gravitacionais do exoplaneta e da estrela atuam de modo a amplificar, de forma aparente, a luz de uma estrela distante ou promover a distorção do feixe luminoso emitido pela mesma. No entanto, para que o efeito possa ser detectado, o sistema observado deve estar na linha de visada do observador. Tratam-se, portanto, de eventos com uma probabilidade baixa de ocorrência, sendo necessário o monitoramento contínuo de um número muito grande de estrelas distantes para permitir uma detecção razoável de exoplanetas. Outro aspecto importante está relacionado ao movimento dos corpos celestes envolvidos, ou seja, uma determinada configuração de Microlente Gravitacional representa um único evento

observacional. Portanto, não é possível repetir ou reconfirmar a observação realizada.

Este efeito [40] é causado pela deflexão da luz ao passar por objetos de alta massa, efeito esse previsto pelo físico teórico alemão Albert Einstein (1879-1955), e possui a sensibilidade surpreendente de detectar planetas de baixa massa na zona habitável da estrela hospedeira.

A MicroFun (*MICROlensing Follow-Up Network* [41]) é uma rede de pequenos e médios telescópios fotométricos que acompanham os eventos de microlentes na direção do centro de nossa Galáxia.

A geometria de evento a partir deste método é mostrada na Figura 6. O campo gravitacional da lente amplifica a imagem e o brilho da fonte estelar. A presença de um exoplaneta causa uma assinatura na lente (curva de luz), ilustrado na Figura 7.

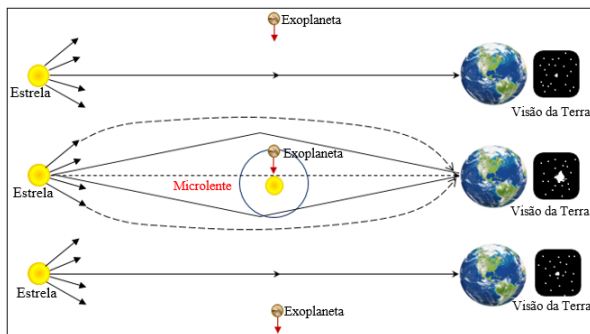


FIGURA 6. Esquema simplificado referente à técnica de Microlente Gravitacional. Figura fora de escala. Fonte: Autora.

III.4. Trânsito Planetário

De certa forma, a origem deste método está associada aos estudos realizados em meados dos séculos XVIII e XIX com os trânsitos dos planetas Mercúrio e Vênus no disco solar, onde o objetivo era o de determinar a distância da Terra ao Sol utilizando a Trigonometria. A simplicidade de estudar esses dois planetas internos à órbita da Terra traria um importante avanço para a Astronomia, que culminaria no profícuo método de detecção de exoplanetas via Trânsito Planetário, acessível a uma grande variedade de telescópios, de pequeno (10,0 cm) a grande

(10,0 m) porte. No caso dos telescópios de pequena abertura, de nosso interesse particular, podemos destacar as descobertas dos exoplanetas TrES-1 [42], XO-1b [43, 44], TrES-2 [45], HAT-P-1b [46], e WASP-1b and WASP-2b [11]. Contudo, é importante ressaltar que nem todos os exoplanetas apresentam trânsitos. A geometria favorável vai depender do arranjo orbital do exoplaneta.

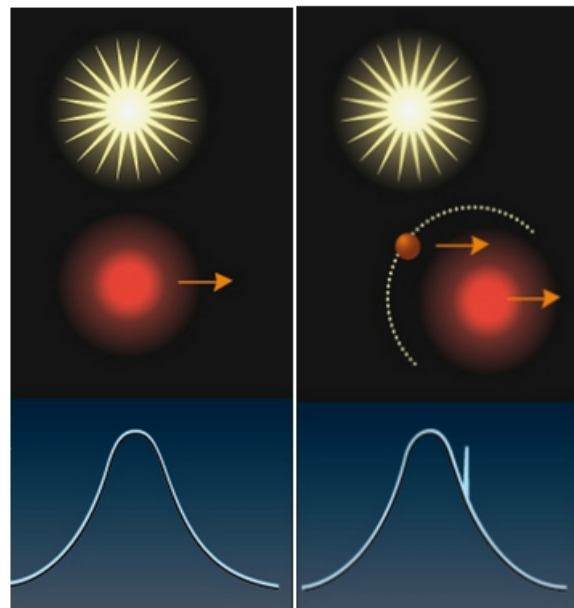


FIGURA 7. A técnica de microlente gravitacional amplifica a luz de uma estrela de fundo devido ao efeito de lente criada pela passagem de outra estrela entre ela e o observador. A presença do exoplaneta é relatada na assinatura deixada na curva de luz, intensidade (ordenada) x tempo (abscissa, em horas). Adaptado de [47].

A técnica está baseada na fotometria, fornecendo uma curva de luz (brilho aparente ao longo do tempo) para a estrela observada, antes, durante e depois da passagem do exoplaneta na frente do disco estelar (Figura 8). Neste caso, ocorre uma diminuição da quantidade de luz da estrela observada pelo detector instalado no telescópio de solo ou do espaço.

As observações de solo podem ser realizadas através de telescópio de pequeno porte, como aqueles instalados no Observatório Astronômico Antares: Meade LX200 GPS (25,0 cm) e CDK20 (50,8 cm). Um dos mais

marcantes exemplos é o telescópio robótico belga de 60,0 cm localizado no Chile, “*Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope*”, (TRAPPIST [48]), que detectou na estrela TRAPPIST-1 (constelação de Aquário) o maior número de planetas (sete ao total) de dimensões semelhantes às da Terra, com condições favoráveis à existência de água. Existe uma grande quantidade de projetos voltados para esse campo de estudo, sendo os de maiores descobertas o WASP (*Wide Angle Search for Planets* [49]) e o HATNet (*Hungarian Automated Telescope Network* [50]).

No espaço, a lista envolve os projetos já inoperantes como o MOST (*Microvariability and Oscillations of Stars/Microvariabilité et Oscillations STellaire*, 2003-2019), EPOXI (envolvendo as missões DIXI (*Deep Impact Extended Investigation*) e EPOCH (*Extrasolar Planet Observation and Characterization*, 2005-2013), SWEEPS (*Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search*, 2006), COROT (*Convection, Rotation et Transits planétaires*, 2006-2012), KEPLER (*Kepler space telescope*, 2009-2018) e K2 (*Kepler’s Second Light*, 2013-2018), ativos como o (GAIA, 2013+), ASTERIA (*Arc-second Space Telescope Enabling Research in Astrophysics*, 2017+), TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*, 2018+) e CHEOPS (*CHaracterising ExOPlanets Satellite*, 2019+) e planejados como o JWST (*James Webb Space Telescope*), PLATO (*PLANetary Transits and Oscillations of stars*), ARIEL (*Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey*) e RST (*Nancy Grace Roman Space Telescope*).

A ilustração da Figura 8, T representa a duração do trânsito em função da distância do exoplaneta até a estrela. O meio do trânsito é representado pelas setas centrais, onde ΔF representa a perda de luminosidade da estrela devido a passagem do exoplaneta, associado ao tamanho e distância. A diminuição relativa do brilho é determinada pela razão quadrática entre os tamanhos do exoplaneta e da estrela, ou seja, é devido a uma razão entre as áreas projetadas dos objetos. O intervalo de tempo com que se repete um trânsito planetário de um dado exoplaneta equivale ao período orbital

deste ao redor da estrela e está diretamente ligado a sua distância média da estrela (ou semi-eixo maior da órbita elíptica). Deste modo, a técnica de trânsito nos fornece o tamanho do exoplaneta e sua órbita ao redor da estrela.

Ao passar na frente da estrela hospedeira, um exoplaneta causa uma diminuição no brilho da mesma, chegando a milésimos ou centésimos de magnitude.

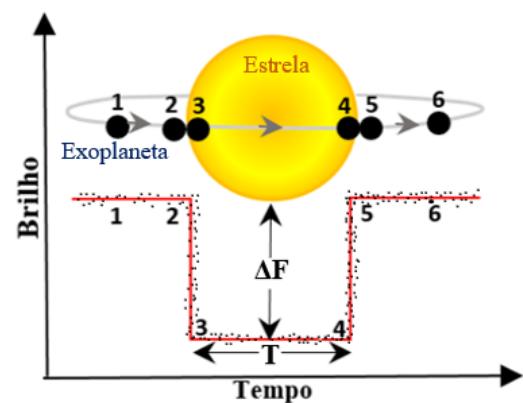


FIGURA 8. Ilustração da curva de luz de uma estrela durante um trânsito exoplanetário, detalhando alguns pontos principais: ΔF (variação do fluxo) e T (tempo estimado do trânsito). Figura fora de escala. Fonte: Autora.

As numerações indicadas na Figura 8 são descritas a seguir:

Fases 1 e 6: Representam os momentos em que o exoplaneta não está em contato com o disco de sua estrela hospedeira, representando, portanto, os momentos em que não existem quaisquer alterações no brilho observado da estrela.

Fase 2: É visto o primeiro contato do exoplaneta com o disco da estrela - tangenciamento dos bordos. O exoplaneta está completamente fora da estrela, mas movendo-se para o interior da mesma (ingresso).

Fase 3: Nesta fase, o exoplaneta está eclipsando a estrela e já é possível observar uma variação total no fluxo. O exoplaneta pode atravessar o disco estelar em diferentes latitudes.

Fase 4: Após percorrer o disco estelar, o exoplaneta começa a sair do mesmo e inicia-

se o aumento do fluxo. Representa uma fase simétrica à posição anterior.

Fase 5: O exoplaneta sai totalmente da frente do disco estelar, também chamado de egresso, situação oposta à Fase 2. O fluxo total da estrela é restabelecido.

IV. SOBRE A INSTRUMENTAÇÃO E A ESTRELA WASP-2 A

IV.1. Instrumentação Usada

Utilizamos a infraestrutura do Observatório Astronômico Antares/Universidade Estadual de Feira de Santana (OAA/UEFS) para monitorar a estrela WASP-2 A durante o ano de 2019.



FIGURA 9. Instrumentação usada nas observações da estrela WASP-2 A. a) Filtro Astrodon ExoPlanet-BB; b) Telescópio refletor MEADE 10'' Schmidt-Cassegrain, LX200 GPS; c) Câmera CCD SBIG ST-7 XME-D.

A Figura 9 ilustra a instrumentação empregada para obter os dados fotométricos para o estudo de viabilidade, e detalhamos a seguir:

(a) As observações foram realizadas com o filtro *Astrodon ExoPlanet-BB* (*Blue Blocking*), que possui várias vantagens: (i) bloqueia a luz UV e azul, começando a transmitir perto de 500 nm, (ii) apresenta resposta próxima do filtro de banda V convencional, e continua a transmitir

luz para o infravermelho próximo, (iii) as estrelas de referência, que podem apresentar cores diferentes da estrela alvo, não produzem curvaturas de massa de ar indesejáveis na curva de luz final, (iv) a maior parte da luz da Lua é bloqueada pelo filtro, e (v) fornece imagens com alta razão sinal-ruído. O leitor pode obter mais informações em [51].

(b) O telescópio empregado foi o refletor Meade LX200 GPS do tipo Schmidt-Cassegrain automatizado de 10'' (abertura de 25,4 cm, distância focal de 2500 mm e razão $f/10$) com uma montagem autazimutal estável e de alta performance, financiado em 2003 pela Fundação Vitae (Figura 10). Possui a função “goto” que facilita a localização de objetos no céu de forma rápida. O receptor de GPS da Sony com tecnologia de nivelamento e orientação com o norte (*Level-North-Technologie* ou LNT) ajuda na aquisição automática da hora, data e na localização geográfica do local. Com o software *AutoStar II*, é possível acessar no banco de dados, mais de 145 mil objetos em ambos Hemisférios, além de permitir a introdução de coordenadas equatoriais J2000 de objetos não catalogados.



FIGURA 10. Telescópio Meade LX200 GPS com uma luneta de acompanhamento de 200 mm, acoplada a uma CCD de mesma característica: SBIG ST-7 XME-D.

Possui o “*Advanced Coma-free Optics*”, ACF, cujo design óptico elimina as aberrações típicas de todas as ópticas de espelho. Portanto, as estrelas observadas são pontuais

mesmo na borda do campo da imagem, sem exibir distorções alongadas semelhantes aos cometas. O campo da imagem é mais plano que o dos telescópios clássicos Ritchey-Cassegrain. Outra característica é o *Ultra-High Transmission Coatings*, UHTC, cujo revestimento especial multicamadas na placa corretora frontal fornece até 15% mais de transmissão de luz. O leitor pode obter mais informações em [52].

(c) A câmara usada foi a CCD SBIG ST-7 XME-D de 765×510 *pixels* ($6,6 \times 4,6$ mm) com *pixels* de tamanho de 9×9 microns. Possui corrente escuro de $1e^-$ /pixel/sec na temperatura de 0° C. Permite integrações entre 0,12 até 3600 segundos, com resolução de 10 ms. Fornece ganho de $2,3e^-$ /ADU, ruído de leitura $15e^-$ RMS e pode resfriar até -30° se a temperatura ambiente for de 0° . A saturação do *pixel* ocorre em 65500 contagens.

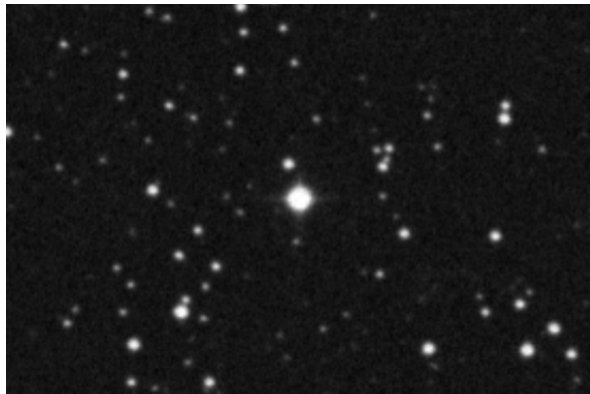


FIGURA 11. Recorte do campo de visada da estrela WASP-2 A, com possíveis estrelas de guiagem.

Este CCD apresenta dois sensores, um para a guiagem e outro para a aquisição das imagens, montados próximos, ambos com foco no mesmo plano, permitindo que o CCD de imagem integre os fótons enquanto o software usa o de guiagem para corrigir os desvios no telescópio. Logicamente, usar um CCD separado, próprio para a guiagem, permite que 100% do CCD principal seja usado para obter a imagem (Figura 10). Nesta configuração, a taxa de correção do telescópio e a magnitude da estrela de guiagem podem ser selecionadas de forma independente. A resolução “*Full Frame*” é de 765×510 *pixels*, com cada *pixel* de tamanho 9 microns quadrados.

Os dois CCD (imagem e guiagem) incluem um obturador eletromecânico, conversor analógico-digital (A/D) de 16 *bits* para as imagens Dark e controle regulado de temperatura. O leitor pode obter mais informações em [53].

IV.2. Objeto de Estudo

A estrela WASP-2 A [54] é uma variável do tipo espectral K1.5 D [55], estudada na literatura desde 2007 [56]. Encontra-se localizada a cerca de 144,0 pc de distância na constelação de Delphinus, com raio $0,834 \pm 0,080 R_{\text{Sol}}$ [11], massa de $0,84 \pm 0,11 M_{\text{Jup}}$ [13] e temperatura efetiva de $5150,0 \pm 80,0$ K [57]. Possui um único exoplaneta descoberto em 2006 e confirmado pelo método de trânsito (WASP-2 A b), onde os principais parâmetros estão sumarizados na Tabela I. A Figura 11 ilustra o exoplaneta e o campo no CCD.

TABELA I. Caracterização observacional do exoplaneta. Fonte: Exoplanet EU [58]

Parâmetro	Valor	Autor
Massa	$0,84 \pm 0,11 M_{\text{Jup}}$	[13]
Semieixo maior	$0,03138 \pm 0,011$ UA	[59]
Período Orbital	$2,15222144 \pm 4e-07$ dias	[12]
Raio	$1,079 \pm 0,033 R_{\text{Jup}}$	[13]
Inclinação	$84,73 \pm 0,19$ graus	[57]

A escolha do objeto foi baseada em alguns critérios: coordenada equatorial favorável, relativamente brilhante para o conjunto CCD + telescópio (magnitude 11,98 V) e apresenta estrelas suficientemente brilhantes no campo para serem usadas como guiagem. Para as imagens binadas 2×2 , obtemos um campo de visada (FOV) de $9,5' \times 6,3'$ e uma escala de imagem de $1,48''$ /*pixel*.

V. SOBRE AS OBSERVAÇÕES, REDUÇÃO DOS DADOS E ANÁLISES PRELIMINARES

V.1. Dados Fotométricos

Os tempos de exposição com o filtro BB foram de 60 segundos, suficientes para chegar a um sinal-ruído da ordem de 100 e precisões

da ordem de 1 ou 2 milimagnitudes. As calibrações necessárias, *bias*, *dark* e *flat-field*, que têm por objetivo corrigir as imagens de eventuais ruídos e distorções devidos às características do detector, foram também tomadas no início e final das observações, preservando a mesma temperatura do CCD (-10° C).

As imagens *flat-field* foram tomadas com o telescópio apontado para uma superfície (tela) completamente uniforme e branca fixa no teto da cúpula, iluminada por uma lâmpada halógena. As contagens finais foram estabelecidas em 30% do nível de saturação do CCD (~ 65500 contagens), o que permite revelar interferências como poeira ou outras partículas que podem causar variação na resposta no CCD. As imagens *bias* e *dark* foram obtidas com o obturador fechado, com o menor tempo de exposição permitido para as primeiras (0, 12 s) e com o mesmo tempo das imagens de ciência (60 s). As imagens *dark* mostram a variação entre os pixels no CCD, causada pelo ruído térmico gerado pelo próprio CCD. Um conjunto de 30 imagens para cada calibração foram obtidas para o processamento final.

V.2. Fotometria Diferencial com o *MaxIm DL Pro Suite*: Metodologia

A Fotometria representa uma técnica que objetiva coletar fótons que são emitidos por objetos astronômicos. A coleta está associada a um detector (olho humano, CCD, etc.) que possui uma resposta ou eficiência quântica para detectar os fótons de luz.

A técnica da Fotometria Diferencial é bastante simples e possui uma grande vantagem: todas as estrelas a serem medidas (alvo, VB e as estrelas de comparação, C_i) estão dentro do mesmo campo de análise. Isto implica, por exemplo, uma velocidade no processamento e na análise dos dados. Além disso, implica diretamente na precisão dos dados, uma vez que pequenas alterações na transparência do céu são compensadas. As correções diferenciais de extinção também são geralmente insignificantes, devido à proximidade entre a estrela alvo e as

estrelas de comparação.

As observações foram tratadas com o pacote comercial *MaxIm DL Pro Suite* [60], que apresenta as mesmas tarefas fotométricas presentes no software IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility* [61]). No entanto, possui a vantagem de trazer uma estrutura muito amigável para a Fotometria Diferencial.

O *MaxIm DL Pro Suite* é um pacote criado pela *CyanogenImaging*, com o objetivo de processar imagens astronômicas. No caso da Fotometria, encontra-se disponível um conjunto de rotinas que permitem processar e analisar uma longa sequência de imagens e produzir rápidas curvas de luz. A Figura 12 ilustra um recorte do software com opção “*Photometry*”, usada para realizar a Fotometria Diferencial.

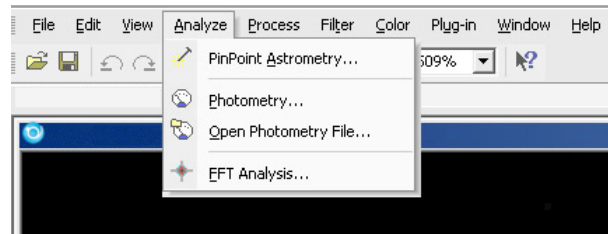


FIGURA 12. Recorte do software comercial MaxIm DL e das opções de Fotometria.

De forma simples, a análise diferencial é realizada sobre uma série temporal de imagens registradas continuamente ao longo da noite. Muitas vezes, as sequências de observações devem ser realizadas em diversas noites, com objetivo de determinar o período do exoplaneta, por exemplo. O propósito final é medir a variação de brilho da estrela (VB) hospedeira do(s) exoplaneta(s) no filtro observado. Esse procedimento é realizado comparando-se o fluxo da estrela alvo com uma ou mais estrelas de referência (estrelas de comparação, C_i) presentes no campo, onde esperamos que não apresentem modulações significativas no brilho durante o período analisado.

Nesse sentido, as diferenças de magnitude $VB-C_1$, C_2-C_1 , etc., em relação à estrela principal de comparação C_1 , podem ser determinadas e as mudanças na luminosidade VB reveladas. O restante das estrelas de comparação (C_2 , C_3 , etc.) é usado como estrela de verifica-

ção, para garantir que a variabilidade que estamos medindo seja efetivamente proveniente do alvo principal VB, e não de C_1 . A Figura 13 ilustra essa técnica, com a estrela alvo (1), de referência (2) e de verificação (3-6).

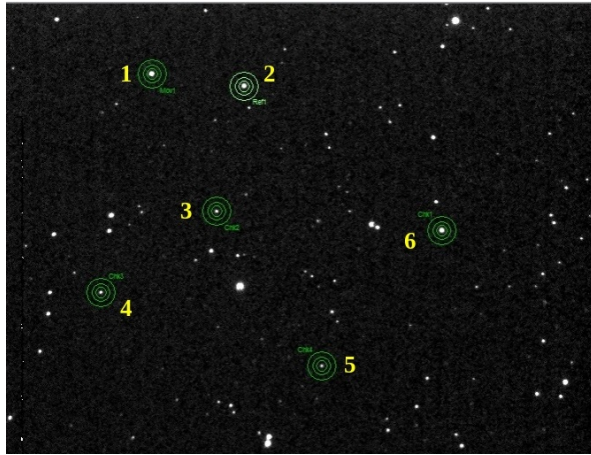


FIGURA 13. Exemplo do Fotometria Diferencial para um campo de estrelas: (1) alvo principal – exoplaneta WASP-2 A, (2) estrela de referência – Tycho 522-78-1 (magnitude 11,92 V) e (3-6) estrelas de verificação.

A metodologia do software para a Fotometria Diferencial é bastante simples e pode ser apresentada em três etapas:

(i) uma vez processadas, *bias*, *dark* e *flat*, o software realiza automaticamente o alinhamento de todas as imagens em relação ao primeiro campo observado;

(ii) na primeira imagem observada, o usuário seleciona o objeto principal (WASP-2 A, $ID = 1$) e define uma estrela de referência com a magnitude conhecida ($ID = 2$) e várias estrelas que servirão de verificação ($ID = 3 - 6$), conforme mostrado na Figura 13. Os raios de aberturas são também definidos pelo usuário e carregados diretamente em todas as imagens.

(iii) a partir do alinhamento e dos objetos definidos na primeira imagem, o software identifica os mesmos em todo o conjunto de imagens, compara as respectivas estrelas e fornece as curvas de luz para análise (Figura 14). O software automaticamente calcula o fluxo em cada abertura, subtrai o céu e fornece o gráfico com a curva de luz correspondente ao objeto principal escolhido e as demais estrelas de referência e de verificação.

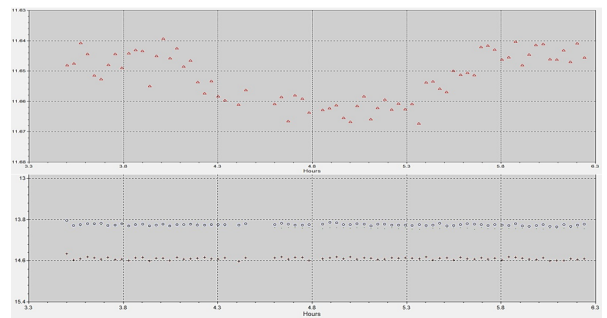


FIGURA 14. Curva de luz do exoplaneta WASP-2 A b (painel superior) e de duas estrelas de verificação 3 e 6 (painel inferior). No painel superior, verifica-se a variação de magnitude aparente (eixo y) em relação ao tempo de observação do trânsito (eixo x), não observada nas duas estrelas de verificação (praticamente constantes).

V.3. Análise Preliminar

Observar um exoplaneta não é uma tarefa trivial e, como descrito anteriormente, métodos diferenciados foram desenvolvidos para contornar tal dificuldade. Por exemplo, considerando apenas fatores geométricos inerentes às observações, ou seja, as possíveis inclinações orbitais em relação à linha de visada do observador, a probabilidade de ocorrência de trânsitos para um sistema formado por uma estrela de raio R e um exoplaneta situado a uma distância orbital d é igual a razão R/d , o que representa, de acordo com [62], uma fração da ordem de 4%.

A curva de luz para o exoplaneta foi obtida e representa o ponto máximo deste projeto de estudo de viabilidade. O método de trânsito é totalmente adequado para a nossa instrumentação e ratificou o papel de ser uma poderosa técnica para a descoberta de exoplanetas [63]. Algumas propriedades podem ser determinadas mediante uma Astrofísica bastante simplificada. Infelizmente, os nossos dados observacionais apenas cobriram um único trânsito, não permitindo, portanto, a determinação precisa do período do exoplaneta, o que limita a caracterização de alguns parâmetros fundamentais. Contudo, apresentamos algumas informações básicas que podem ser exploradas a partir das observações.

V.3.1. Raio do Exoplaneta

O trânsito planetário fornece a interpretação e os elementos necessários para a estimativa do raio do exoplaneta. Como o mesmo atravessa o disco estelar, uma parcela da luz correspondente a área superficial da estrela é bloqueada. Logo, a queda esperada em magnitude (Q_{mag}) durante o trânsito é, portanto, proporcional à razão entre o tamanho da estrela hospedeira (est) e o respectivo exoplaneta (exo), que pode ser expressa pela equação:

$$Q_{mag} = \frac{\pi R_{exo}^2}{\pi R_{est}^2} = \left(\frac{R_{exo}}{R_{est}} \right)^2. \quad (1)$$

Do exposto acima, se a queda em magnitude e o raio da estrela hospedeira são conhecidos, o raio do exoplaneta (R_{exo}) é então estimado pela relação acima. A partir do valor fornecido na literatura, $0,834 \pm 0,080 R_{Sol}$ [11], determinamos neste trabalho: $1,104 \pm 0,062 R_{Jup}$ para o exoplaneta. O valor de referência é $1,079 \pm 0,033 R_{Jup}$ [13].

V.3.2. Período Orbital

O período orbital (P_{exo}) representa um outro parâmetro que é determinado no trânsito planetário, associado ao tempo que o exoplaneta (ou um objeto astronômico) leva para completar uma órbita (revolução) em torno da estrela hospedeira (ou de um outro objeto). No entanto, necessitamos do semi-eixo maior da órbita do exoplaneta e empregamos, para isso, a 3ª lei de Kepler (Lei Harmônica, $P^2 = K a^3$) relativo ao movimento planetário generalizado por Newton, onde a constante na relação acima, $K = 4\pi^2/G(m_1 + m_2)$, é de fato considerada constante se as massas envolvidas ($m_1 + m_2$) forem constantes. Portanto:

$$P_{exo}^2 = \frac{4\pi^2 a_{exo}^2}{G(M_{est} + M_{exo})}, \quad (2)$$

com $G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ no Sistema Internacional de Unidades (SI).

O número de observações do mesmo trânsito (pelo menos 3) é importante para ratificar o período orbital do exoplaneta. No entanto, o grande problema reside, em determinadas épocas do ano, na continuidade das observações sem interrupções por causa das condições atmosféricas (cirrus, nuvens, umidade, vento forte, chuva, etc.). Logo, este parâmetro não foi estimado nesta análise.

V.3.3. Determinação da Massa

Em geral, tal como caracterizado em nosso Sistema Solar, a massa do exoplaneta é muito inferior à massa da estrela hospedeira. Neste caso, embora tenhamos mencionado acima o Sistema Internacional de Unidades, as massas são determinadas em unidades de massa solar (M_{\odot}), os períodos em anos e as distâncias envolvidas em unidades astronômicas (UA). Neste caso, o valor de G fica $4\pi^2$, de modo que a 3ª Lei de Kepler modificada por Newton passa a ser escrita na forma:

$$(M_{est} + M_{exo}) = a^3/P^2. \quad (3)$$

Como a massa do exoplaneta é muito inferior quando comparada com a massa da estrela hospedeira, a massa definida acima é, essencialmente, a massa da estrela M_{est} .

VI. CONCLUSÕES

O grande desafio deste projeto de Iniciação Científica foi a continuidade das observações sem as indesejáveis interrupções climáticas, essencialmente umidade, nuvens e chuva durante a cobertura do trânsito exoplanetário estudado. Contudo, uma única série de observações foi realizada, o que permitiu obter a assinatura do trânsito, ou seja, a estimativa da queda de magnitude na estrela monitorada WASP-2 A, permitindo atingir o propósito da investigação científica.

O objetivo deste trabalho foi o de apresentar o estudo de viabilidade para o início de um projeto de pesquisa visando a observação e a de-

teção de exoplanetas a partir das condições existentes no OAA/MACT. Além da instrumentação já apresentada, suficiente para este tipo de projeto, é importante destacar que o sítio observacional encontra-se dentro da cidade de Feira de Santana, que apresenta uma alta taxa de poluição luminosa. No entanto, projetos observacionais envolvendo estrelas brilhantes, a exemplo da variabilidade estelar – detecção de estrelas *Delta Scuti* com o telescópio CDk20 (50, 8 cm), já vem sendo realizados com os estudantes de Iniciação Científica e com resultados bastante promissores.

As observações apresentadas neste artigo, embora realizadas em condições atmosféricas menos favoráveis, foram satisfatórias para monitorar a estrela e verificar a presença do exoplaneta com o telescópio Meade de 10". Com a facilidade das previsões de trânsito para vários exoplanetas, iremos monitorar algumas estrelas ao longo de vários trânsitos para caracterizar, não apenas o(s) exoplaneta(s), mas também a

estrela hospedeira através da Fotometria UB-VRI (Sistema *Johnson-Cousins*).

As previsões do trânsito podem ser obtidas através de diferentes páginas da Internet [1], o que permite ajustar facilmente os tempos de início e de término das observações.

Finalmente, este trabalho de Iniciação Científica revelou de forma muito positiva a possibilidade de iniciar tal projeto de pesquisa, o que representa uma nova perspectiva não apenas para os estudantes da Graduação, mas também para a Educação Básica, como revelado na contribuição [64].

Agradecimentos

Este projeto de pesquisa foi desenvolvido durante o período da bolsa de Iniciação Científica concedida pelo CNPq/UEFS, através dos Editais realizados pela PPPG/UEFS. Os autores também agradecem a infraestrutura de suporte oferecida pelo OAA/MACT.

-
- [1] Informações gerais sobre os exoplanetas podem ser encontrados nas seguintes páginas da Internet: *Astro Swarthmore*, Disponível em: <https://astro.swarthmore.edu/transits/transits.cgi>; *Var2-Astro-Czechia*. Disponível em: <http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php>; *Exoplanet Archive*. Disponível em: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>; *ESO*. Disponível em: <https://www.eso.org/public/brazil/videos/archive/category/exoplanets/>; *Exoplanet EU*. Disponível em: <http://exoplanet.eu/>. Acessadas em 19 de novembro de 2021.
- [2] J.A. Orosz, W.F. Welsh, F. William, N. Haghighipour, *et al.*, *Discovery of a Third Transiting Planet in the Kepler-47 Circumbinary System*. *AJ* **157**, (5) 174 (2019).
- [3] A. Wolszczan, D.A. Frail, *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*. *Nature* **355**, (6356) 145 (1992).
- [4] J. Cortés, D. Kipping, *On the detectability of transiting planets orbiting white dwarfs using LSST*. *MNRAS* **488**, (2) 1695 (2019).
- [5] *How Many Stars in the Milky Way?*. NASA Blueshift. Archived from the original on January 25, (2016).
- [6] Segundo os dados compilados pela *New Horizons*. Disponível em: *New Horizons Mission*. Página da Internet: https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html. Acessada em 19 de novembro de 2021.
- [7] M. Mayor, D. Queloz, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. *Nature* **378**, (6555) 355 (1995).
- [8] R. D. Wordsworth, F. François, F. Selsis, E. Millour, B. Charnay, J-B. Madeleine, *Gliese 581D is the first discovered terrestrial-mass exoplanet in the habitable zone*. *ApJ* **733**, (2) L48 (2011).
- [9] K. de Oliveira, M.F. Saraiva, *Astronomia & Astrofísica*. 3ª Edição. São Paulo: Editora Livraria da Física (2014).
- [10] D. Charbonneau, J.N. Winn, M.E. Everett, D.W. Latham, M.J. Holman, G.A. Esquerdo, F.T. O'Donovan, *Precise Radius Estimates for the Exoplanets WASP-1b and WASP-2b*. *ApJ* **658**, (2) 1322 (2007).
- [11] A. Collier Cameron, F. Bouchy, G. Hébrard, P. Maxted, D. Pollacco, *et al.*, *WASP-1b and WASP-2b: two new transiting exoplanets detected with SuperWASP and SOPHIE*. *MNRAS* **375**, (3) 951 (2007).
- [12] S. Albrecht, J.N. Winn, J.A. Johnson, R.P. Butler, J.F. Crane, S.A. Shectman, I.B.

- Thompson, N. Narita, B. Sato, T. Hirano, K. Enya, D. Fischer, *Two Upper Limits on the Rossiter-McLaughlin Effect, with Differing Implications: WASP-1 has a High Obliquity and WASP-2 is Indeterminate*. *ApJ* **738**, (1) 50 (2011).
- [13] J. Southworth, *Homogeneous studies of transiting extrasolar planets - III. Additional planets and stellar models*. *MNRAS* **408**, (3) 1689 (2010).
- [14] Disponível em: Exoplanet IPAC. Página da Internet: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/IcePlotter/nph-icePlotInit?mode=demo&set=confirmed>. Acessada em 19 de novembro de 2021.
- [15] Disponível em: Exoplanets NASA. Página da Internet: <https://exoplanets.nasa.gov>. Acessada em 19 de novembro de 2021.
- [16] S. Söderhjelm, *Visual binary orbits and masses POST HIPPARCOS*. *APP*, **341**, (121) (1999).
- [17] X. Dumusque, F. Pepe, C. Lovis, D. Ségransan, J. Sahlmann, W. Benz, F. Bouchy, M. Mayor, D. Queloz, N. Santos, S. Udry, *An Earth-mass planet orbiting α Centauri B*. *Nature* **491**, (7423) 207 (2012).
- [18] V. Rajpaul, S. Aigrain, S. Roberts, *Ghost in the time series: no planet for Alpha Cen B*. *MNRAS* **456**, (1) L6 (2016).
- [19] B-O. Demory, D. Ehrenreich, D. Queloz, S. Seager, R. Gilliland, W.J. Chaplin, C. Proffitt, M. Gillon, M.N. Günther, B. Benneke, X. Dumusque, C. Lovis, F. Pepe, D. Ségransan, A. Triaud, S. Udry, *Hubble Space Telescope search for the transit of the Earth-mass exoplanet α Centauri B b*. *MNRAS* **450**, (2) 2043 (2015).
- [20] G. Anglada-Escudé, P.J. Amado, J. Barnes, Z.M. Berdiñas, R.P. Butler, G.A.L. Coleman, et al., *A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri*. *Nature* **536**, (7617) 437 (2016).
- [21] A. Suárez Mascareño, J.P. Faria, P. Figueira, C. Lovis, M. Damasso, J.I. González Hernández, et al., *Revisiting Proxima with ESPRESSO*. *AAP* **639**, (A77) A77 (2020).
- [22] M. Damasso, F. Del Sordo, G. Anglada-Escudé, P. Giacobbe, A. Sozzetti, A. Morbidelli, et al., *A low-mass planet candidate orbiting Proxima Centauri at a distance of 1.5 AU*. *Science Advances* **6**, (3) 7467 (2020).
- [23] G.F. Benedict, B.E.J. McArthur, *A Moving – Revising the Mass of Proxima Centauri c*. *Research Notes of the American Astronomical Society* **4**, (6) 86 (2020).
- [24] P. Kervella, F. Arenou, J. Schneider, *Orbital inclination and mass of the exoplanet candidate Proxima c*. *AAP* **635**, (L14), L14 (2020).
- [25] K. Wagner, A. Boehle, P. Pathak, M. Kasper, R. Arsenault, G. Jakob, et al., *Imaging low-mass planets within the habitable zone of α Centauri*. *Nature Communications* **12**, 922 (2021)
- [26] Disponível em: *Exoplanet EU*. Página da Internet: <https://exoplanet.eu/>. Acessada em 19 de novembro de 2021.
- [27] Disponível em: Exoplanet IPAC. Página da Internet: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/imaging.html>. Acessada em: 19 de novembro de 2021.
- [28] T. Currie, A. Burrows, N. Madhusudhan, M. Fukagawa, J.H. Girard, R. Dawson, R. Murray-Clay, S. Kenyon, M. Kuchner, S. Matsumura, R. Jayawardhana, J. Chambers, B. Bromley, *A Combined Very Large Telescope and Gemini Study of the Atmosphere of the Directly Imaged Planet, β Pictoris b*. *ApJ* **776**, (1) 15 (2013).
- [29] T. Currie, S. Daemgen, J. Debes, D. Lafreniere, Y. Itoh, R. Jayawardhana, T. Ratzka, S. Correia, *Direct Imaging and Spectroscopy of a Candidate Companion Below/Near the Deuterium-burning Limit in the Young Binary Star System, ROXs 42B*. *ApJL* **780**, (2) L30 (2014).
- [30] J.R. Males, L.M. Close, K.M. Morzinski, Z. Wahhaj, M.C. Liu, A.J. Skemer, and 17 more co-authors, *Magellan Adaptive Optics First-light Observations of the Exoplanet β Pic B. I. Direct Imaging in the Far-red Optical with MagAO+VisAO and in the Near-ir with NICI*. *ApJ* **786**, (1) 32 (2014)
- [31] A.J. Skemer, M.K. Marley, P.M. Hinz, K.M. Morzinski, M.F. Skrutskie, and 13 more co-authors, *Directly Imaged L-T Transition Exoplanets in the Mid-infrared*. *ApJ* **792**, (1) 17 (2014).
- [32] K.M. Morzinski, J.R. Males, A.J. Skemer, M.L. Close, P.M. Hinz, T.J. Rodigas, A. Puglisi, S. Esposito, A. Riccardi, E. Pinna, M. Xompero, R. Briguglio, V. Bailey, K.B. Follette, D. Kopon, A.J. Weinberger, Y-L Wu, *Magellan Adaptive Optics First-light Observations of the Exoplanet β Pic b. II. 3-5 μ m Direct Imaging with MagAO+Clio, and the Empirical Bolometric Luminosity of a Self-luminous Giant Planet*. *ApJ* **815**, (2) 108 (2015).
- [33] C. Marois, B. Macintosh, T. Barman, B. Zuckerman, I. Song, J. Patience, D. Lafrenière, R. Doyon, *Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799*. *Science* **322**, (5906)

- 1348 (2008).
- [34] C. Marois, N. Zuckerman, Q.M. Konopacky, B. Macintosh, T. Barman, *Images of a fourth planet orbiting HR 8799*. *Nature* **468**, (7327) 1080 (2010).
- [35] D.A. Fischer, A.W. Howard, G.P. Laughlin, B. Macintosh, S. Mahadevan, S. J. Sahlmann, J.C. Yee, *Exoplanet Detection Techniques*. Protostars and Planets VI, Editor H. Beuther, R.S. Klessen, C. Dullemond, P. Cornelis, T. Henning, 715p. (2014).
- [36] Disponível em: Exoplanet EU. Página da Internet: <https://exoplanet.eu/>. Acessada em 19 de novembro de 2021.
- [37] R.G.G. Amorim, W.C. Santos, *Determinação da Massa e Dados Orbitais de Exoplanetas pelo Método Doppler*. *Rev. Bras. Ens. Fis.* **39**, (1) e1310 (2017).
- [38] G.F. Benedict, B.E. McArthur, T. Forveille, et al., *A Mass for the Extrasolar Planet Gliese 876b Determined from Hubble Space Telescope Fine Guidance Sensor 3 Astrometry and High-Precision Radial Velocities*. *ApJ* **581**, (2) L115 (2002).
- [39] GAIA at ESA. Disponível em: <https://sci.esa.int/web/gaia>. Acessada em: 19 de novembro de 2021.
- [40] S. Liebes, *Gravitational Lenses*. *Physical Review* **133**, (3B) 835 (1964).
- [41] Disponível em: Astronomy at Ohio. Página da Internet: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~microfun/>. Acessada em: 19 de novembro de 2021.
- [42] R. Alonso, T.M. Brown, G. Torres, D.W. Latham, A. Sozzetti, G. Mandushev, J.A. Belmonte, D. Charbonneau, H.J. Deeg, E.W. Dunham, T. Francis, R.P. Stefanik, *TrES-1: The Transiting Planet of a Bright K0 V Star*. *ApJL* **613**, (2) L153 (2006).
- [43] M.J. Holman, J.N. Winn, D.W. Latham, F.T. O'Donovan, D. Charbonneau, G.A. Bakos, G.A. Esquerdo, C. Hergenrother, M.E. Everett, A. Pál, *The Transit Light Curve Project. I. Four Consecutive Transits of the Exoplanet XO-1b*. *ApJ* **652**, (2) 1715 (2006).
- [44] P.R. McCullough, J.E. Stys, J.A. Valenti, C.M. Johns-Krull, K.A. Janes, J.N. Heasley, B.A. Bye, C. Dodd, S.W. Fleming, A. Pinnick, R. Bissinger, B.L. Gary, P.J. Howell, T. Vanmunster, *A Transiting Planet of a Sun-like Star*. *ApJ* **648**, (2) 1228 (2006).
- [45] F.T. O'Donovan, D. Charbonneau, G. Mandushev, E.W. Dunham, D.W. Latham, et al., *TrES-2: The First Transiting Planet in the Kepler Field*. *ApJL* **651**, (1) L61 (2006).
- [46] G.A. Bakos, H. Knutson, F. Pont, C. Moutou, D. Charbonneau, A. Shporer, F. Bouchy, M. Everett, C. Hergenrother, D.W. Latham, M. Mayor, T. Mazeh, R.W. Noyes, D. Queloz, A. Pál, S. Udry, *Refined Parameters of the Planet Orbiting HD 189733*. *ApJ* **650**, (2) 1160 (2006).
- [47] Disponível em: NASA Microlensing. Página da Internet: <https://exoplanets.nasa.gov/resources/53/extrasolar-planet-detected-by-gravitational-microlensing/>. Acessada em: 19 de novembro de 2021.
- [48] TRAPPIST at Université de Liège. Página da Internet: https://www.trappist.uliege.be/cms/c_-5006023/fr/trappist. Acessada em: 19 de novembro de 2021.
- [49] D.L. Pollacco, I. Skillen, A. Collier Cameron, D.J. Christian, C. Hellier, J. Irwin, T.A. Lister, et al., *The WASP Project and the SuperWASP Cameras*. *PASP* **118**, 848 (1407) (2006).
- [50] G.A. Bakos, J. Lázár, I. Papp, P. Sári, E.M. Green, *System Description and First Light Curves of the Hungarian Automated Telescope, an Autonomous Observatory for Variability Search*. *PASP* **114**, (799) 974 (2002).
- [51] Disponível em: Far Point Astro. Página da Internet: <https://farpointastro.com/collections/exoplanet/products/astrodon-exoplanet-light-curve-filters>. Acessada em 19 de novembro de 2021.
- [52] Disponível em: Meade. Página da Internet: <http://www.meade.com>. Acessada em 19 de novembro de 2021.
- [53] Disponível em: Company7. Página da Internet: <http://www.company7.com/sbig/products/st7.html>. Acessada em: 19 de novembro de 2021.
- [54] $RA_{2000} = 20^h : 30^m : 54.0^s$,
 $DEC_{2000} = +06^\circ : 25' : 46''$.
- [55] C. Bergfors, W. Brandner, S. Daemgen, B. Biller, S. Hippler, M. Janson, N. Kudryavtseva, K. Geißler, T. Henning, R. Köhler, *Stellar companions to exoplanet host stars: Lucky Imaging of transiting planet hosts*. *MNRAS* **428**, (1) 182 (2013).
- [56] N. Narita, K. Enya, B. Sato, Y. Ohta, J.N. Winn, Y. Suto, A. Taruya, E.L. Turner, W. Aoki, M. Yoshii, T. Yamada, Y. Tamura, *Measurement of the Rossiter-Laughlin Effect in the Transiting Exoplanetary System TrES-1*. *PASJ* **59**, (763) (2007).
- [57] A.H.M.J. Triaud, A. Collier Cameron, D. Queloz, D.R. Anderson, M. Gillon, L. Hebb, C. Hellier, B. Loeillet, P.F.L. Maxted, M.

- Mayor, F. Pepe, D. Pollacco, D. Ségransan, B. Smalley, S. Udry, R.G. West, P.J. Wheatley, *Spin-orbit angle measurements for six southern transiting planets*. New insights into the dynamical origins of hot Jupiters. AAP **524**, (A25) (2007).
- [58] Disponível em: Exoplanet EU. Página da Internet: http://exoplanet.eu/catalog/wasp-2_a_b/. Acessada em: 19 de novembro de 2021.
- [59] S. Daemgen, F. Hormuth, W. Brandner, C. Bergfors, M. Janson, S. Hippler, T. Henning, *Binariness of transit host stars. Implications for planetary parameters*. AAP **498**, (2) 567 (2009).
- [60] Disponível em: Diffraction Limited. Página da Internet: <https://diffractionlimited.com/production/maxim-dl/>. Acessada em: 19 de novembro de 2021.
- [61] Astronomy at NOAO. Página de Internet: <http://ast.noao.edu/data/software>. Acessada em 19 de novembro de 2021.
- [62] A. Hale, L. Doyle, *The photometric Method of Extrasolar Planet Detection Revisited*. ApSS **212**, (1-2) 335 (1994).
- [63] W.C. Santos, R.G.G. Amorim, *Descobertas de exoplanetas pelo método do trânsito*. Rev. Bras. Ens. Fis. **39**, (2) e2308 (2017).
- [64] A.P. Lenchuk, A.M. Ferreira, D.B. Vettoraci, L.C. Bayerl, R.T. Gomes, *Como identificar exoplanetas*. Cadernos de Astronomia **2**, (1) 187 (2021).