

Caracterização da Atmosfera de Exoplanetas do Tipo Hot-Júpiters via Espectrofotometria Diferencial do Trânsito

Marcos Felipe Faria Terra Siqueira

Dissertação apresentada
para obtenção do título
Mestre em Física

Orientador : Prof. Dr. Oscar Cavichia de Moraes

Coorientador : Prof. Dr. Gabriel Rodrigues Hickel

Instituto de Física e Química
Universidade Federal de Itajubá

Itajubá
Janeiro 2020

Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro fornecido ao projeto, ao Laboratório Nacional de Astrofísica por disponibilizar as capacidades do Observatório do Pico dos Dias para aquisição dos dados, ao orientador Prof. Dr. Oscar Cavichia de Moraes pelo suporte ao fornecido ao projeto, ao coorientador Prof. Dr. Gabriel Rodrigues Hickel pela proposição do projeto e por acreditar em minha capacidade para o desenvolvimento do mesmo, e por fim, a Universidade Federal de Itajubá pelo amparo e excelência na formação de seus profissionais.

Resumo

A espectrofotometria diferencial do trânsito de exoplanetas tipo Hot-Júpiter tem se mostrado uma técnica promissora para a caracterização da atmosfera desses planetas, sem a necessidade de resolvê-lo espacialmente de sua estrela hospedeira. O aprimoramento dessa técnica na última década possibilitou a obtenção de espectros de transmissão em telescópios cada vez menores, como o NOT 2.4m. Motivado por esses resultados, o presente trabalho busca testar a viabilidade da caracterização de atmosferas utilizando essa técnica no telescópio Perkin-Elmer 1.6m, baseado em observações realizadas no OPD-LNA. As curvas de luz obtidas para os objetos acompanhados apresentaram uma dispersão da ordem da profundidade de trânsito, possivelmente gerada pela oscilação dos objetos na fenda em conjunto com noites desfavoráveis. Através da combinação dos espectros, foi possível gerar o espectro de transmissão do WASP-87b. Os modelos atmosféricos ajustados aos dados indicam uma atmosfera rica em oxigênio ($C/O < 1$), com forte *haze* e evidências de estruturas de absorção de TiO e VO, que a temperaturas acima de 2000K, suprimem as linhas de absorção do Na e K. Esse resultado individual não é o suficiente para confirmar a eficácia do método, e novas observações devem ser realizadas visando compreender melhor erros sistemáticos e restringir os limites de sua aplicabilidade.

Abstract

Differential spectrophotometry of transiting Hot-Júpiteres has shown to be a promising technique to characterize the upper atmosphere of these planets, without the necessity of spatially resolving it from its host star. The enhancement of this technique in the last decade allowed the achievement of transmission spectra in smaller telescopes, like the NOT 2.4m. Motivated by these results, this work aims to test the viability of characterizing exoplanetary atmospheres applying this technique in the 1.6m Perkin Elmer telescope, based in observations performed in OPD-LNA. The light curves obtained for the monitored objects showed a dispersion in the order of the transit depth, possibly generated by the oscillation of the objects in the slit together with unfavorable nights. Through the combination of the acquired spectra, it was possible to generate the transmission spectrum of the WASP-87b. The atmospheric models adjusted to the data indicate an oxygen-rich atmosphere ($C/O < 1$), with strong haze and evidence of TiO and VO absorber structures, which at temperatures above 2000K, suppress the Na and K absorption lines. This individual result is not enough to confirm the effectiveness of the method, and new observations must be made in order to better understand systemic errors and restrict the limits of its applicability

Sumário

1	Introdução	6
1.1	Hot-Júpiters	7
1.2	Trânsito e Curva de Luz	9
1.3	Espectrofotometria Diferencial e o Espectro de Transmissão	11
1.4	Modelagem Atmosférica	13
1.5	Estado da Arte do Método	15
2	Metodologia	18
2.1	Aquisição dos Dados	18
2.2	Redução dos Dados	22
2.3	Curvas de Luz	28
2.3.1	Ajuste das Curvas de luz	28
2.4	Espectro de Transmissão	30
2.4.1	Amplitude das Estruturas de absorção	31
2.5	Modelagem Atmosférica	32
3	Resultados e Discussão	36

3.1	Curvas Ajustadas com o ETD	41
3.2	Análise da Dispersão dos Dados	45
3.3	Caracterização Atmosférica	47
4	Conclusão	55
4.1	Curvas de Luz	55
4.2	Parâmetros Atmosféricos	56
4.3	Panorama Geral do Projeto de Pesquisa	57

Capítulo 1

Introdução

O estudo de planetas extrasolares, ou exoplanetas, é uma das áreas de pesquisa mais dinâmicas e crescentes na astronomia desde a primeira detecção confirmada desses objetos, em 1995 (Mayor and Queloz, 1995). A descoberta dos exoplanetas revelou uma inesperada diversidade de sistemas planetários e contribuiu no aprimoramento da teoria de formação e evolução planetária, até então baseada nos planetas do sistema solar. Dentre os 4116 exoplanetas confirmados¹, 1214 são do tipo Hot-Júpiter, que são gigantes gasosos com tamanhos semelhantes a Júpiter, porém com atmosferas infladas e órbitas muito próximas de suas estrelas hospedeiras, da ordem de 0.1 UA. Devido à extensão de suas atmosferas, eles se tornam favoráveis a detecção e caracterização durante o trânsito, onde parte da luz da estrela hospedeira é absorvida e espalhada por sua atmosfera. Isso resulta em uma variação de seu raio observado em função do comprimento de onda, devido aos gases e aerossóis que compõem essas atmosferas, sendo que estas características ficam impregnadas no espectro estelar. Através da técnica da espectrofotometria, é possível extrair o espectro de transmissão da atmosfera desses objetos. Com o auxílio de modelos computacionais, pode-se obter os tipos de espalhamento predominantes, a presença de nuvens e aerossóis, evidências de elementos absorvedores e fornecer meios de análise dos mecanismos de formação e evolução de Hot-Júpiter. (Madhusudhan et al., 2014a)

Devido a limitações instrumentais, a caracterização da atmosfera de exoplanetas é uma linha de pesquisa recente, ainda em seus primeiros estágios.

¹Acessado em 01/02/2020. Disponível em: <https://exoplanets.nasa.gov/>

Quando realizada, utiliza-se da capacidade instrumental de médios e grandes telescópios terrestres como o GTC (Chen et al., 2018), GEMINI (Gibson et al., 2013), Keck (Teske et al., 2019) e VLT (Sedaghati et al., 2017), ou telescópios espaciais, como o HST (Fischer et al., 2016) e SPITZER (Gillon et al., 2014). A dificuldade em caracterizar essas atmosferas se deve ao fato de que, durante o trânsito de um Hot-Júpiter, há uma queda em torno de 1% do fluxo da estrela. Para se detectar e fazer medidas com variações dessa magnitude através da espectroscopia é necessário alcançar uma alta relação Sinal-Ruído (S/R), com longos tempos de exposição e noites de ótima qualidade. Entretanto, como há uma limitação temporal do evento, longos tempos de exposição acabam dificultando uma amostragem adequada do trânsito, surgindo então a necessidade de recorrer a grandes telescópios para otimizar essa cobertura temporal do evento.

Com a técnica da espectrofotometria diferencial, onde se utiliza uma estrela do campo como comparação, é possível minimizar efeitos relativos a variações da noite que alterem o fluxo dos objetos, como cirrus, extinção atmosférica, variação do seeing e massa de ar, entre outros. Assim, é possível utilizar sítios de observação com noites de menor qualidade e ainda assim obter dados capazes de fornecer o espectro de transmissão de Hot-Júpiters. Deste modo, este projeto se propõe a avaliar esta técnica com a instrumentação disponível no Observatório do Pico dos Dias (OPD-LNA; o espectrógrafo *Cassegrain* acoplado ao telescópio Perkin Elmer - 1.6m), com o intuito de obter espectros ópticos de transmissão para Hot-Júpiters.

1.1 Hot-Júpiters

Antes da detecção do primeiro exoplaneta na década de 90, os modelos de formação e evolução planetária, como a instabilidade do disco e acréscimo hierárquico de matéria a partir de planetesimais, foram desenvolvidos com base no sistema solar (Matsuo et al., 2007). Entretanto, após a descoberta de uma quantidade substancial de exoplanetas do tipo Hot-Júpiters com órbitas extremamente pequenas e períodos de dias ou horas, notou-se que o sistema solar era diferenciado, gerando a necessidade de reavaliar os modelos de formação planetária. Os Hot-Júpiters se tornaram então um objeto de estudo fundamental para a melhor compreensão dos processos de formação planetária e aperfeiçoamento dos modelos

padrão.

Na tentativa de explicar as pequenas órbitas dos Hot-Júpiter, o modelo dos ciclos de Kozai (*Kozai Cycles with Tidal Friction*) foi sugerido por Fabrycky et al. (2007), onde os gigantes gasosos se formam em órbitas distantes e migram para órbitas menores ao longo de sua evolução. Nesse modelo, um gigante gasoso em uma órbita distante, de baixa excentricidade ($e < 0,1$) e longo período, sofre perturbações gravitacionais devido a estrelas e planetas vizinhos, aumentando assim a excentricidade de sua órbita ($e > 0,5$). Durante o periélio dessa órbita altamente excêntrica, a força de fricção de maré faz com que o planeta perca energia orbital, diminuindo assim o semieixo maior e a excentricidade de sua órbita ao longo do tempo, resultando em uma órbita pequena, quase circular, e de curto período (fig. 1.1). O Hot-Júpiter HD 80606b corrobora com esse modelo e acredita-se que ele está nas últimas fases do ciclo de Kozai, migrando de uma órbita distante, de longo período (111,4 dias) e extremamente excêntrica ($e = 0,934$) para uma órbita pequena, de baixa excentricidade e curto período

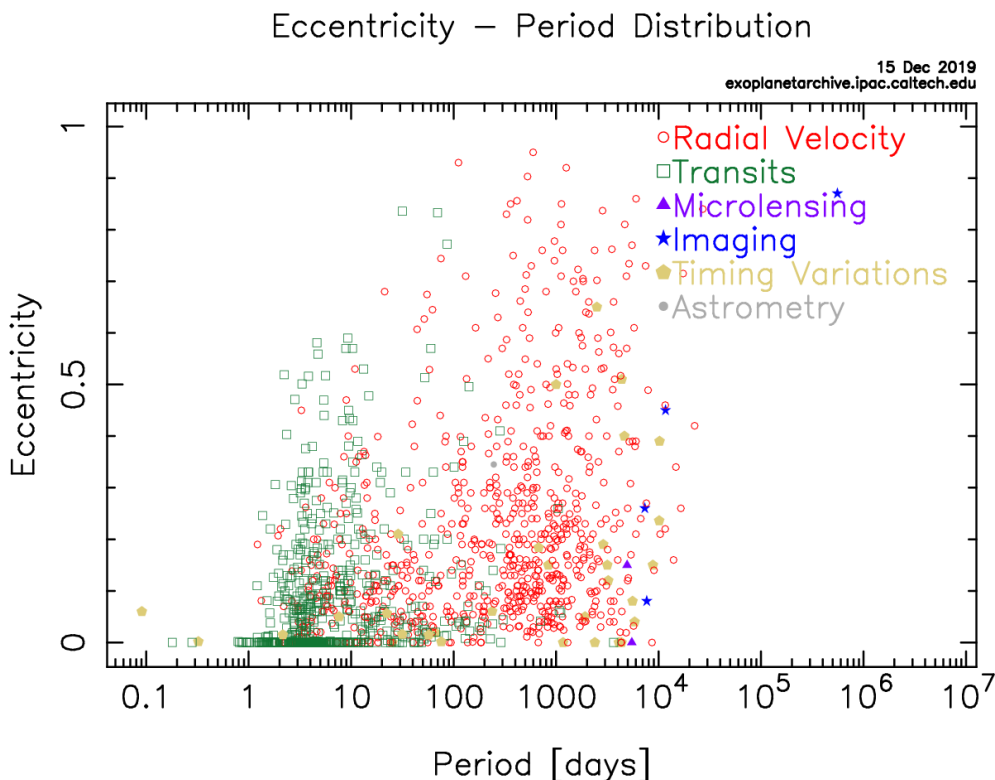


Figura 1.1: Relação entre *Excentricidade* e *Período* para todos os exoplanetas confirmados com excentricidades conhecidas. O método de detecção é simbolizado pela cor e formato dos pontos, segundo a legenda no gráfico. É possível notar uma tendência do aumento da excentricidade com o período, como sugerido por Fabrycky et al. (2007). *Créditos:* NASA².

(de Wit et al., 2016).

A sincronia entre translação e rotação devido às forças de maré em grande parte dos Hot-Júpiter, ocasionam em um dia permanente na face interior à órbita e uma noite permanente na face oposta. Somado a proximidade com sua estrela hospedeira, geralmente menor que 0.1 UA, espera-se temperaturas de equilíbrio entre 1300K e 3000K (Madhusudhan et al., 2014a) em suas atmosferas. Também são previstos fortes ventos longitudinais na região do equador, da ordem da velocidade do som (Cooper and Showman, 2005; Dobbs-Dixon and Agol, 2013).

1.2 Trânsito e Curva de Luz

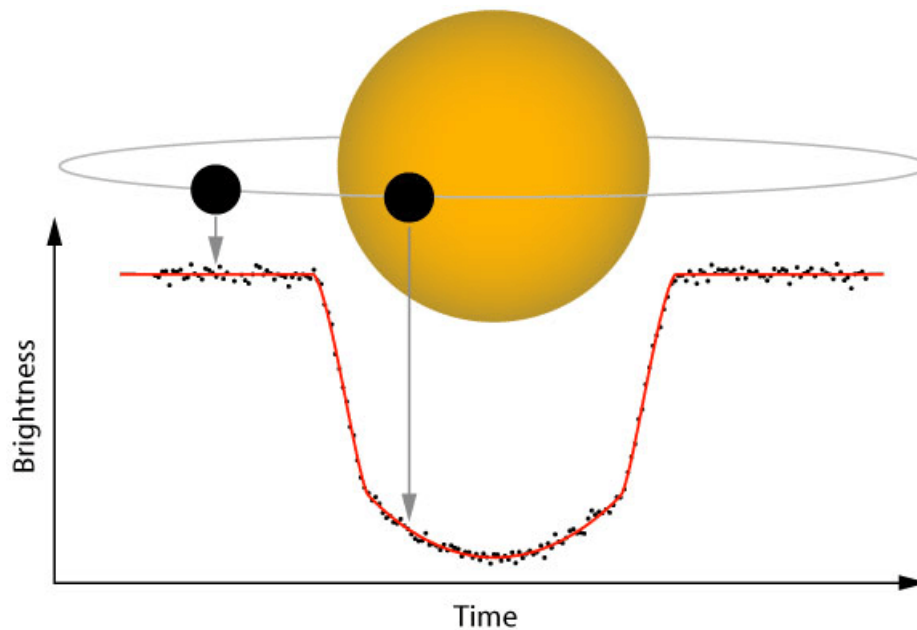


Figura 1.2: Representação da curva de luz gerada pelo trânsito de um exoplaneta. *Créditos:* Paul Anthony Wilson³.

O trânsito ocorre quando um exoplaneta passa na linha de visada entre um observador e sua estrela hospedeira, bloqueando parte de sua luz. Os trânsitos tem ocorrência cíclica, conforme o período orbital do exoplaneta (fig.1.2). A queda do fluxo da estrela, ou profundidade de trânsito (δ) é proporcional ao tamanho

²Nasa Exoplanet Archive. Acessado em 15/12/2019. Disponível em <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>

do exoplaneta, da seguinte forma:

$$\delta = \frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_\star^2} \quad (1.1)$$

onde R_p e R_\star são os raios do exoplaneta e da estrela hospedeira respectivamente (Winn, 2010). A eq.1.1 é válida para uma primeira aproximação desconsiderando os efeitos do escurecimento da borda da estrela (*limb darkening*). Para estimar o raio do exoplaneta é necessário conhecer o raio da estrela. A distância entre a estrela e o exoplaneta não interfere na queda de brilho, pois estes sistemas estão a distâncias muito maiores do observador. Há diversos fatores que contribuem no perfil da curva de luz, sendo os principais deles o tamanho e tipo do exoplaneta, a inclinação e excentricidade de sua órbita (parâmetro de impacto), e o escurecimento da borda estelar.

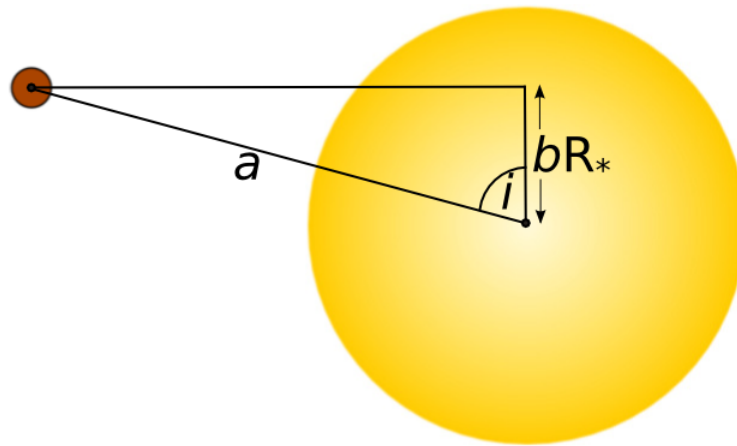


Figura 1.3: Representação do parâmetro de impacto b , inclinação da órbita i e semi-eixo maior a durante um trânsito. b varia de 0 (centro da estrela) a 1 (borda da estrela). *Créditos:* Paul Anthony Wilson.

O parâmetro de impacto b é a distância mínima relativa entre os centros geométricos projetados do exoplaneta e da estrela hospedeira, em unidades do raio da estrela (R_\star), medido no instante da conjunção, conforme descreve a equação:

$$b = \frac{a \cos i}{R_\star} \left(\frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \right) \quad (1.2)$$

onde a é o semi-eixo maior da projeção e i é a inclinação da órbita (Winn, 2010). O termo entre parênteses é uma correção para a excentricidade e da órbita, onde

³The Exoplanet Transit Method. Acessado em 17/04/2019. Disponível em <https://www.paulanthonywilson.com/exoplanets/exoplanet-detection-techniques/the-exoplanet-transit-method/>

ω é o ângulo polar da órbita. Como a excentricidade típica dos Hot-Júpiteres é ~ 0 , esse termo desaparece e o parâmetro de impacto fica apenas $a \cos(i)/R_*$.

O escurecimento da borda estelar ou escurecimento de limbo (*limb darkening*) é o decréscimo gradual do brilho superficial estelar projetado, quando se observa de centro geométrico para a borda do disco estelar. Isso ocorre devido ao gradiente radial de temperatura do plasma, nas camadas mais externas das estrelas. No centro do disco estelar, um observador vê as camadas mais profundas e quentes que emitem radiação, enquanto que nas bordas, apenas as camadas superiores, mais frias e que emitem menos radiação serão vistas. Na figura 1.4 é mostrado a variação do perfil da curva de luz em função do parâmetro de impacto b com e sem *limb darkening*.

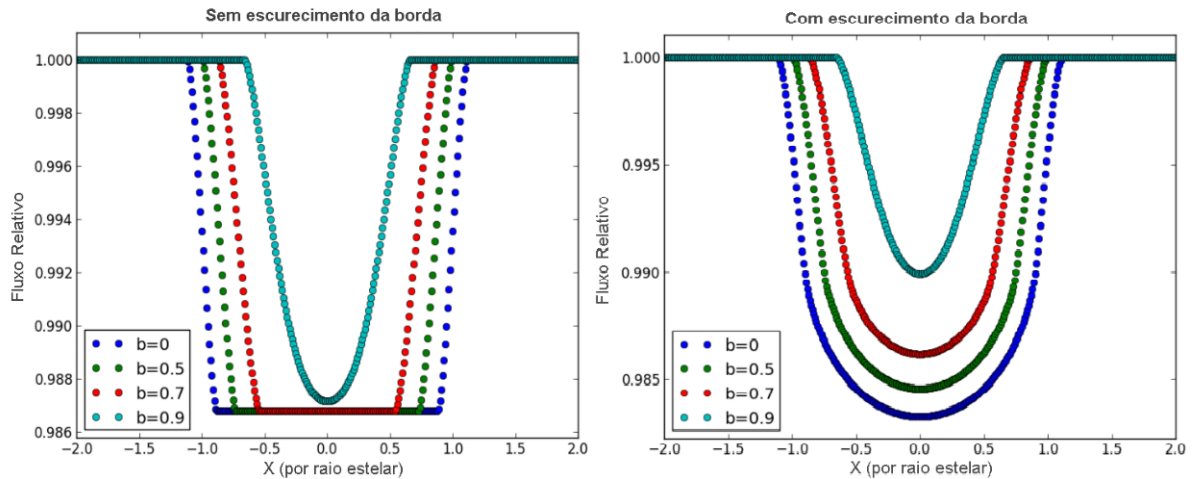


Figura 1.4: Perfil da curva de luz com (direita) e sem (esquerda) *limb darkening*. O parâmetro de impacto b varia de 0 (trânsito no centro do disco) a 1 (trânsito na borda do disco). *Créditos:* Meg⁴.

1.3 Espectrofotometria Diferencial e o Espectro de Transmissão

Durante o trânsito, a atmosfera dos Hot-Júpiteres absorve e espalha radiações de frequências distintas de acordo com os elementos e moléculas que as compõem. Desse modo, em uma determinada faixa do espectro eletromagnético onde há maior absorção da radiação pela atmosfera, a curva de luz terá uma profundidade

⁴What factors impact transit shape. Acessado em 10/12/2019. Disponível em <https://blog.planethunters.org/2013/01/21/what-factors-impact-transit-shape/>

maior, ou equivalentemente, o Hot-Júpiter terá uma opacidade maior. Medindo a absorção da atmosfera do Hot-Júpiter em função do comprimento de onda, obtém-se o chamado espectro de transmissão de sua atmosfera. A escala de medida dessa absorção geralmente é encontrada na literatura como o raio do planeta dividido pelo raio da estrela, R_p/R_\star .

Uma das técnicas utilizadas para se obter o espectro de transmissão da atmosfera de Hot-Júpiters é a espectrofotometria diferencial, onde se toma medidas do espectro da estrela alvo (hospedeira do Hot-Júpiter) antes, durante e depois do trânsito, e simultaneamente de uma estrela de comparação não variável (fig. 1.5). O objetivo de se utilizar uma estrela de comparação é de minimizar eventuais efeitos atmosféricos que alterem o fluxo da estrela alvo, como passagem de nuvens, extinção atmosférica, variações no seeing, entre outros. Uma vez que as medidas são simultâneas, ambas estrelas estarão sujeitas à mesma variação (fig. 1.6).

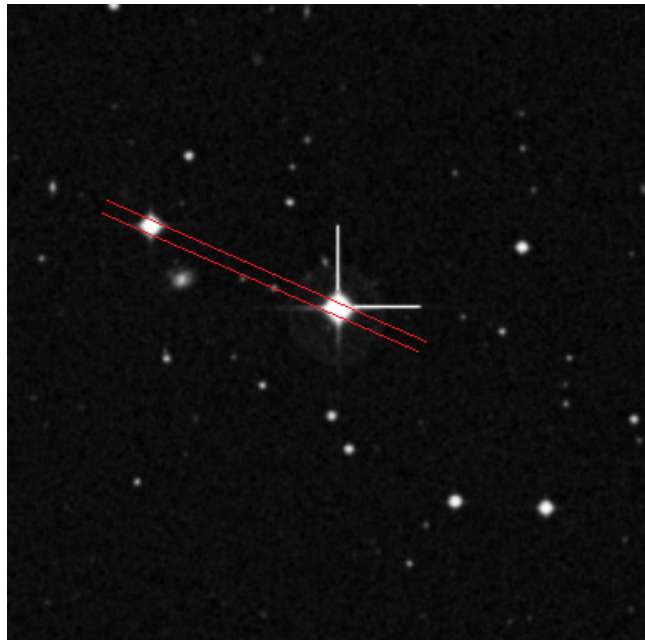


Figura 1.5: Representação da técnica utilizada, com a estrela alvo (centro) e a estrela de comparação (esquerda) dentro da fenda.

O espectro de transmissão da atmosfera de um exoplaneta pode ser obtido dividindo o espectro da estrela hospedeira em *bins* (bandas), semelhantes a filtros fotométricos, e medindo a queda no fluxo em cada um desses bins durante o trânsito, que será associada a absorção da atmosfera do Hot-Júpiter, em função

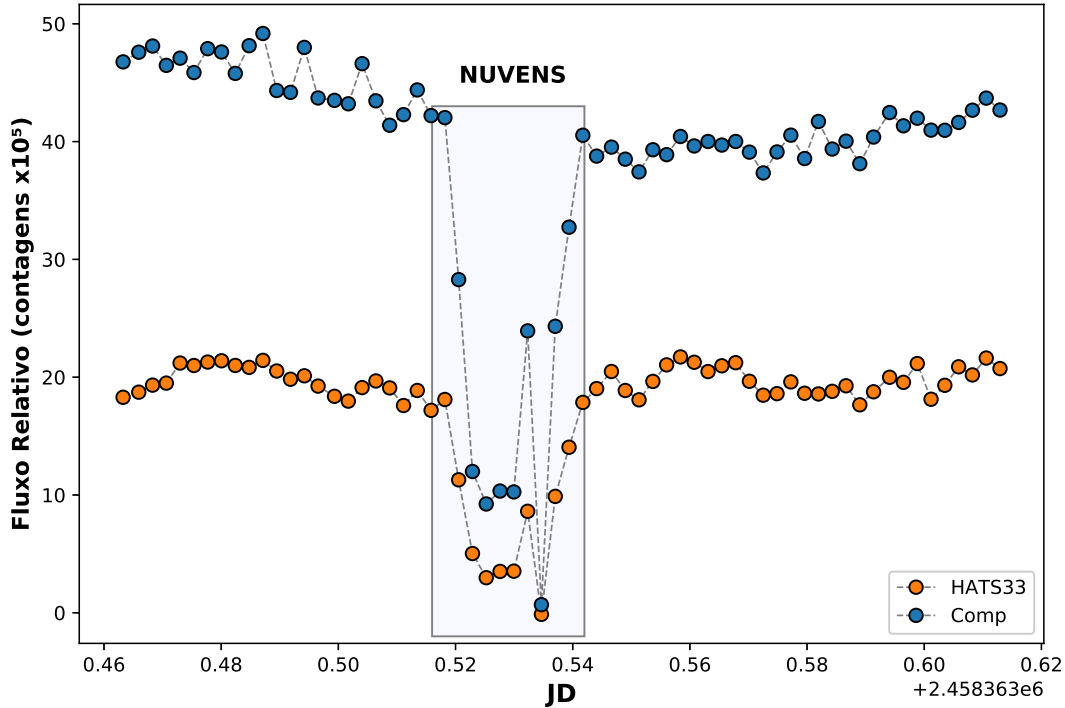


Figura 1.6: Variação do fluxo da estrela alvo HATS-33 e sua comparação durante a passagem de uma nuvem, em função dos dias julianos (JD).

do comprimento de onda. O critério para se determinar a largura dos *bins* estará relacionado a qualidade dos dados (relação sinal-ruído), a resolução espectral, e a largura das estruturas de absorção que se espera detectar. Quanto menor o *bin*, maior a quantidade de pontos para amostrar o espectro de transmissão e menor a relação sinal-ruído de cada ponto.

1.4 Modelagem Atmosférica

Em paralelo com os avanços das técnicas observacionais, na última década houve um progresso substancial na modelagem de atmosferas exoplanetárias e na interpretação de seus espectros. Foram desenvolvidos modelos com uma variedade de: condições físicas (de Hot-Júpiter altamente irradiados para planetas gasosos com grandes distâncias orbitais), complexidade computacional (modelos plano-paralelos 1-D a modelos com circulação atmosférica 3-D), e condições termoquímicas (de abundância solar em equilíbrio termoquímico à abundância não solar e em condições de desequilíbrio) (Goyal et al., 2017).

Tradicionalmente, modelos de atmosfera exoplanetária são baseados em condições de equilíbrio. Dada algumas propriedades planetárias como radiação estelar incidente, raio do planeta, gravidade superficial e uma certa abundância de elementos pré-definida, modelos de equilíbrio irão computar o espectro de transmissão sob as considerações de equilíbrio radiativo-convectivo, equilíbrio químico, equilíbrio hidrostático, e equilíbrio termodinâmico local em uma atmosfera com geometria plano-paralela. A restrição de equilíbrio radiativo-convectivo permite determinar perfis de pressão-temperatura (P-T) consistentes com a radiação incidente e a composição química da atmosfera. A restrição de equilíbrio químico permite determinar as abundâncias atômicas e moleculares, que por sua vez fornecem as fontes de opacidade na atmosfera. E, por fim, a restrição de equilíbrio hidrostático irá relacionar a pressão com a distância radial (Madhusudhan et al., 2014a).

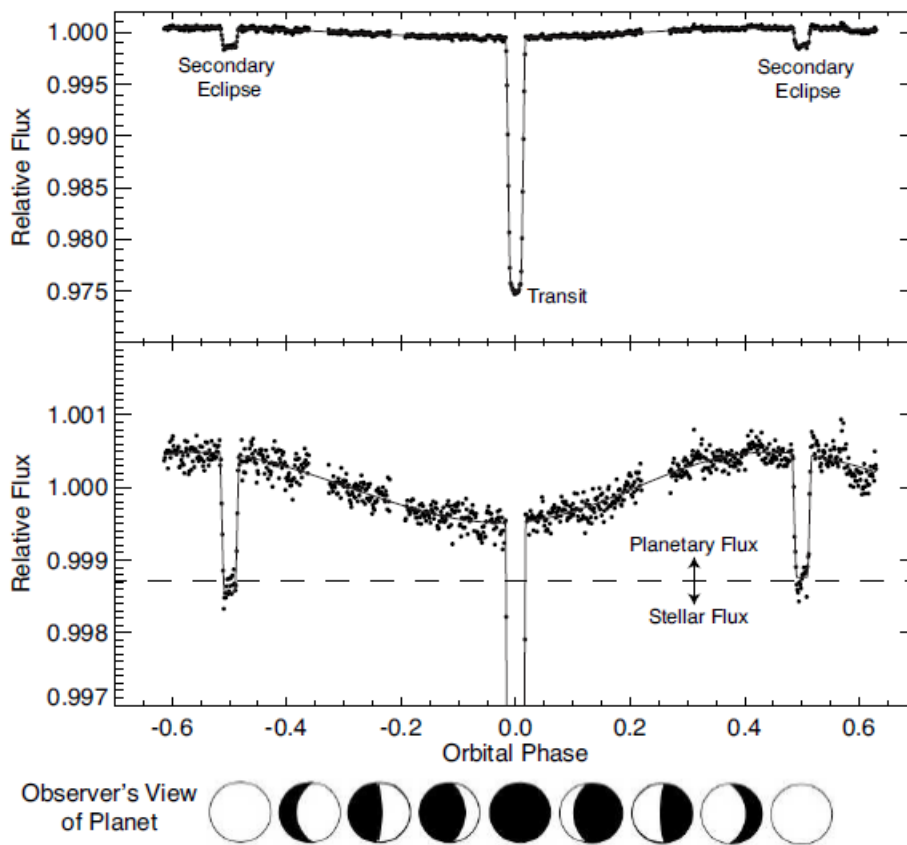


Figura 1.7: Curva de fase do Hot-Júpiter HD 189733b medida pelo telescópio espacial *Spitzer*, na banda de $4.5\mu\text{m}$. Durante o trânsito secundário (ocultação) há apenas o fluxo da estrela, e após isso há também a contribuição do fluxo do planeta. *Créditos:* Madhusudhan et al. (2014b)

A complexidade do modelo utilizado dependerá dos dados obtidos; para

espectros de baixa resolução, que são tipicamente observados com telescópios terrestres de médio porte, modelos 1-D fornecem meios adequados para obter a temperatura atmosférica média da superfície e perfis de composição química, regularmente consistentes com modelos 3-D. Porém, quando a curva de fase orbital é observada (fig.1.7), onde além do trânsito é observado também a ocultação do exoplaneta, modelos 3-D são necessários para considerar a dinâmica atmosférica.

1.5 Estado da Arte do Método

Através da espectrofotometria diferencial do trânsito de exoplanetas, foi possível obter espectros de transmissão na região do óptico e infravermelho (próximo e médio) da atmosfera de: ultra Hot-Júpiters (von Essen et al., 2019), Hot-Júpiters (fig. 1.8) (Sedaghati et al., 2016), super Netunos (Libby-Roberts et al., 2019) e terrestres (Diamond-Lowe et al., 2018). A utilização desse método em telescópios terrestres possibilitou a detecção ou obtenção de evidências de es-

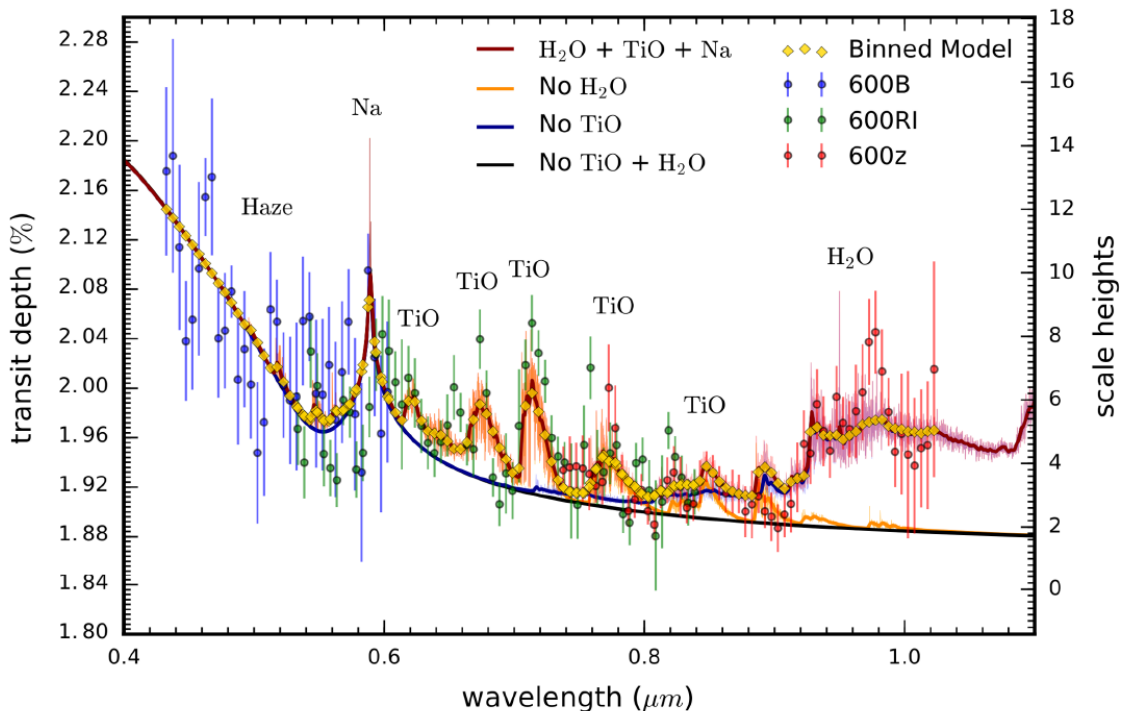
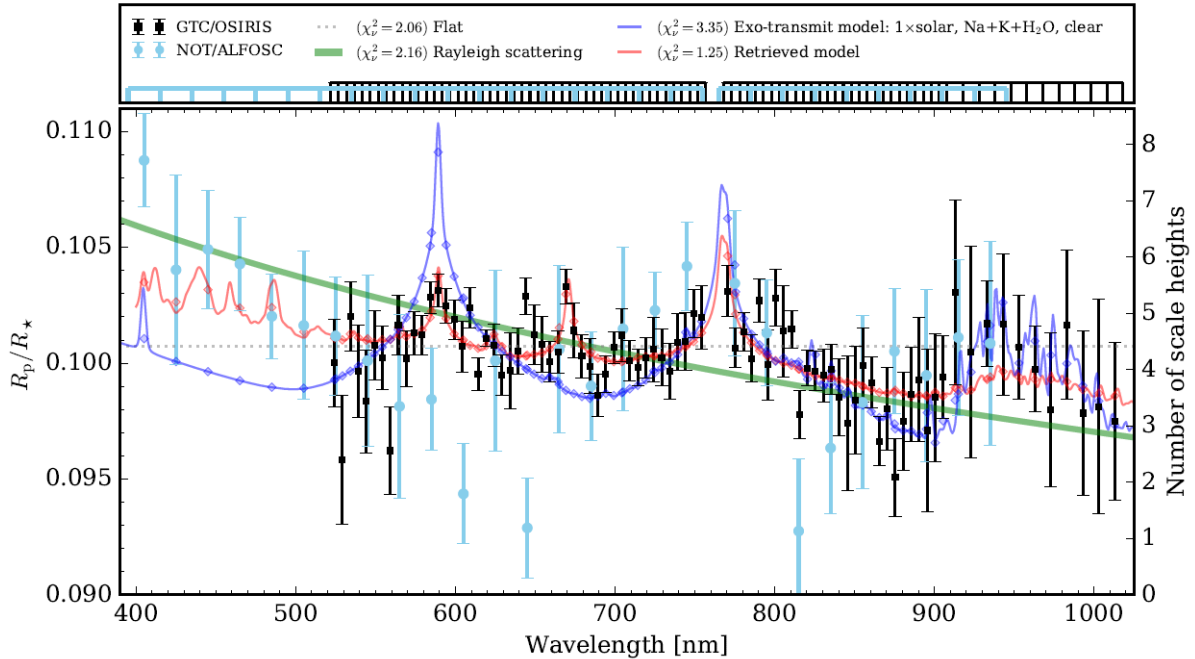


Figura 1.8: Espectro de transmissão obtido com o telescópio UT1 (*Unit Telescope*), do VLT, de 8.2m para o Hot-Júpiter WASP-19b. O melhor modelo ajustado aos dados indica a presença de linhas e estruturas de absorção de Na, TiO e H₂O, assim como o espalhamento Rayleigh na região do azul devido a presença de uma bruma (*haze*) na atmosfera. *Créditos:* Sedaghati et al. (2017).

truturas de absorção de diversos elementos e moléculas no espectro de transmissão óptico de planetas do tipo Júpiter, como Na, Li, K, TiO, VO e AlO (Sedaghati et al., 2017; von Essen et al., 2019; Stevenson et al., 2014; Carter et al., 2019; Lendl et al., 2017).



Créditos: *Chen et al. (2018)*

Figura 1.9: Espectro de transmissão obtido com o telescópio NOT (círculo azul) e com o GTC (quadrado preto) para o Hot-Júpiter WASP-127b, em conjunto com um modelo com presença de Na, K e H₂O (azul) e o melhor modelo ajustado (vermelho).

Palle et al. (2017) utilizou essa técnica para gerar o espectro de transmissão do Hot-Júpiter WASP-127b. As observações foram realizadas com o telescópio NOT (*Nordic Optical Telescope*), de 2.5 metros de diâmetro, da ordem de 3 a 4 vezes menor que os telescópios tipicamente usados para gerar espectros de transmissão. Chen et al. (2018) utilizou essa técnica para o mesmo objeto com o telescópio GTC, de 10.4 metros de diâmetro, e comparou os resultados obtidos com os dois (fig. 1.9). Nota-se uma maior incerteza nos dados do NOT e *bins* quatro vezes maiores que o GTC, devido à menor resolução espectral. Segundo Palle et al. (2017), o espalhamento nos dados do NOT, ligeiramente maior que do GTC, ocorreu devido a uma correção imperfeita da contaminação de segunda ordem da estrela, porém estão de acordo entre si nos comprimentos de onda em comum, de 520nm a 945nm.

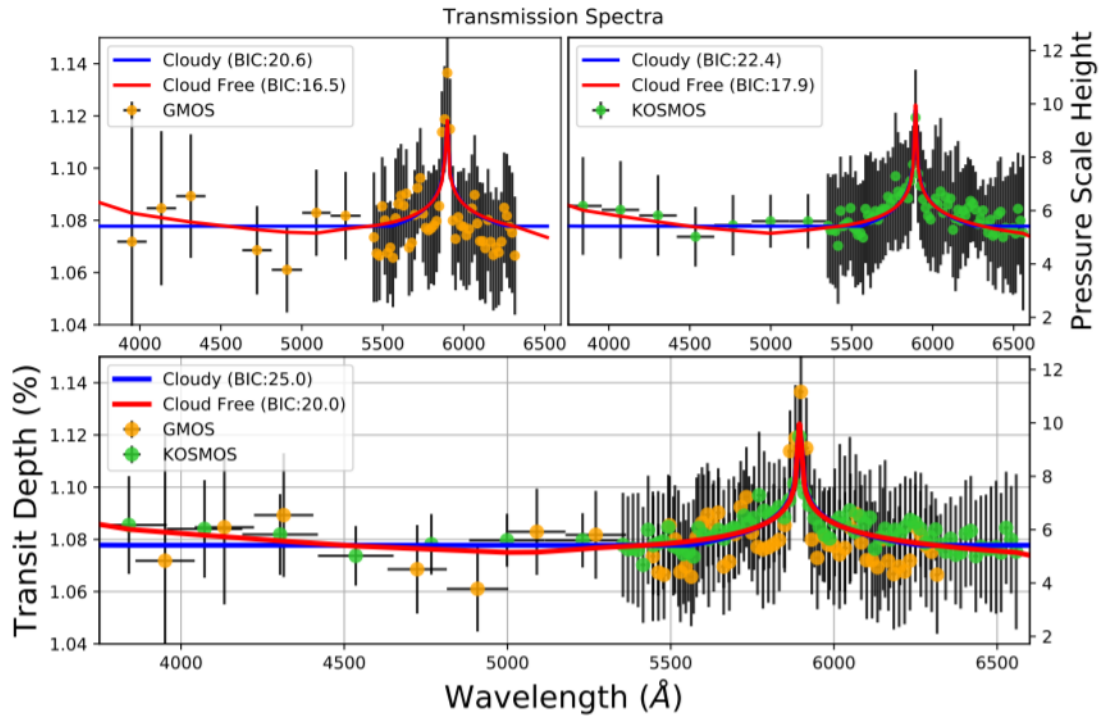


Figura 1.10: Espectro de transmissão óptico obtido com o telescópio Gemini Norte (amarelo) e com o Mayall (verde) para o Hot-Júpiter XO-2b, em conjunto com um modelo com nuvens (linha azul) e sem nuvens (linha vermelha). *Créditos:* Chen et al. (2018).

Pearson et al. (2018) detectou a linha de absorção do Na para o Hot-Júpiter XO-2b com uma confiança de 3.8σ , através da espectrofotometria diferencial com o telescópio Mayall, de 4.0 metros de diâmetro. Em paralelo, o trânsito desse planeta também foi observado com o telescópio Gemini Norte, de 8.1 m, utilizando a mesma técnica. A linha de absorção do Na também foi detectada à nível 3.8σ , e os resultados de ambos concordaram (fig. 1.10).

Esses resultados apontam para a possibilidade da utilização da espectrofotometria em telescópios menores, a fim de gerar o espectro de transmissão e caracterizar a atmosferas desses planetas. Entretanto, por se tratar de uma técnica recente e não totalmente estabelecida, esforços devem ser feitos no intuito de aperfeiçoá-la.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Aquisição dos Dados

Os dados do projeto foram obtidos no telescópio Parkin-Elmer de 1,60m, do Observatório do Pico dos Dias (OPD) administrado pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA/MCTIC). As aquisições foram feitas durante três missões em 2018, das quais duas ocorreram em maio (01, 02, 03 e 29, 30, 31), missões N^o P-021, e a outra em setembro (01, 02 e 03), missão N^o P-020. As noites 01/05, 31/05, e 03/09 foram completamente perdidas devido à chuva e nebulosidade. As demais noites foram parcialmente perdidas devido a umidade acima de 97% e passagem de nuvens, de modo que em nenhuma das observações foi possível acompanhar todo o evento (antes, durante e depois do trânsito). Os instrumentos utilizados foram o CCD Andor IKON 13739, no modo *High Sensitivity* e o espectrógrafo cassegrain f/10, com a rede de difração de baixa resolução de 300 linhas/mm (dispersão de 2.58 Å/pixel). A escolha desta rede foi motivada pela necessidade de maior abrangência e menor dispersão espectral possíveis, uma vez que as estruturas espectrais de absorção das atmosferas dos hot-Júpiteres são muito largas, da ordem de 100 Å ou maior, sendo as baixas resoluções suficientes para nossos propósitos. As informações técnicas dos instrumentos estão disponíveis na tabela 2.1

A resolução real (resolução por difração com a resolução limitada pela fenda) pode ser obtida através das imagens de calibração em comprimento de onda. As linhas de emissão da lâmpada se assemelham a um delta de Dirac,

Tabela 2.1: Informações técnicas dos instrumentos.

Rede	300 linhas/mm
Escala de Dispersão	2.58 (Å/pix)
Escala de Fenda	1.25 ("/100µm)
Escala Espacial no Detector	0.56 ("/pix)
Largura da Fenda	1.5"
λ central	5500Å
Cobertura	~ 3006Å a 7993Å
CCD	IKON 13739 (2048x2048)
Dimensão do Pixel	13.5 x 13.5 µm
A/D rate	1.0 Mhz
Preamp Gain	4.0x
Ruído por Pixel	6.0 elétron rms
Base do Nível Médio	2243 contagens A/D
Saturação do Pixel	75398 elétrons

portanto a menor parte que o sistema consegue resolver será equivalente a largura à meia altura da base das linhas de emissão. A FWHM média das linhas da lâmpada He-Ar de todas as observações varia entre 2.0 a 2.2 pixels. Tomando a média de 2.1 pixels (fig.2.1) e sabendo que cada pixel corresponde a 2.6 Å, tem-se que a resolução em elemento de comprimento de onda será de 5.5 Å, o que resulta em uma capacidade de resolver uma variação no comprimento de onda de uma parte em 1000 ($R = 5500/5.5 = 1000$).

Para a seleção dos alvos foram estipulados os seguintes requisitos: início, meio e fim do trânsito possíveis de serem observados durante a noite; magnitude limite do alvo $\leq +12$; estrela de comparação com magnitude similar a do alvo (± 1 mag); distância angular entre alvo e comparação de até 2.5 minutos de arco, para posicionar ambos na fenda; observações limitadas a um cone de até 45° em torno do zênite. Entretanto, como as noites foram cedidas através de tempo vago, não necessariamente haveria trânsitos dos alvos selecionados nessas, e foi necessário relaxar alguns requisitos para que fosse possível selecionar novos candidatos, com prioridade aos que atendessem à maior quantidade deles. O critério mais relaxado foi a magnitude da estrela de comparação, que na maioria dos casos apresentou uma magnitude acima ou abaixo do intervalo estipulado. Os trânsitos observados durante as missões são apresentados na tabela 2.2.

¹Magnitude das estrelas alvo e comparação obtidos no **Simbad**. Disponível em <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

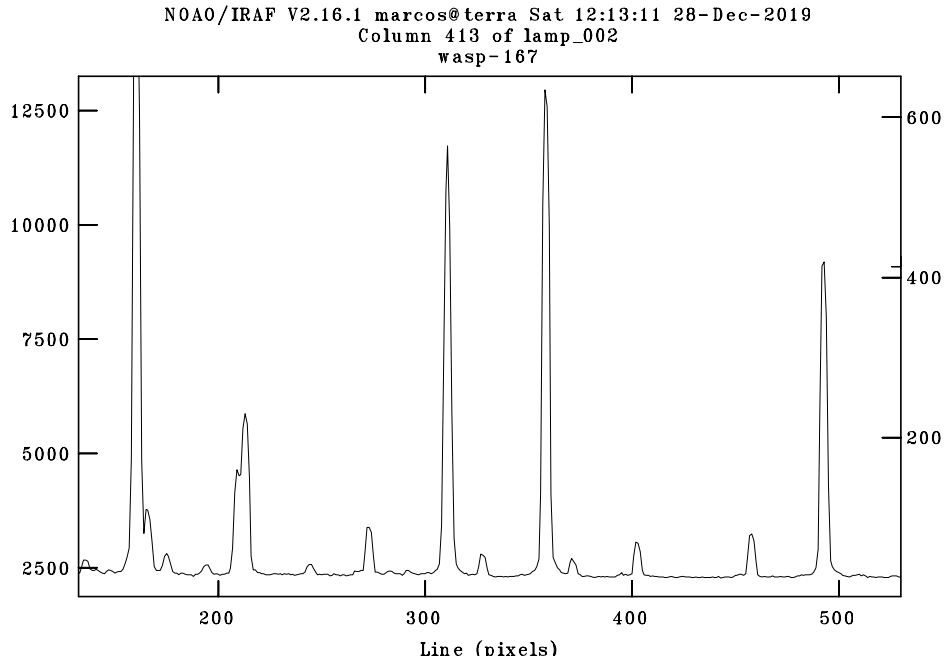


Figura 2.1: Linhas de emissão da lâmpada He-Ar. Foi ampliado uma região da imagem para melhor visualização das linhas

Durante o trânsito de um Hot-Júpiter, há uma queda no fluxo da estrela em torno de 1%, ou uma parte em 100. Visando obter um sinal 10 vezes maior que essa queda em fluxo, ou uma parte em 1000, a relação Sinal-Ruído (S/R) das medidas deve ser:

$$S/R \approx \frac{S}{\sqrt{S+R}} = \frac{1000}{\sqrt{1000+1}} \approx 32. \quad (2.1)$$

Desse modo, o tempo de exposição dos objetos foi estimado visando obter o máximo de aquisições durante o trânsito e ao mesmo tempo alcançar a relação S/R estipulada (eq. 2.1) em cada aquisição. Como um trânsito dura cerca de uma a três horas, longos tempos de exposição iriam comprometer a quantidade de medidas do objeto, resultado em poucos pontos para o ajuste da curva de luz. A estimativa do tempo de exposição para cada alvo foi feita durante a missão, utilizando a aproximação $S/R \approx \sqrt{\text{fluxo}}$, onde o fluxo é o número de contagens do objeto menos o fundo de céu (fig. 2.2). Para os objetos WASP-95, WASP-110, WASP-123 e WASP-147, a grande diferença de magnitude entre as estrelas fez com que não fosse possível atingir o nível de contagens requisitado devido a longos tempos de exposição. Essa diferença nas magnitudes leva a uma relação

S/R limitada às contagens da estrela de menor brilho.

Tabela 2.2: Alvos e comparações observados neste trabalho. Os dados de posição e magnitude foram obtidos na interface SIMBAD Astronomical Database¹. São listados também os tempos de exposição e o número de espectros observados.

	WASP-87	HATS-33	WASP-95
Data	29/05/2018	01/09/2018	02/09/2018
A.R. (J2000)	12 21 17.92	19 38 31.92	22 29 49.73
Dec. (J2000)	-52 50 27.0	-55 19 48.4	-48 00 11.01
magV	11.9	10.7	10.1
Tipo espectral	F5	G5	G2
Comp.	TYC 8633-294-1	CD-55 8229	TYC 8449-323-1
magV Comp.	11.4	10.6	11.7
Tempo exp.(s)	90	200	150
N °exp	85	64	84
	WASP-110	WASP-123	WASP-167
Data	02/05/2018	03/05/2018	30/05/2018
A.R. (J2000)	20 23 29.55	19 17 55.04	13 04 10.53
Dec. (J2000)	-44 03 30.30	-32 51 35.8	-35 32 58.28
magV	12.6	11.1	10.5
Tipo espectral	G9	G5	F1V
Comp.	TYC 7961-418-1	UCAC2 18065033	UCAC4 273-066801
magV Comp.	11.6	11.9	12.1
Tempo exp.(s)	600	600	200
N °exp	16	15	36

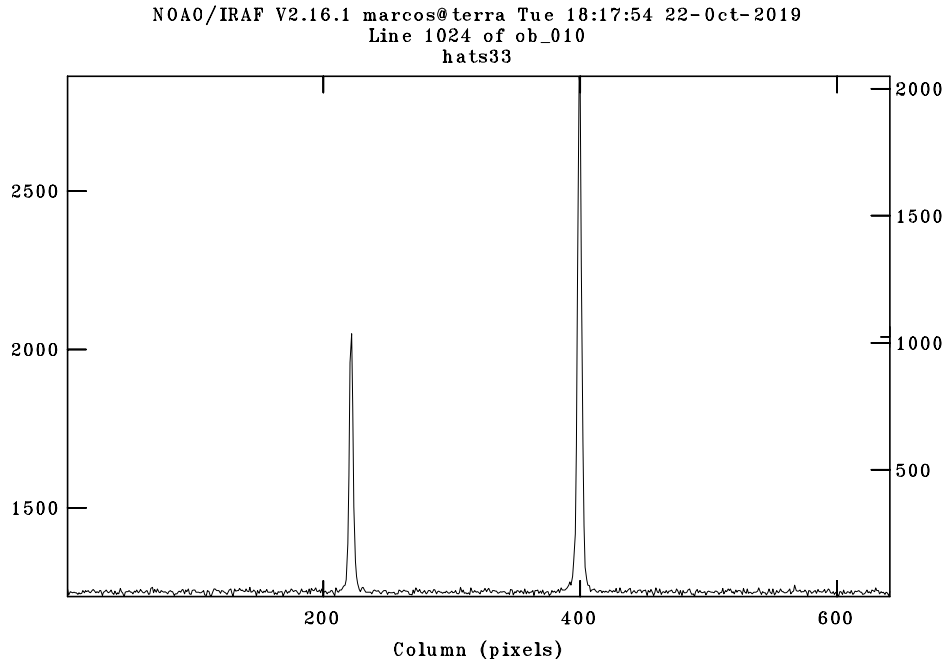


Figura 2.2: Fluxo (contagens) das estrelas alvo e comparação de uma aquisição. O gráfico é gerado a partir de um corte na linha 1024 do sensor, perpendicular ao eixo de dispersão.

O seeing no Pico dos Dias costuma ter uma variação razoavelmente grande, e no intuito de amenizar a variação da FWHM dos objetos devido a uma PSF (*Point Spread Function*) limitada pelo seeing, o telescópio foi levemente desfocado no início da noite. Após o apontamento, o rotator foi girado de modo a posicionar o alvo e a comparação na fenda. É importante ressaltar que o ajuste do rotator era feito manualmente, onde era necessário subir a plataforma do telescópio, girar toda a base do telescópio e fazer o ajuste fino do ângulo do rotator visualmente.

2.2 Redução dos Dados

A redução das imagens e a extração e calibração dos espectros foram realizadas com as rotinas do IRAF (Tody, 1986). As 20 imagens de *bias*, adquiridas com 1 segundo de exposição e shutter do CCD fechado, foram combinadas e subtraídas de todas as imagens. As 20 imagens de *flat-field*, adquiridas com 20 segundos de exposição em luz média, foram combinadas e normalizadas, e então as imagens científicas e as lâmpadas foram divididas pelo *flat* resultante. Através da task `cosmicrays`, do pacote IMRED > CRUTIL, os raios cósmicos foram

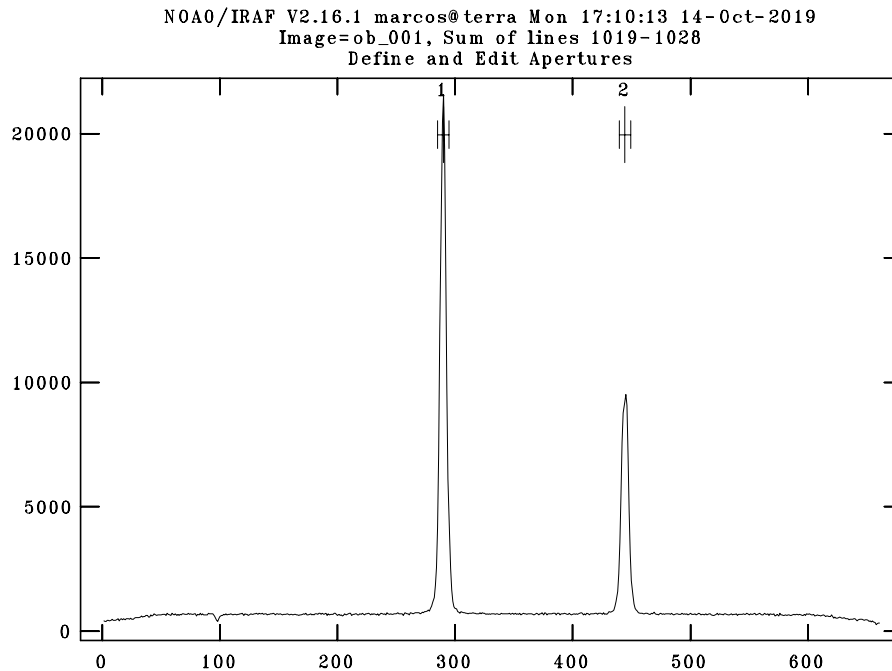


Figura 2.3: Aberturas encontradas automaticamente pela task **apall**, onde foi realizada a extração.

retirados das imagens científicas. Foi utilizado um limite (*threshold*) de 5 vezes o desvio padrão do fundo de céu (Wells and Bell, 1994). Raios cósmicos que caíram nos espectros, foram retirados manualmente, com a task **splot**.

A extração dos espectros foi realizada com a task **apall**, do pacote KP-NOSLIT. Antes de executar a task foram ajustados alguns parâmetros como a FWHM da estrela alvo e comparação, a região equivalente ao fundo de céu e o número de aberturas a ser encontrado automaticamente, duas (fig. 2.3). Durante a execução da task, o programa apresenta um *plot* do traçado para as duas aberturas, que corresponde ao deslocamento do eixo de dispersão do espectro contínuo ao longo dos pixels do CCD (fig. 2.4). É necessário então definir a região onde será extraído o espectro através do ajuste de uma função. Como a sensibilidade do CCD é menor no azul (fig. 2.5), o eixo de dispersão terá um espalhamento maior nessa região, pois as contagens relativas são baixas. Nos gráficos da figura 2.4, essa região corresponde aproximadamente ao intervalo entre as linhas 1600 e 2048.

Em um primeiro momento, foi feito o ajuste de uma função que contemplasse todos os pontos do traçado, inclusive na região do azul. Isso acarretou em um RMS acima de 0.5 pixels para todos os objetos, e o perfil dos espectros

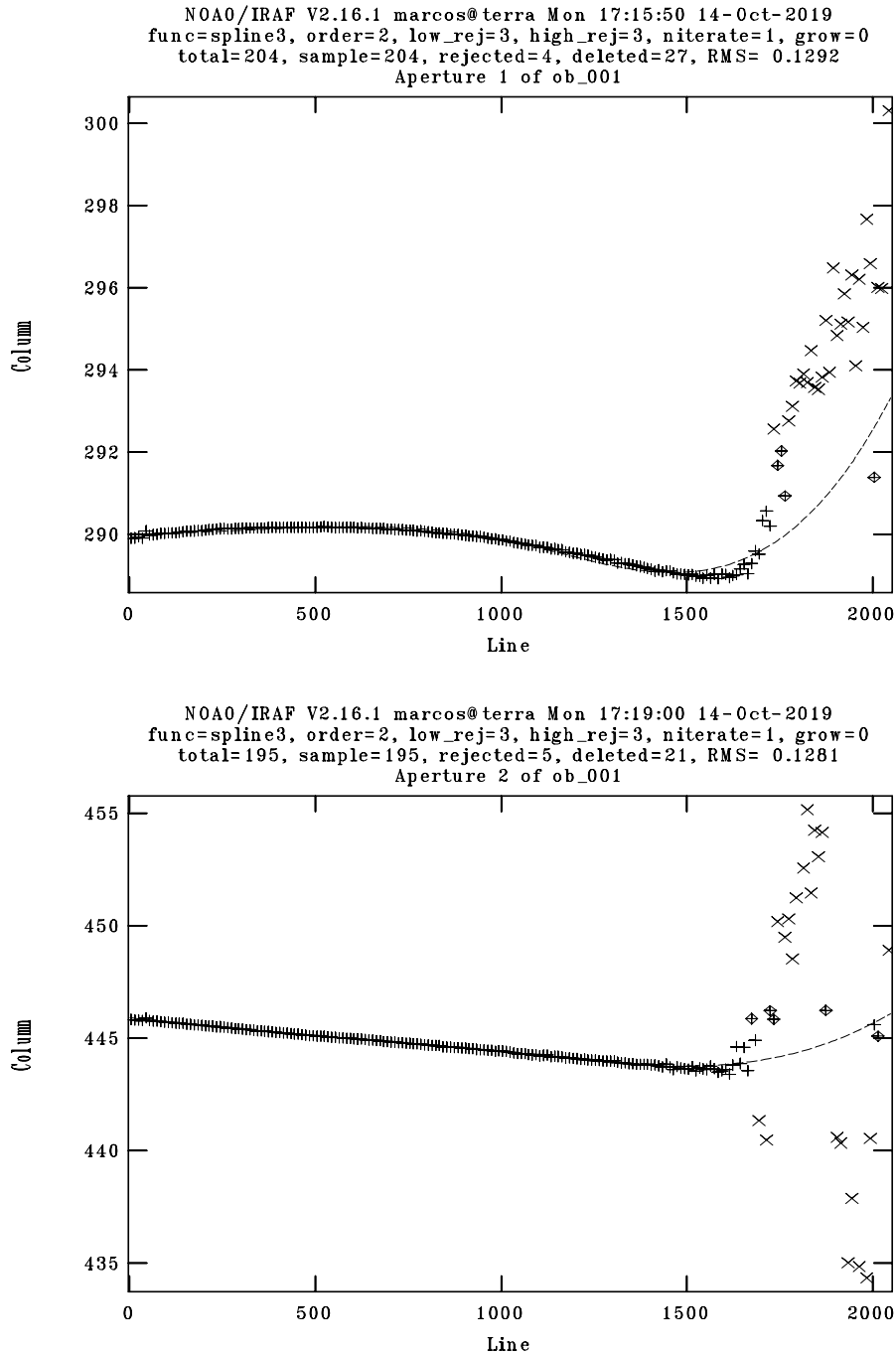


Figura 2.4: Ajuste do traçado para a primeira abertura (superior) e segunda abertura (inferior) de uma imagem científica do WASP-123.

obtidos para um mesmo objeto apresentou uma certa discrepância quando comparados entre si. Possivelmente essa discrepância se derivou da função de ajuste do traçado, que comprometeu a extração da região bem amostrada por considerar a região de maior dispersão do azul. Uma nova extração foi feita descartando os pontos dessa região para que o ajuste da função não fosse comprometido por eles. A função utilizada foi a *spline3* com segunda ordem, e o RMS de todos os

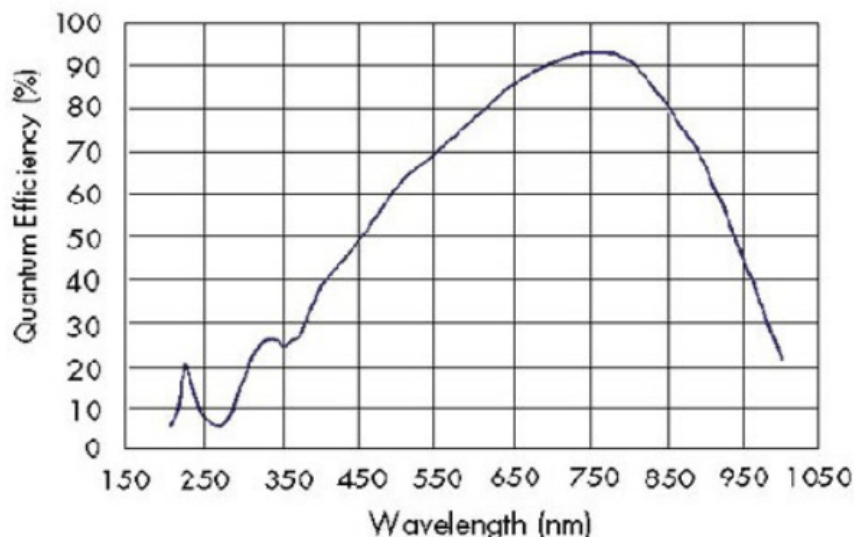


Figura 2.5: Eficiência quântica do CCD IKON 13739 à -90°C .

ajustes foram mantidos em torno de 0.1. Dessa maneira, as discrepâncias no perfil dos espectros de um mesmo objeto foram corrigidas e essa região foi descartada durante as futuras análises.

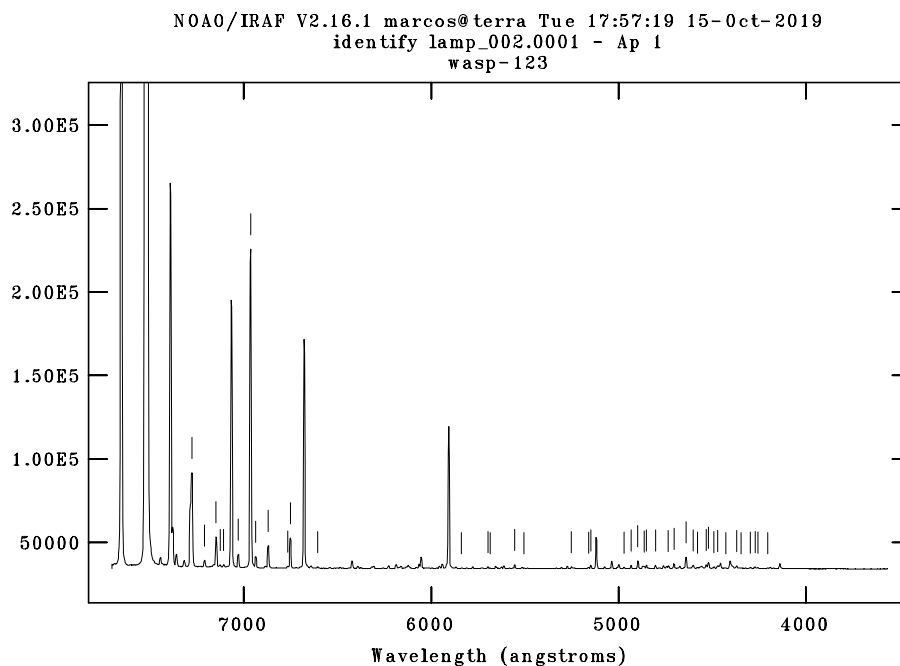


Figura 2.6: Linhas da lâmpada He-Ar encontrada automaticamente pela task **identify**.

A calibração dos espectros em comprimento de onda foi feita utilizando uma lâmpada de He-Ar. Durante a observação foram feitas imagens da lâmpada de calibração instantes antes da primeira aquisição e instantes depois da última

aquisição das imagens científicas. Essas imagens foram então sobrepostas para analisar se não houve deflexão das linhas espectrais no CCD devido ao movimento de acompanhamento do telescópio. As linhas da lâmpada nos espectros ao longo da noite, coincidiram, como esperado para a baixa resolução utilizada, não necessitando qualquer correção espectral em comprimento de onda, por deflexão instrumental.

Com a task **apsum** foi feita a extração do espectro da lâmpada He-Ar. Como o espectro é discreto, não é possível ajustar uma função como feito na extração do espectro contínuo das estrelas alvo e comparação. Portanto, é necessário utilizar uma imagem científica de referência para que o programa extraia, nos espectros das lâmpadas, a mesma região espectral da imagem de referência.

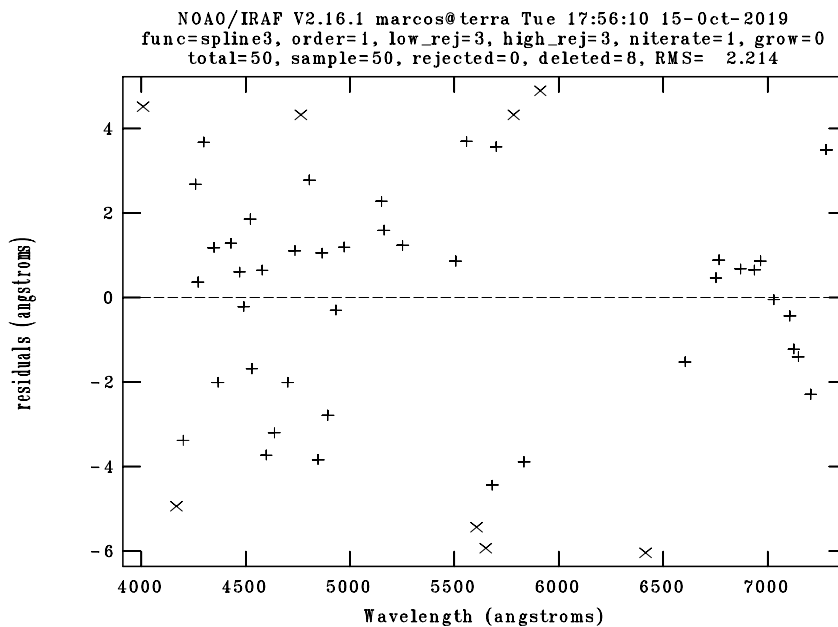


Figura 2.7: Resíduo do ajuste em comprimento de onda das linhas espectrais da lâmpada.

Com a task **identify** e **reidentify** foi identificado os comprimentos de onda das linhas espectrais da lâmpada He-Ar (fig. 2.6) e determinada a relação entre comprimento de onda e pixel, para as observações efetuadas. O gráfico do resíduo da calibração (fig. 2.7) e posição das linhas no CCD (fig. 2.8) é apresentado pelo programa, e o RMS dos ajustes obtidos, em torno de 2 pixels. O ajuste de segunda ordem não apresentou mudança significativa no RMS dos resíduos, sendo mantido o ajuste de primeira ordem.

A calibração em comprimento de onda dos espectros foi efetuada com a

task **dispcor** (fig. 2.9), que utiliza as lâmpadas extraídas e calibradas anteriormente como referência, através da task **refspec**.

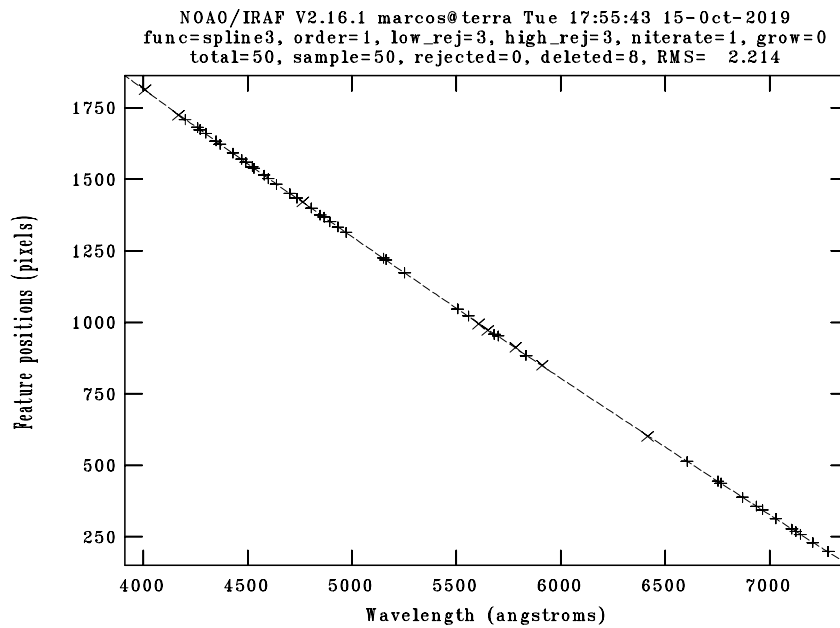


Figura 2.8: Posição em pixel das linhas espectrais da lâmpada no eixo de dispersão em função do comprimento de onda dessas linhas.

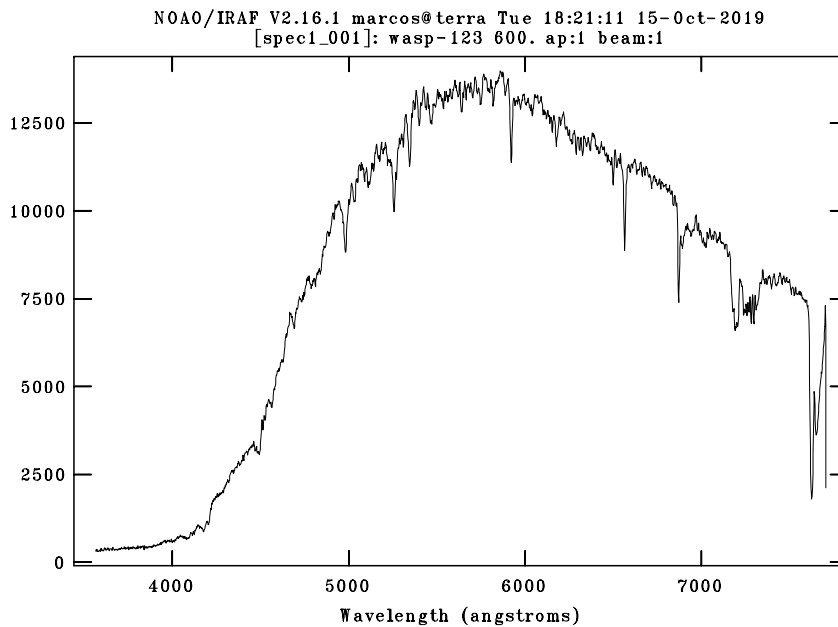


Figura 2.9: Espectro extraído e calibrado em comprimento de onda.

2.3 Curvas de Luz

As curvas de luz foram obtidas através da divisão do fluxo da estrela alvo pelo fluxo da estrela de comparação. Os espectros foram divididos em *bins* de 100 Å, onde o fluxo nesse intervalo foi integrado, e uma curva de luz foi gerada em cada um deles. Foi gerado também um curva de luz de um *bin* de 2000 Å em uma região de maior fluxo relativo dos espectros. Essa curva foi utilizada para restringir o início, meio e fim do trânsito, pois com um *bin* maior, o ruído relativo da curva será menor.

2.3.1 Ajuste das Curvas de luz

As curvas de luz obtidas foram ajustadas com a plataforma online do Exoplanet Transit Database (ETD) ², que utiliza um modelo analítico para calcular o tempo central, a duração e a profundidade do trânsito (Poddaný et al., 2010). O parâmetro de entrada do código é uma tabela .txt contendo dias julianos, fluxo relativo, e erro do fluxo. O conjunto de dados é modelado pela função:

$$m(t_i) = A - 2.5 \log F(z[t_i, t_0, D, b], p, c_1) + B(t_i - t_{mean}) + C(t_i - t_{mean})^2, \quad (2.2)$$

onde $m(t_i)$ é a magnitude em função do tempo para cada medida ($i = 1, 2, \dots, N$). A função $F(z, p, c_1)$ é o fluxo relativo da estrela devido ao trânsito do exoplaneta, onde p é a razão entre os raios R_p/R_\star ($\lesssim 0.2$, Mandel and Agol 2002), z é a separação relativa do planeta projetada na estrela, e c_1 é o coeficiente linear do escurecimento da borda estelar (*limb darkening*). O código considera trajetória do planeta sobre o disco estelar durante o trânsito como uma linha reta com parâmetro de impacto b (eq. 1.2 com $e = 0$). A metade do trânsito ocorre no tempo t_0 e todo o trânsito tem duração D . O modelo então computa $z[t_i, t_0, D, b]$ baseado nas suposições acima.

A variável A da equação 2.2 descreve o ponto zero da magnitude antes e depois do trânsito, enquanto as variáveis B e C descrevem tendências sistemáticas nos dados com termos lineares ou quadráticos, respectivamente (para correção da curvatura da massa de ar).

²Exoplanet Transit Database. Disponível em: <http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>

O algoritmo do código utiliza o método Levenberg-Marquardt dos mínimos quadrados não linear (procedimento **mrqmin**) (Press et al., 2007) para fazer o ajuste dos dados. As derivadas parciais requeridas como condição inicial são computadas analiticamente, com exceção de $\partial F/\partial z$, $\partial F/\partial p$ e $\partial F/\partial c_1$, computados numericamente utilizando o método de Ridder (procedimento **dfidr**) (Press et al., 2007). O ajuste fino dos parâmetros é feito através de iterações do algoritmo até que $\Delta\chi^2$ não varie significativamente entre os ajustes, tipicamente em torno de 10 iterações.

Fit / find out ON default / prediction :
HJD midtransit: OFF 2458268.380

Fit / find out ON default / prediction :
transit duration: OFF 139 minutes

Fit / find out ON default / prediction :
planet radius => transit depth: OFF 0.138 R_{star}

impact factor : (SemiMajorAxis*cos(Inclination)/ R_{star}) :
 0.420

Limb darkening : default value :
 0.5

systematic errors **zero power** : Vertical fit to observed data.
 systematic errors **linear function** : Correction of systematic errors - linear trends in data.
 systematic errors **square power** : Correction of systematic errors - parabolic fit.

Compute >

Figura 2.10: Interface de ajuste do programa ETD

Após inserir o arquivo de entrada e selecionar qual planeta se deseja obter a curva de luz, os dados são processados e é apresentado uma nova janela (fig.2.10), onde é possível selecionar se a profundidade, duração e meio do trânsito serão ajustados pelos dados (selecionar *on*) ou por valores da literatura (selecionar *off*). O valor do parâmetro de impacto b é automaticamente preenchido com valores da literatura, e o coeficiente de *limb darkening* é automaticamente preenchido com o valor padrão de 0.5, e é necessário alterá-lo baseado no tipo espectral da estrela. É possível também selecionar a ordem da remoção de tendência (linear, quadrática ou nenhuma delas).

O valor final da profundidade de trânsito em magnitude será calculado

para o valor mínimo de z (menor separação relativa, planeta próximo da região central da estrela) da seguinte maneira:

$$\delta = -2.5 \log[\min_z F(z, p, c_1)]. \quad (2.3)$$

Além dos valores da profundidade, duração e meio do trânsito, o programa também gera uma tabela com as colunas: dia juliano, magnitude, magnitude do ajuste, magnitude - magnitude do ajuste, erro escalonado, magnitude - tendência, magnitude do ajuste - tendência.

2.4 Espectro de Transmissão

Em um primeiro momento, a abordagem feita para se obter o espectro de transmissão foi medir a profundidade de trânsito em *bins* de 100 Å ao longo dos espectros, e ajustar uma curva de luz para cada *bin* com o ETD. Desse modo, seria possível obter a absorção da atmosfera em função do comprimento de onda. Entretanto, em função da grande dispersão nos dados (seção 3.1), o programa não conseguiu ajustar a curva de luz para todos os *bins* dos espectros, e esse método foi descartado.

Em uma nova abordagem para a obtenção dos espectros de transmissão, efetuamos a combinação de todos os espectros dentro do trânsito em um único espectro e todos fora do trânsito em outro espectro, minimizando assim erros aleatórios como flutuações da noite e não tendo a necessidade de ajustar uma curva de luz para cada *bin*. Nesse método, foi selecionado um intervalo dentro do trânsito (cujo centro equivale ao JD médio), e os espectros da estrela alvo foram combinados em um único espectro, assim como os espectros dentro do trânsito da estrela de comparação. O mesmo procedimento foi repetido para os espectros fora do trânsito. A task utilizada foi a **scombine** do IRAF, cujo tipo de operação de combinação foi a mediana. Então, foi feita a razão entre os espectros combinados das estrelas alvo e comparação, dentro e fora do trânsito. Isso resultou em um único sub-espectro dentro do trânsito (F_{dentro}), e outro fora do trânsito (F_{fora}). Por fim, segundo a equação 1.1, a fração da luz que foi absorvida pela atmosfera do planeta durante o trânsito em função do comprimento de onda será dada por:

$$\delta_{fluxo}(\lambda) = 1 - \frac{F_{dentro}(\lambda)}{F_{fora}(\lambda)} = \frac{R_p^2(\lambda)}{R_*^2}. \quad (2.4)$$

Obtido então a profundidade de trânsito por comprimento de onda, com a task **dispcor** do IRAF foi utilizado um *bin* de 100 Å , equivalente a 20 elementos de resolução, para geração do espectro de transmissão “binado”. Como as estruturas que se espera detectar são tipicamente mais largas ou da ordem de 100 Å, um *bin* dessa largura é suficiente para amostrar essas estruturas e ao mesmo tempo gerar uma maior relação S/R.

2.4.1 Amplitude das Estruturas de absorção

É possível estimar a amplitude das estruturas de absorção do espectro de transmissão baseado na escala de altura atmosférica H (incremento na altitude na qual a pressão atmosférica cai por um fator e). Assumindo equilíbrio hidrostático e utilizando as leis de gás ideal,

$$H = \frac{k_b T_{eq}}{\mu g} \quad (2.5)$$

onde k_b é a constante de Boltzmann, T_{eq} é a temperatura de equilíbrio do planeta, μ é a massa molecular média, e g é gravidade superficial (Stevenson, 2016). A amplitude das estruturas no espectro de transmissão será então:

$$\delta_\lambda = \frac{(R_p + nH)^2}{R_*^2} - \frac{R_p^2}{R_*^2} \approx \frac{2nR_p H}{R_*^2} \quad (2.6)$$

onde R_p é o raio do planeta, R_* é o raio da estrela, e n é o número de escalas de altura cruzadas na atmosfera nos comprimentos de onda de maior opacidade (tipicamente em torno de 2 para atmosferas sem nuvens e a baixa resolução espectral) (Kreidberg, 2017). Desse modo, os candidatos ideais para espectroscopia de transmissão possuem altas temperaturas de equilíbrio, pequenas estrelas hospedeiras, baixa gravidade superficial e também baixa massa molecular média (atmosferas dominadas por hidrogênio). Mesmo para os candidatos ideais, a amplitude das estruturas espectrais é da ordem de $\delta_\lambda = 0.1\%$, e para planetas do tipo Terra, a amplitude estimada é de duas a três ordens de magnitude menor, dependendo do

tamanho da estrela hospedeira.

2.5 Modelagem Atmosférica

O código utilizado para gerar modelos atmosféricos de espectros de transmissão de Hot-Júpiters foi o ATMO (Goyal et al., 2017). É possível simular mais de 50 mil modelos de atmosfera com 22 temperaturas de equilíbrio (400 - 2600 K), 6 metalicidades atmosféricas (0.1x - 200x solar), 4 gravidades planetárias (5 - 50 m/s²), 4 razões C/O (0.35 - 1.0), 4 parâmetros de espalhamento (*haze*), 4 parâmetros para cobertura de nuvens e dois cenários químicos (condensação local e global, figura 2.11). O código resolve as equações de transferência radiativa com o método da opacidade correlacionada k (utilizado também em modelos atmosféricos terrestres) ao invés de integrar a radiação em cada comprimento de onda, linha por linha (Amundsen et al., 2014).

Sob a consideração de equilíbrio químico atmosférico, o código utiliza perfis P - T isotérmicos que vão de 10^{-6} bar no topo da atmosfera a 10 bar na região mais interna, tipicamente a máxima profundidade que o espectro de transmissão consegue "penetrar" (Fortney et al., 2010). No cenário com condensação local (sem chuvas), cada camada do modelo é totalmente independente das outras camadas ao longo do perfil, e a composição química é dependente da temperatura, pressão e da abundância de elementos. Assim, cada camada começa com a mesma abundância de elementos e a condensação e depleção ocorre somente dentro de cada camada, sem trocas. Em contrapartida, no cenário com condensação global (com chuvas), uma vez que os condensados são formados em uma camada, os elementos que compõem os condensados serão depletados estequiometricamente dessa e de todas as camadas acima. Esse cenário foi desenvolvido para simular partículas que formam nuvens e se estabilizam ou afundam na atmosfera (por exemplo, chuva). Desse modo, a abundância química de uma dada camada dependerá das camadas subjacentes.

O código também implementa o espalhamento da luz devido ao *haze* (bruma) e nuvens. O *haze* é tratado como o espalhamento por pequenas partículas em suspensão (aerosol), implementado no código como uma parametrização multi-gás realçada do espalhamento Rayleigh (x1, x10, x150 e x1100 do espalhamento

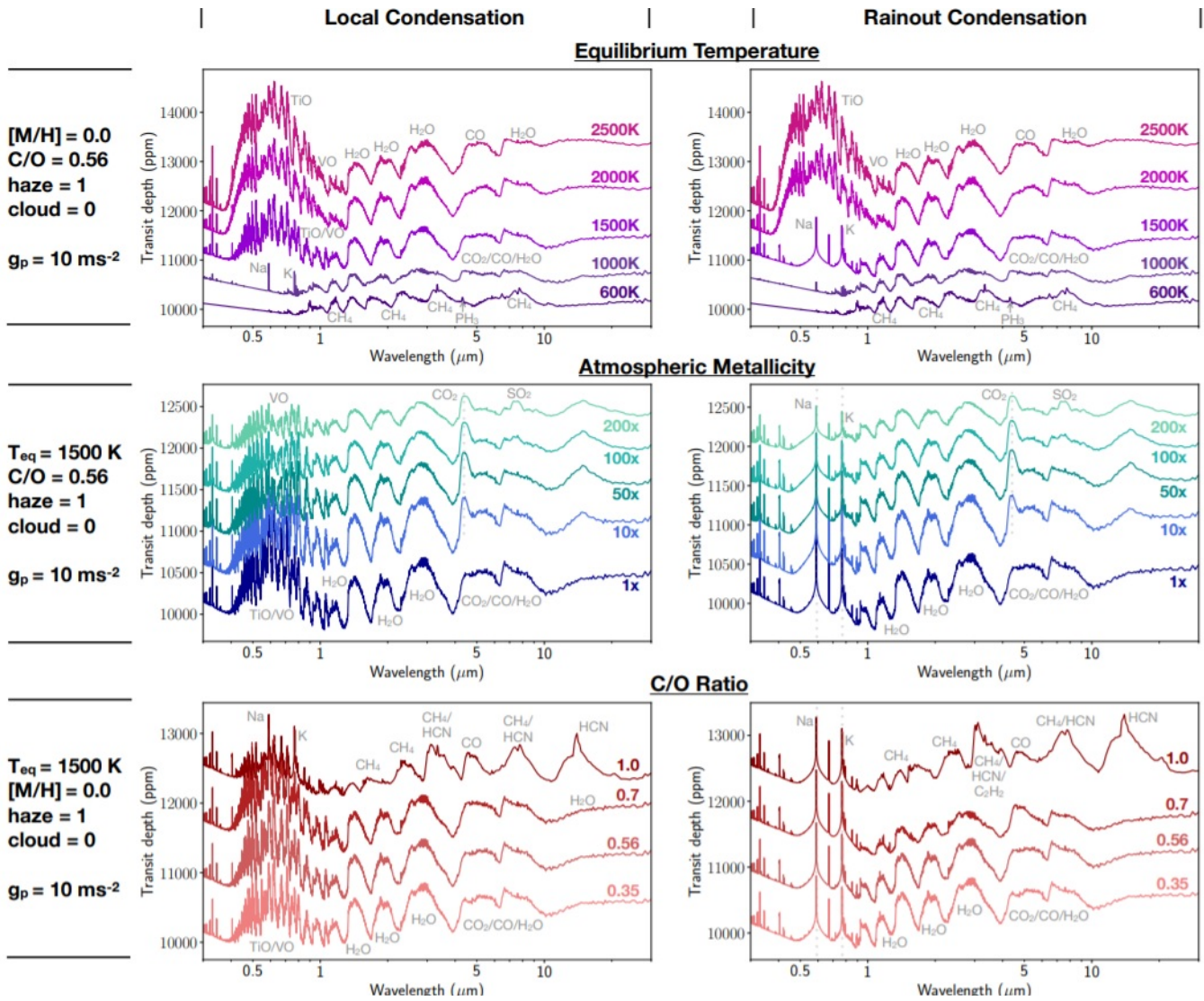


Figura 2.11: Espectros de transmissão gerados com o ATMO para um planeta de raio $1 R_J$ orbitando uma estrela de raio $1 R_{sol}$ e $g_p = 10 \text{ms}^{-2}$. Os gráficos da esquerda representam um cenário químico com condensação local e da direita com condensação global. Os gráficos superiores mostram os efeitos no espectro da variação da temperatura de equilíbrio do planeta fixando a metalicidade e razão C/O para valores solares. Os gráficos centrais mostram os efeitos no espectro da variação da metalicidade com T_{eq} fixa em 1500K e razão C/O solar. Os gráficos inferiores mostram os efeitos no espectro da variação da razão C/O com T_{eq} fixa em 1500K e metalicidade solar. Os modelos foram ajustados para uma atmosfera sem nuvens, e há um "offset" na profundidade de trânsito de cada um para uma melhor visualização. *Créditos:* Goyal et al. (2018).

Rayleigh padrão). As nuvens são tratadas por partículas grandes, cuja opacidade resultante será equivalente a opacidade do *haze* selecionado somado a um fator de 0 (sem nuvens) a 1 (obscurecimento total) multiplicado pela opacidade de espalhamento de H_2 a 350 nm, que é o composto mais abundante na atmosfera.

A utilização de um modelo gerado pelo ATMO para um planeta específico é feito através de um código em *python*, onde o modelo é reescalado para os parâmetros específicos do planeta, que são o raio do planeta, raio da estrela, gravidade superficial e temperatura de equilíbrio do planeta (Goyal et al., 2018). O raio observado do exoplaneta $R_p(\lambda)$ é composto por uma região independente do comprimento de onda $R_{p,disco}$ (região central opaca) e uma contribuição $z(\lambda)$, dependente do comprimento de onda e das propriedades físicas e químicas da atmosfera:

$$R_p(\lambda) = z(\lambda) + R_{p,disco}. \quad (2.7)$$

Uma solução analítica aproximada para o termo $z(\lambda)$ (Lecavelier des Etangs et al., 2008) é:

$$z(\lambda) = H \ln \left(\frac{\xi_{abs} P_{z=0} \sigma_{abs}(\lambda)}{\tau_{eq}} \sqrt{\frac{2\pi R_{p,disco}}{k_b T \mu g}} \right) = H \ln \alpha, \quad (2.8)$$

onde T é a temperatura, μ é o peso molecular médio, g é a gravidade, k_b é a constante de Boltzmann, H é a escala de altura atmosférica (eq.2.5), $\sigma_{abs}(\lambda)$ e ξ_{abs} são a seção de choque de absorção (*cross section*) e a fração molar da espécie dominante da absorção, respectivamente. $P_{z=0}$ é a pressão na altitude efetiva (z) de 0 (na “base” da atmosfera) e τ_{eq} é a profundidade óptica, ajustada em 0.56 (Lecavelier des Etangs et al., 2008).

É importante ressaltar que a solução 2.8 não foi utilizada para gerar os espectros de transmissão do modelo, pois para isso foi utilizado o método correlacionado k , citado anteriormente. Uma vez selecionado um espectro sintético gerado pelo modelo, é possível obter uma relação de escalonamento para um exoplaneta arbitrário resolvendo a equação 2.8 simultaneamente para os parâmetros do planeta e do modelo, resultando em:

$$\frac{z^{modelo}(\lambda)}{H^{modelo}} - \frac{z^{planeta}(\lambda)}{H^{planeta}} = \ln \alpha^{modelo} - \ln \alpha^{planeta}. \quad (2.9)$$

Reorganizando os termos e cancelando as constantes, obtém-se

$$z^{planeta}(\lambda) = z^{modelo}(\lambda) \frac{T^{planeta} g^{modelo}}{T^{modelo} g^{planeta}} - 0.5 \ln \frac{R_{p,disco}^{modelo} T^{planeta} g^{planeta}}{R_{p,disco}^{planeta} T^{modelo} g^{modelo}}. \quad (2.10)$$

Dividindo então a equação 2.7 pelo raio da estrela ($R_p(\lambda)/R_\star$) obtém-se o espectro de transmissão escalonado para um planeta arbitrário. O ATMO também possui um código que gera a abundância química (em fração molar) associada a cada

espectro de transmissão gerado. O código de reescalonamento dos modelos e da abundância química dos elementos é disponibilizado pelo autor, na plataforma GitHub³.

³https://github.com/hrwakeford/Generic_Grid

Capítulo 3

Resultados e Discussão

Um exemplo dos espectros extraídos, de cada um dos alvos e suas comparações, são apresentados na figura 3.1. As curvas de luz foram obtidas no intervalo de 2000 Å que continha a maior intensidade relativa dos espectros observados. Com a *task sbands* do IRAF, foi integrado o fluxo nessa região e o valor resultante de cada espectro integrado da estrela alvo foi dividido pelo correspondente da estrela de comparação, obtendo assim os pontos da curva de luz.

A estimativa do erro do fluxo foi feita considerando que a fonte dominante de ruído era proveniente da incerteza na contagem dos fótons das estrelas (ruído de Poisson), uma vez que o sinal luminoso das estrelas é em torno de 1000 contagens acima do fundo de céu. Em uma distribuição de Poisson, o valor médio μ é equivalente ao número de contagens N , e o desvio padrão da distribuição é \sqrt{N} . Foi feito um *script* em Python que tirava a raiz quadrada do fluxo de cada pixel do *bin* equivalente de 2000 Å dos espectros, fazia a propagação do erro da soma do fluxo, e posteriormente a propagação do erro da divisão do fluxo da estrela alvo pela comparação.

As curvas de luz dos 6 trânsitos observados, sem ajustes, derivadas da razão dos fluxos integrados nos *bins* de 2000 Å, são apresentadas nas imagens 3.2 e 3.3, assim como a variação do fluxo das estrelas alvo e comparação durante a noite. Em nenhuma das observações foi possível acompanhar todo o trânsito, pois houve o surgimento de nuvens, ou foi necessário fechar a cúpula devido a umidade acima de 97% (limite de observação no Pico dos Dias), ou a ascensão reta do objeto atingia o limite do telescópio.

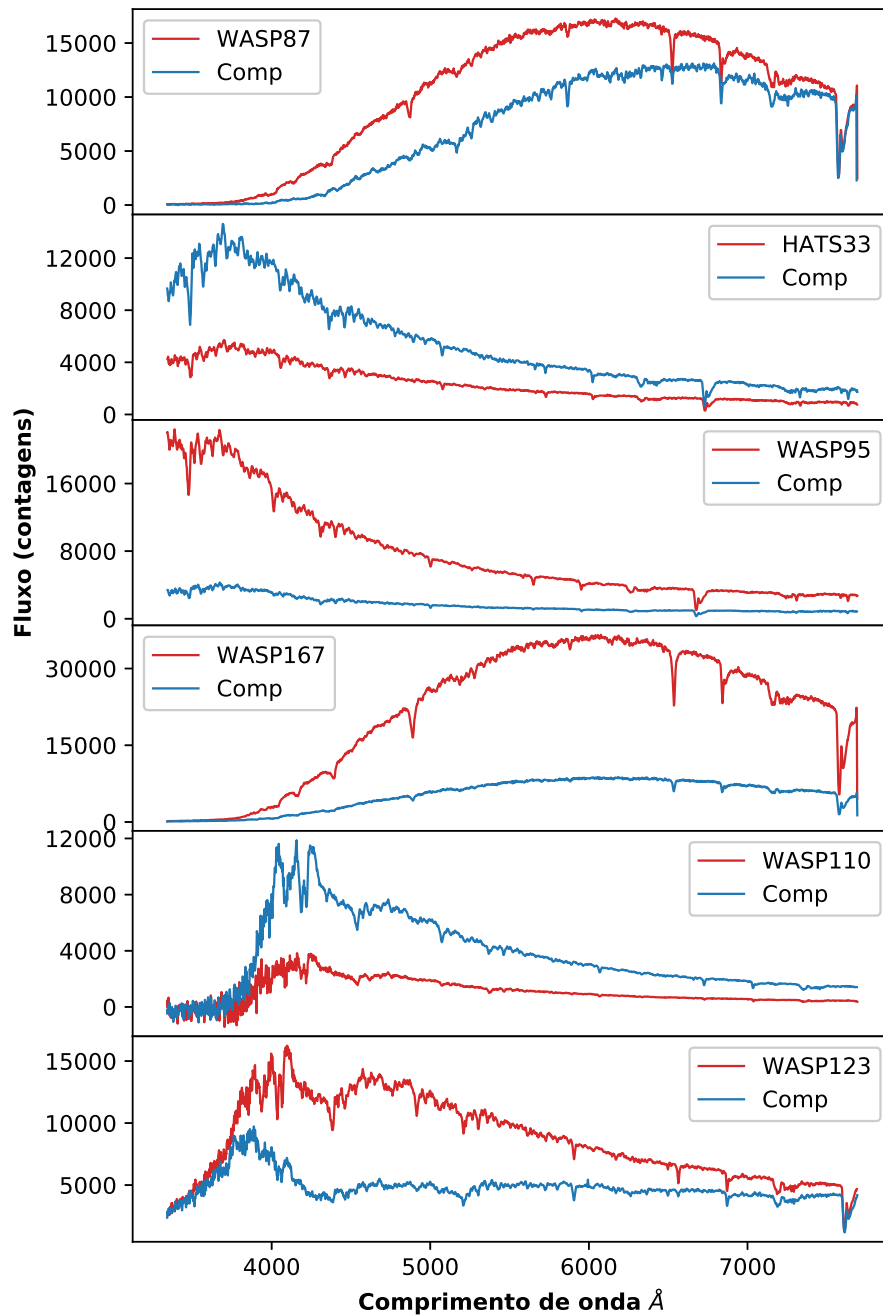


Figura 3.1: Espectros extraídos e calibrados em comprimento de onda das estrelas alvo (vermelho) e comparação (azul).

No geral, nota-se uma oscilação na faixa de 10% a 30% do fluxo das estrelas durante as observações, com exceção da estrela HATS-33, que além dessa oscilação teve um obscurecimento total durante o acompanhamento do trânsito. Essas oscilações se devem a fenômenos como passagem de nuvens, extinção atmosférica, turbulência da atmosfera, assim como perdas devido a configuração

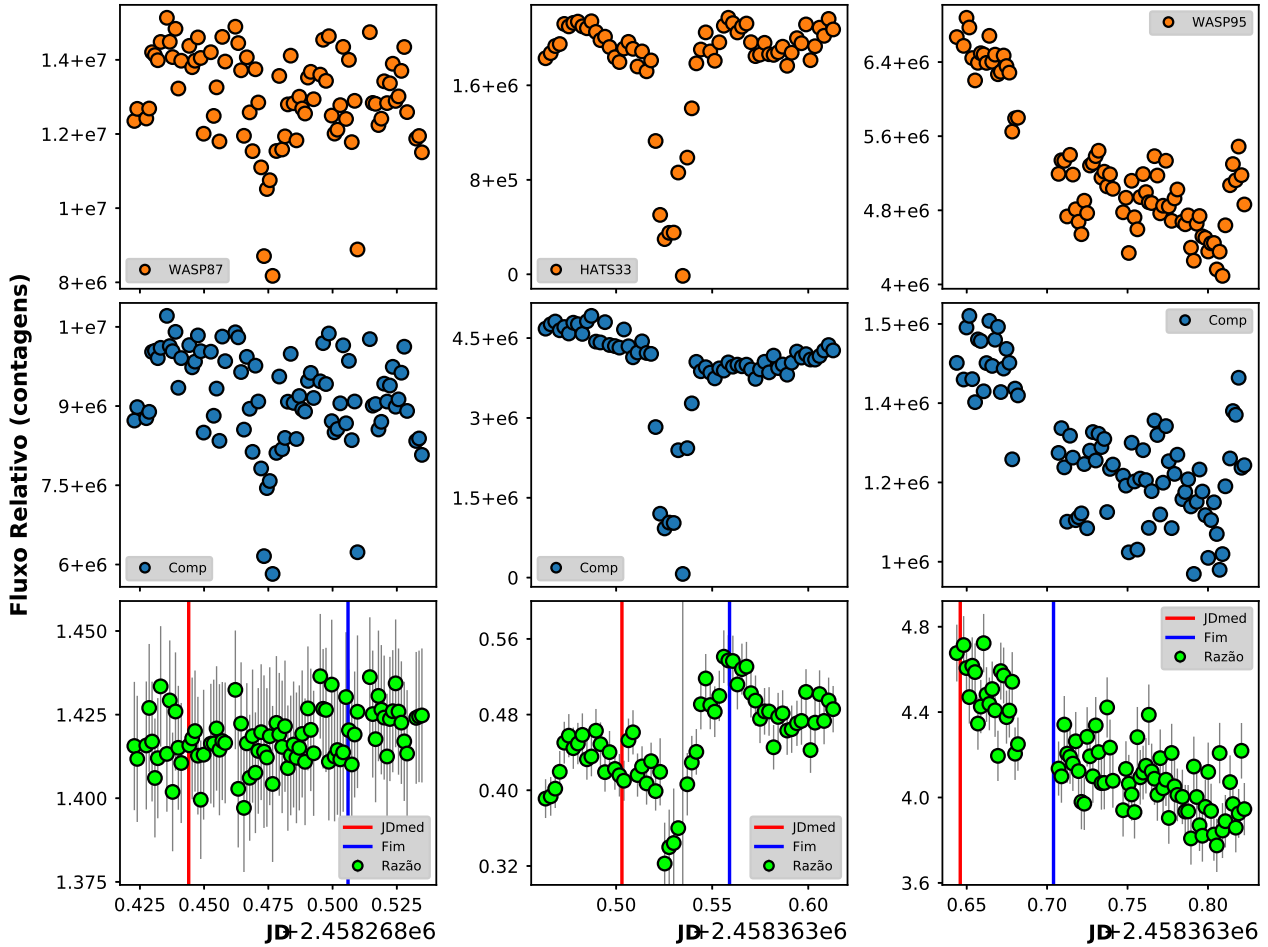


Figura 3.2: Fluxo integrado dos espectros das estrelas alvo (superior) e comparação (centro) em um *bin* de 2000 \AA em função do tempo (dias julianos) para as estrelas WASP-87 (esquerda), HATS-33 (centro) e WASP-95 (direita). A região inferior é a curva de luz dos trânsitos sem ajustes, onde a reta vermelha indica o meio do trânsito e a azul o início ou fim do trânsito. O erro da divisão é indicado pela barra cinza.

instrumental, como oscilação do objeto na fenda, sensibilidade diferencial do CCD, entre outros. Espera-se que a passagem de nuvens afete igualmente a queda de fluxo das estrelas na fenda, mas para precisões melhores que 1% do fluxo, mesmo na pequena escala do CCD, a opacidade diferencial das nuvens irá afetar a absorção e espalhamento da luz das estrelas alvo e comparação, de maneira distinta, em cada aquisição. Isso ocasiona em uma maior dispersão nos pontos da curva de luz, derivados da razão entre os dois fluxos, assim como o aumento do ruído relativo devido ao menor fluxo. É válido ressaltar que durante todas as observações, em algum momento, houve a cobertura parcial do céu por nuvens, geralmente do tipo cirrus ou cirrostratus.

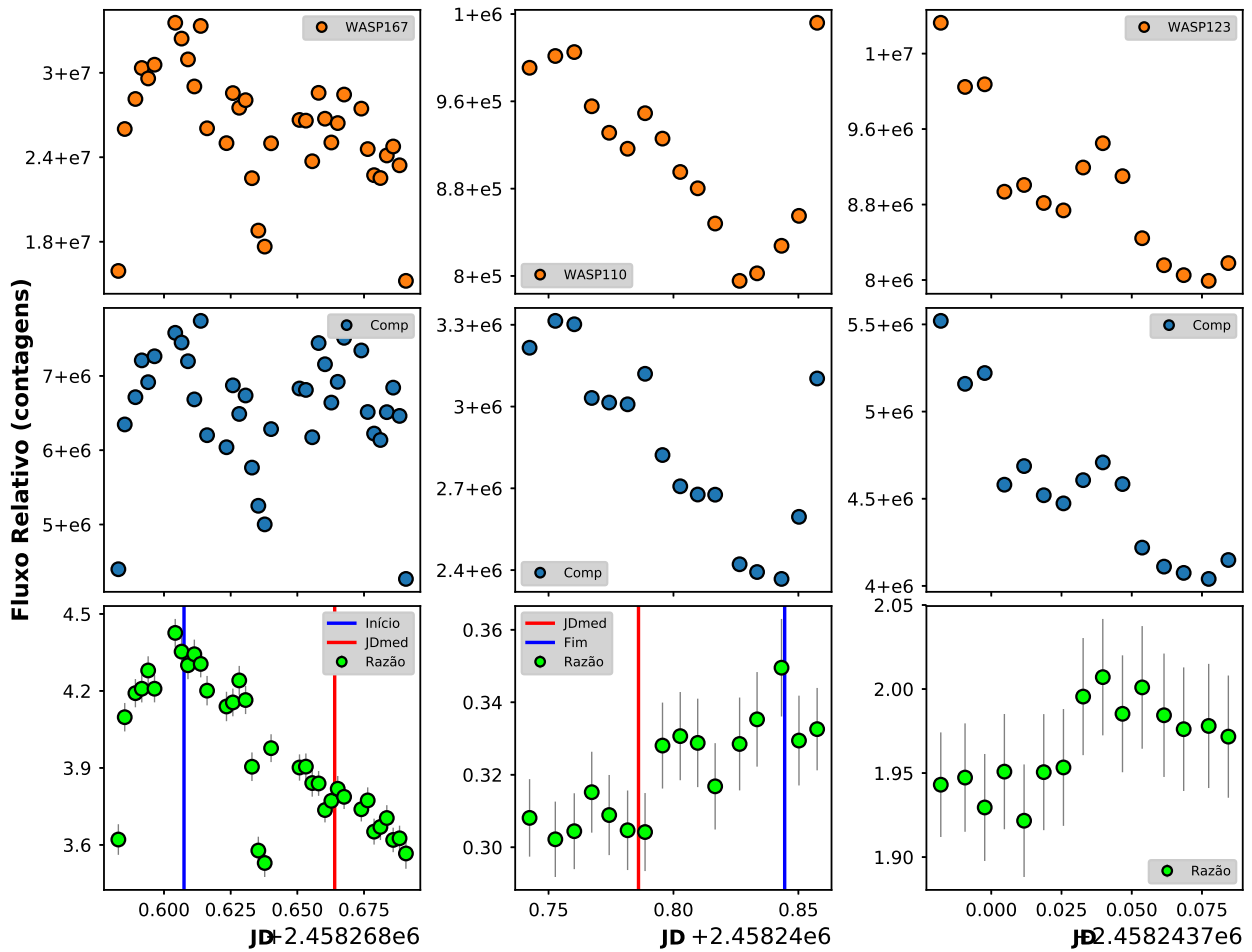


Figura 3.3: Mesma análise da figura 3.2, para as estrelas WASP-167, WASP-110 e WASP-123.

Nas figuras 3.2 e 3.3 nota-se uma tendência decrescente resultante na curva de luz do WASP-167b e WASP-95b¹. Nesses dois acompanhamentos o telescópio chegou a uma inclinação em torno de 60° do zênite, acentuando a massa de ar e conseqüentemente os efeitos da extinção atmosférica sofrido pela luz (fig.3.4). Na figura 3.5 foi analisado a queda do fluxo dos espectros em função do comprimento de onda ao longo da noite para os dois casos citados acima. Nota-se no gráfico superior e inferior da esquerda que a região azul dos espectros das estrelas alvo sofreram uma extinção mais acentuada. Nos gráficos da direita verifica-se que o espectro das estrelas alvo são mais intensos no azul do que as estrelas de comparação. Uma vez que o *bin* de 2000 Å utilizado para integração dos fluxos e geração das curvas de luz compreende grande parte dessa região de extinção

¹Na nomenclatura dos exoplanetas se coloca a letra 'b' em frente o nome de sua estrela hospedeira

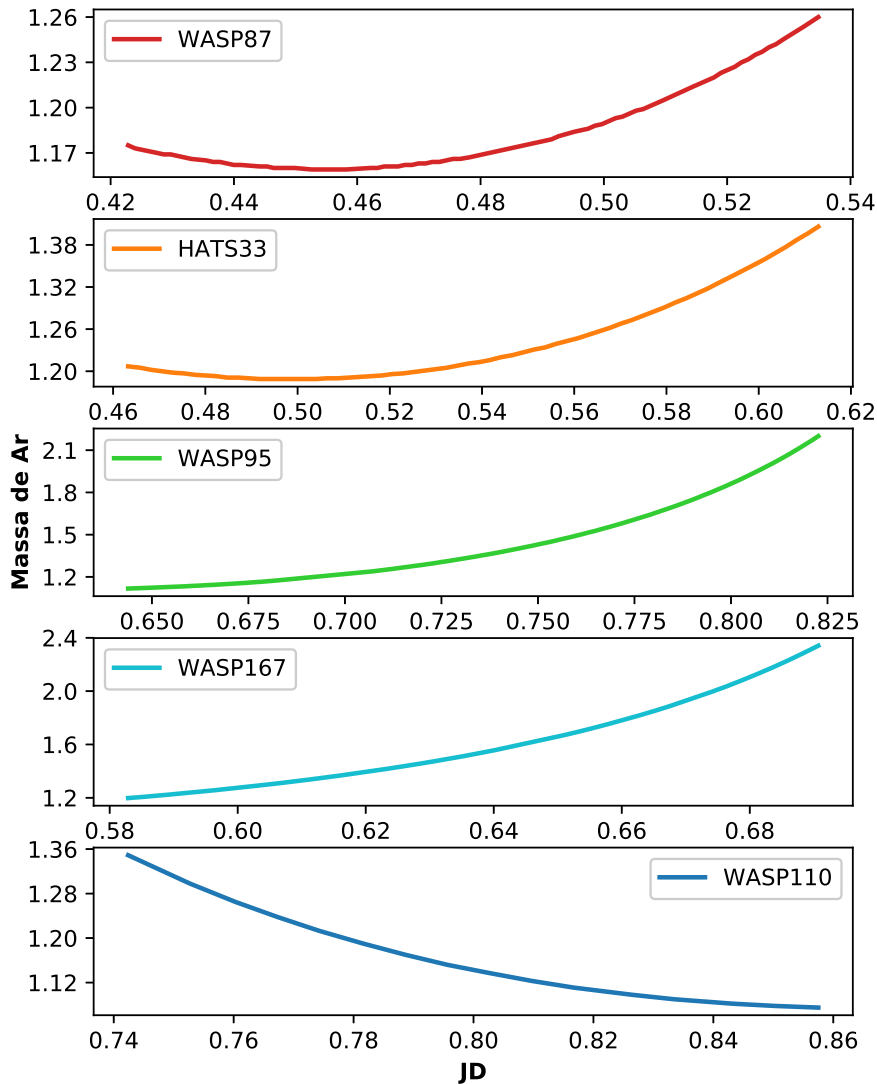


Figura 3.4: Variação da massa de ar ao longo do acompanhamento de cada objeto. A escala de tempo é em fração de dia juliano. O header das imagens do WASP-123 não continha informações da massa de ar.

diferencial, é de se esperar uma tendência decrescente na curva de luz, que foi o observado.

Os gráficos das curvas de luz mostram também o início, meio e fim do trânsito, segundo as efemérides do ETD, com exceção do WASP-123. O header das imagens do WASP-123 foram geradas sem *RA*, *DEC*, *AIRMASS*, *JD*, *ST* e *HA*. A data e hora indicadas no header das imagens foi convertida em JD para o ajuste a curva de luz, porém as efemérides não coincidiram com o trânsito do ETD.

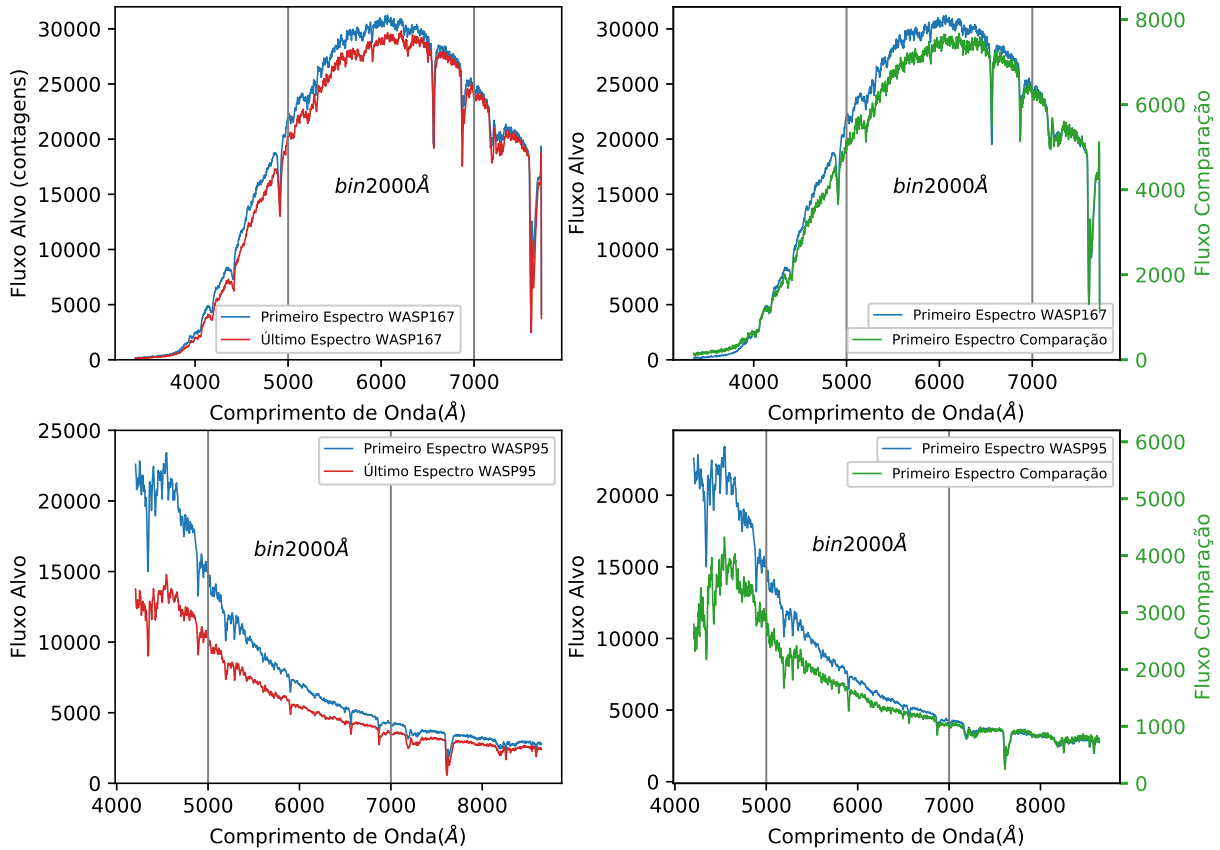


Figura 3.5: Fluxo (contagens) em função do comprimento de onda. *Esquerda Superior:* primeiro (azul) e o último (vermelho) espectro adquirido da estrela alvo WASP-167 durante a missão, um referente a uma posição superior no céu (próximo ao zênite) no início do acompanhamento, e o outro referente a uma posição inferior no céu (distante do zênite) no fim do acompanhamento. *Esquerda inferior:* idêntico ao superior da esquerda porém para o WASP95. *Direita superior e inferior:* Comparação do perfil dos espectros da estrela alvo (azul) e da comparação (verde) obtidos na primeira aquisição com menor massa de ar. O fluxo de cada uma foi plotado em diferentes eixos para fins de comparação. A região delimitada pelas retas cinzas é onde o fluxo foi integrado para gerar as curvas de luz.

3.1 Curvas Ajustadas com o ETD

Mesmo não obtendo o trânsito completo em nenhuma das observações e com uma dispersão nos dados da ordem ou maior que a profundidade de trânsito, o ETD foi capaz de ajustar a curva de luz para os trânsitos dos exoplanetas WASP-87b, HATS-33b, WASP-95b e WASP-167b. A intensidade do *limb darkening* utilizada para o ajuste do ETD foi estimada através de sua relação com o parâmetro de impacto, demonstrada por Sing (2010) (fig.3.6), dado que os tipos espectrais das estrelas WASP-87, HATS-33 e WASP-95 são F5, G5 e G2, respectivamente (tabela 2.2).

Dos casos acima, a curva de luz do WASP-87b (fig.3.7) apresentou a menor dispersão do ajuste, com um desvio padrão de 4.5 mmag e uma profundidade de trânsito $\delta = 8.4 \pm 4.0$ mmag, enquanto na referência bibliográfica a profundidade é de $\delta = 8.2 \pm 0.2$ mmag (Anderson et al., 2014). Durante o acompanhamento, o alvo se manteve dentro de um cone 35° do zênite, sofrendo assim uma menor extinção atmosférica. Com uma magnitude de 10.7, foi possível atingir a relação S/R estabelecida com exposições de 90 segundos, resultando em uma boa amostragem do trânsito, com 85 aquisições.

Para o ajuste da curva de luz do HATS-33b (fig.3.8), foi necessário remover a região entre 0.52 e 0.54 JD, onde houve cobertura total por nuvens. O ajuste apresentou um desvio padrão de 0.377 mag e uma profundidade de trânsito $\delta = 0.242 \pm 0.035$ mag, aproximadamente 14 vezes maior que o esperado, de $\delta = 0.017 \pm 0.002$ (Val-Borro et al., 2016). Possivelmente essa discrepância se deve ao fato de que, durante a passagem das nuvens, o *centroid* do auto-guider se perdeu, e quando as nuvens passaram ele reposicionou as estrelas em posições distintas da anterior na fenda, bloqueando parcialmente o fluxo da estrela de comparação.

Para o ajuste da curva de luz do WASP-95b (fig.3.9), foi necessário re-

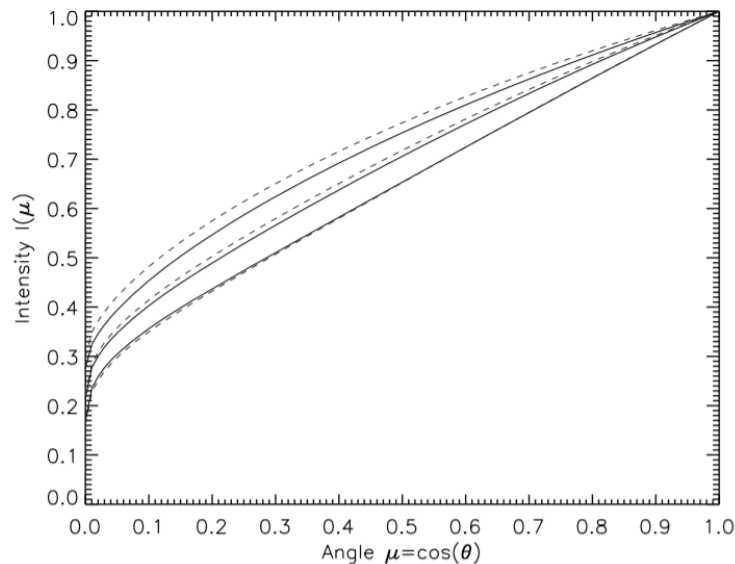


Figura 3.6: Intensidade do *limb darkening* para estrelas da missão CoRoT (linha sólida) e Kepler (linha pontilhada) em função do ângulo μ , correspondente ao parâmetro de impacto (0 para trânsito no centro do disco estelar e 1 para trânsito na borda). O gráfico apresenta a intensidade para os tipos espectrais F5V (superior), G5V (central) e K5V (inferior), com $T_{eff} = 6500, 5500, \text{ e } 4500$ K, respectivamente. *Créditos:* Sing (2010).

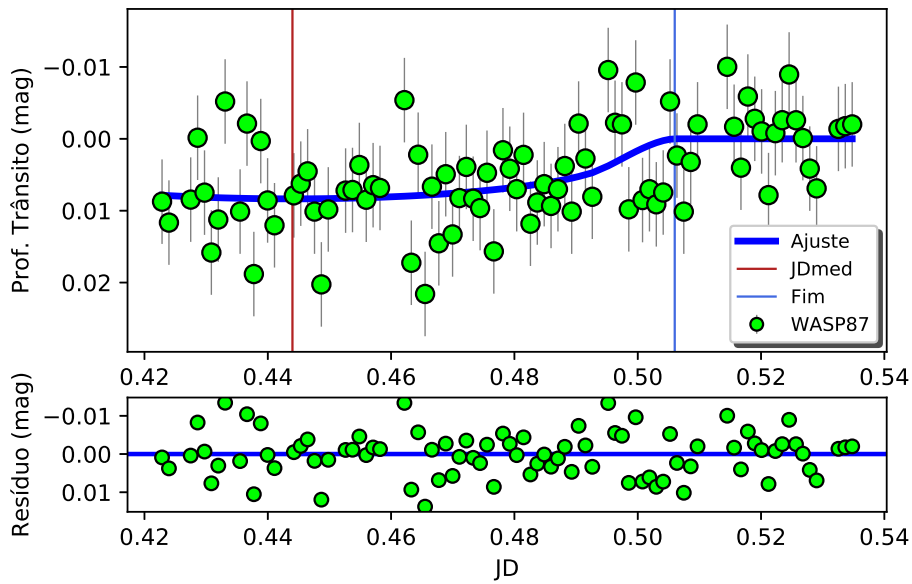


Figura 3.7: Ajuste da curva de luz do WASP-87b (superior) e resíduo do ajuste (inferior).

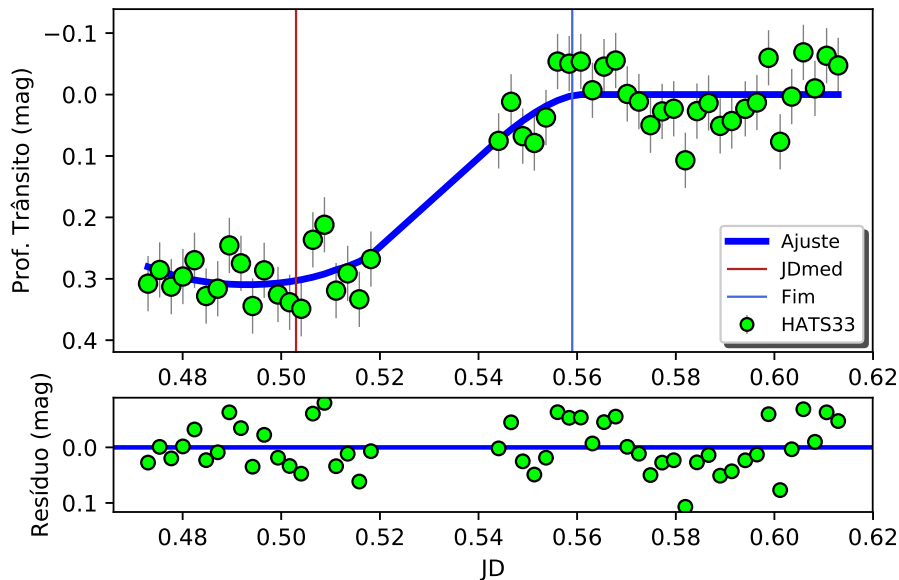


Figura 3.8: Ajuste da curva de luz do HATS-33b (superior) e resíduo do ajuste (inferior).

mover a tendência com um polinômio de segunda ordem, devido a extinção diferencial. O ajuste apresentou uma profundidade de trânsito $\delta = 11.6 \pm 29.8$ mmag, com um desvio padrão de 26.2 mmag, aproximadamente o dobro da profundidade de trânsito. O intervalo sem medição entre 0.68 e 0.71 JD foi devido a cobertura total por nuvens. Mesmo a profundidade de trânsito sendo próximo ao encontrado na literatura, de $\delta = 15.7 \pm 0.3$ mmag (Hellier et al., 2014), não procedemos a inferência dos parâmetros atmosféricos, pela alta dispersão.

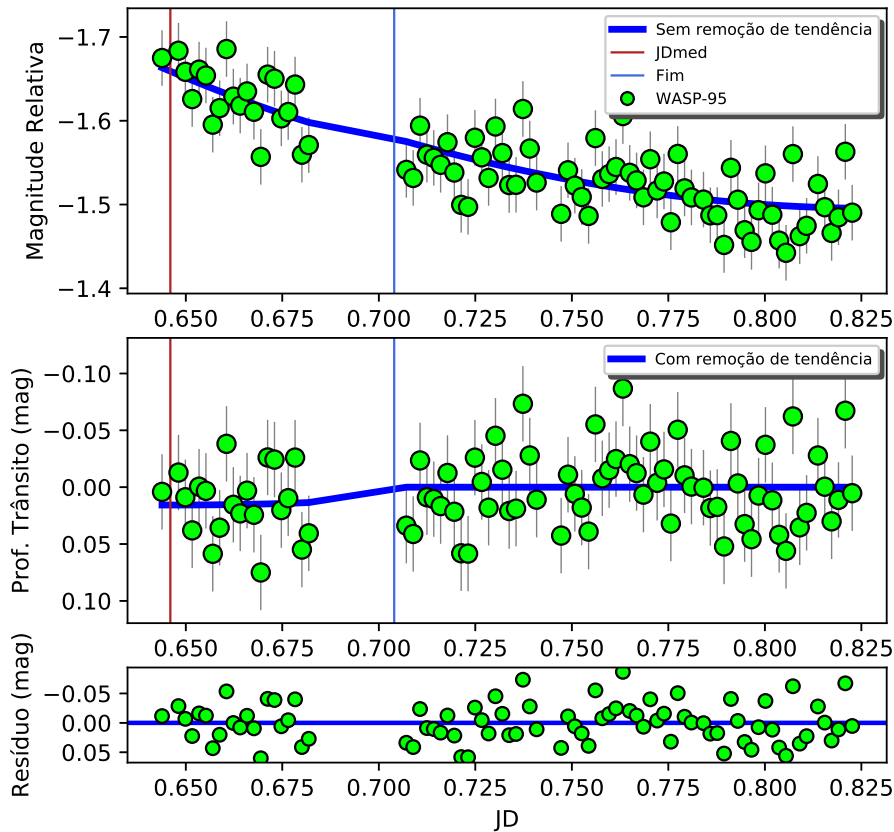


Figura 3.9: Ajuste da curva de luz do WASP-95b sem remoção de tendência (superior) e com remoção de tendência (centro).

O ajuste da curva de luz do WASP-167b (fig.3.10) pelo ETD só foi possível se os pontos mais dispersos da curva de luz (equivalentes aos pontos de menor fluxo das estrelas, possivelmente devido à passagem de nuvens) fossem removidos. Como mostrado na figura 3.5, o WASP-167 também sofreu extinção diferencial, resultando em uma forte tendência na curva de luz, e sendo necessário a remoção de tendência com um polinômio de primeira ordem. O ajuste gerou uma profundidade de trânsito $\delta = 17.5 \pm 10.9 \text{ mmag}$ com um desvio padrão de 7.8 mmag, aproximadamente o dobro do valor encontrado na literatura, de $\delta = 8.94 \pm 0.11 \text{ mmag}$ (Temple et al., 2017).

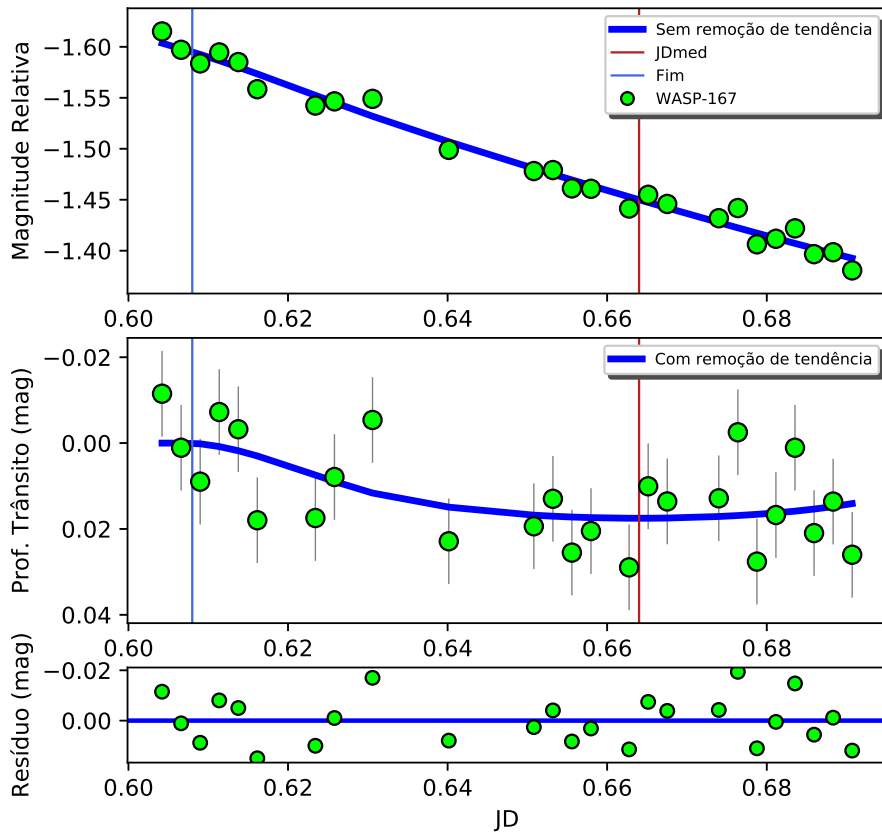


Figura 3.10: Ajuste da curva de luz do WASP-95b sem remoção de tendência (superior) e com remoção de tendência (centro).

3.2 Análise da Dispersão dos Dados

As curvas de luz apresentaram uma dispersão da ordem ou maior que a profundidade de trânsito. Para os objetos WASP-95, WASP-110, WASP-167 e WASP-123, era de se esperar uma maior dispersão e incerteza, dado que a relação S/R foi limitada pelo objeto de menor magnitude. Porém a amplitude do espalhamento das curvas de luz sugere que há outras fontes de ruído, possivelmente sistemáticas, alterando o fluxo das estrelas alvo e comparação de maneira distinta. Na tentativa de investigar essas possíveis fontes de erros, duas hipóteses foram levantadas através da análise da FWHM das imagens e considerando a largura padrão da fenda de $1.5''$. Para as estrelas HATS-33, WASP-110 e WASP-95, a FWHM se manteve entre 3 e 4 pixels, que com uma escala de placa de $0.56''/\text{pix}$, resulta em $\sim 1.7''$ a $2.2''$, que são valores esperados para o *seeing* do Pico dos Dias. Entretanto, para as estrelas WASP-87, WASP-123 e WASP-167, a FWHM se manteve em torno de 8 pixels, equivalente a $4.5''$, um valor acima do

esperado caso a PSF fosse limitada pelo *seeing*. Entretanto, como o telescópio foi levemente desfocado, é possível que esse resultado seja uma consequência do desfoque da PSF. A primeira hipótese então é que a dispersão dos dados pode ter sido causada pela convolução da estrela alvo e comparação com uma PSF desfocada, alterando o fluxo dos objetos de maneira distinta e introduzindo erros sistemáticos nos dados. Essa hipótese se sustentaria se as curvas de luz dos objetos com uma FWHM na faixa de 4" apresentassem uma dispersão maior que os outros objetos, porém esse não foi o caso, dado que o ajuste da curva de luz do WASP-87b apresentou o menor desvio padrão.

Analisando o perfil dos objetos com FWHM em torno de 4" , foi possível notar através de um corte perpendicular ao eixo de dispersão no CCD que em algumas imagens o pico (máximo) do fluxo era subdividido em 2 máximos secundários (fig. 3.11), e isso se repetia de forma aleatória para as imagens subsequentes. Se esse fenômeno fosse consequência do desfoque da PSF, era de se esperar que fosse mantido o mesmo padrão em todas as imagens, dado que uma PSF muito desfocada tende a transformar um ponto de luz em um objeto parecido com um anel, podendo criar esse perfil de dois picos quando espalhado pela fenda.

A segunda e mais provável hipótese para explicar a dispersão nos dados devido a erros sistemáticos é o efeito combinado da largura da fenda de 1.5" e a guiagem do *auto-guider*. A largura da fenda não era suficiente para cobrir toda a estrela, de modo que pequena parte da borda superior e inferior das estrelas alvo e comparação situavam-se fora da fenda, além de que o alinhamento das estrelas na fenda através do rotator foi ajustado manualmente, e por mais preciso que fosse, não era totalmente paralelo ao eixo da fenda. Desse modo, um pequeno deslocamento do telescópio durante a guiagem faria com que as estrelas mudassem de posição na fenda, podendo levar ao alargamento do perfil radial dos objetos e também subdividir o máximo do fluxo em dois picos secundários. Um teste feito no telescópio ZEISS 0.6m utilizando a técnica da espectrofotometria diferencial apresentou o mesmo resultado, com o aparecimento de dois picos na região de máximo dos objetos devido a uma defasagem no acompanhamento do *auto-guider*. Essa variação do fluxo das estrelas devido ao deslocamento em relação a fenda possivelmente fez com que a dispersão das curvas de luz fossem maior, dado que ela é gerada através da divisão do fluxo das estrelas.

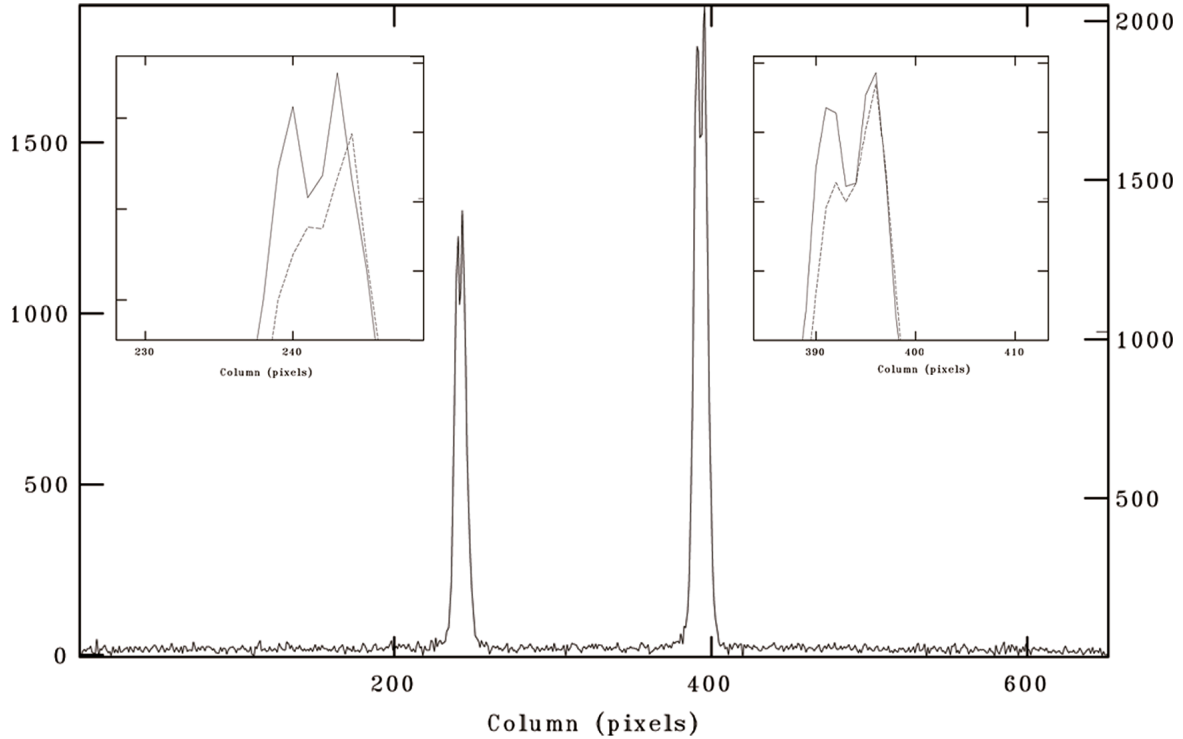


Figura 3.11: Corte na linha 1024 do CCD para uma imagem não reduzida da estrela WASP-87, onde o eixo da esquerda corresponde ao fluxo. Uma ampliação do pico das linhas é apresentada nos gráficos secundários, em conjunto com a sobreposição (pontilhado) do pico da imagem subsequente. É possível notar a subdivisão do pico em outros dois menores na primeira imagem, mas na imagem seguinte (linha pontilhada no gráfico secundário), ela já não é tão bem definida.

3.3 Caracterização Atmosférica

Dentre as curvas de luz ajustadas com o ETD, a do WASP-87b foi a que gerou uma profundidade de trânsito mais próxima do valor da literatura (discordância em torno de 2%), apresentou a menor dispersão do ajuste, sofreu a menor extinção diferencial e foi a melhor amostrada ao longo do trânsito, com 85 exposições. A junção desses fatores fizeram com que o método utilizado para gerar o espectro de transmissão (seção 2.4) fosse bem sucedido para esse caso. Para os demais trânsitos, a grande discrepância entre a profundidade de trânsito obtida e da literatura, ou a pouca quantidade de exposições disponíveis para combinação, gerou espectros de transmissão que não condiziam com os parâmetros físicos do planeta, como valores superestimados de $(R_p/R_\star)^2$, não sendo possível utilizar esses dados para ajustar modelos.

O espectro de transmissão obtido para o WASP-87b, com essa metodo-

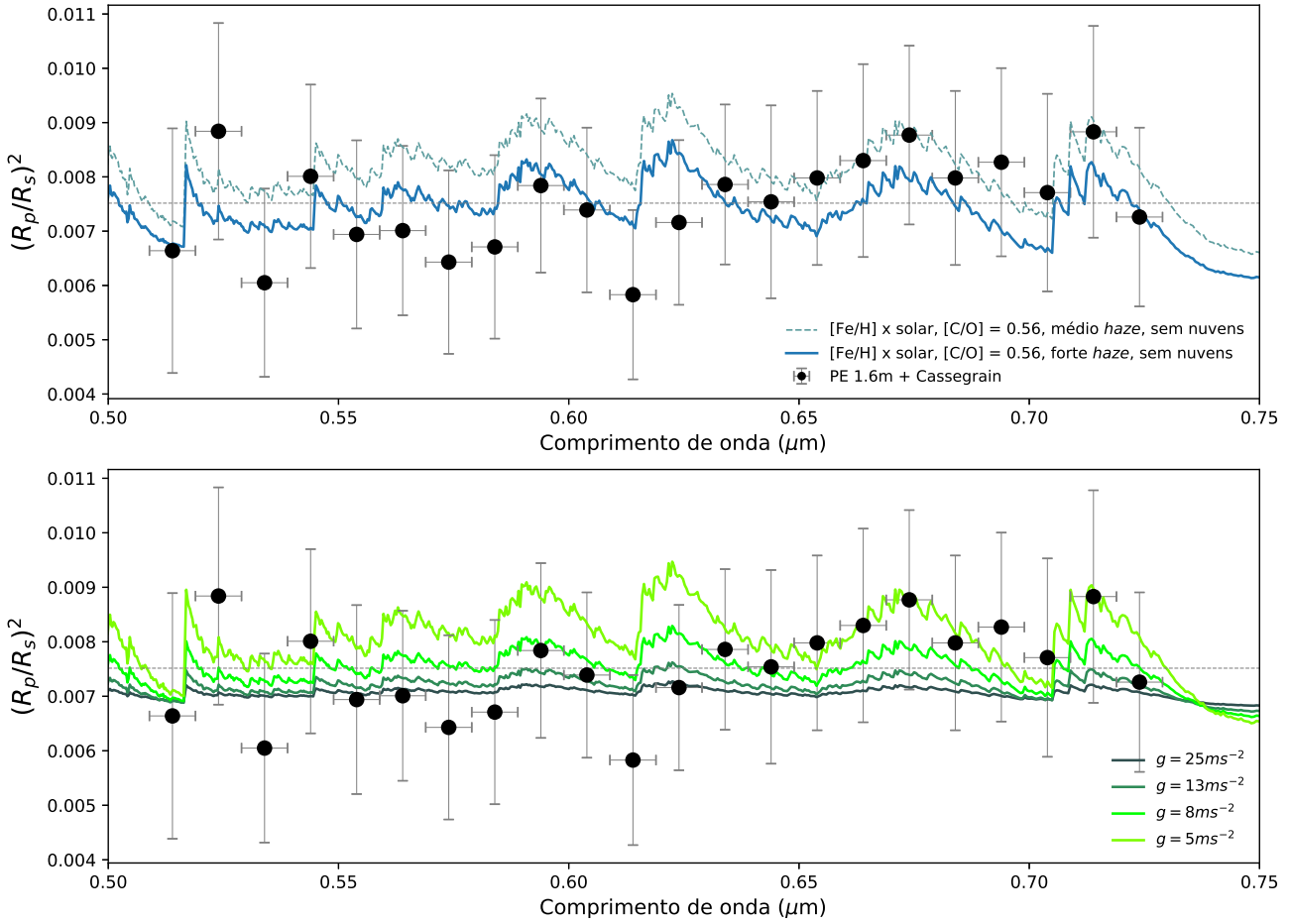


Figura 3.12: Espectro de transmissão obtido para o WASP-87b (pontos pretos), em unidades de $(R_p/R_*)^2$ por comprimento de onda. Os parâmetros de entrada para reescalonar os modelos para os valores do WASP-87b foram $R_p = 1.385R_{jup}$, $R_* = 1.627R_{sol}$ e $T = 2322K$, com uma gravidade fixa de $5ms^{-2}$ para o gráfico superior e variando de 5 a $25ms^{-2}$ para o gráfico inferior. Os modelos do gráfico superior representam os melhores ajustes, com $[Fe/H]$ x solar, $C/O = 0.56$ (solar), espalhamento médio (*haze* x 150) e forte (*haze* x 1100), e sem nuvens. Nos modelos do gráfico inferior foi utilizado $[Fe/H]$ x solar, $C/O = 0.56$, *haze* médio e sem nuvens. A reta pontilhada representa a média dos dados obtidos.

logia, é apresentado na figura 3.12. O gráfico superior contém 2 modelos gerados com o ATMO que melhor se ajustaram aos dados, e o inferior contém 4 modelos com gravidades distintas, ambos em um cenário químico de condensação global. O cálculo do erro de cada bin foi feito através da propagação do erro estatístico de Poisson, assim como na curva de luz. Foi feito um *script* em Python para propagar o erro da contagem dos pixels devido à combinação dos espectros, à divisão dos espectros, e por fim, à “binagem” dos espectros.

Os parâmetros de entrada utilizados para escalonar os modelos para o

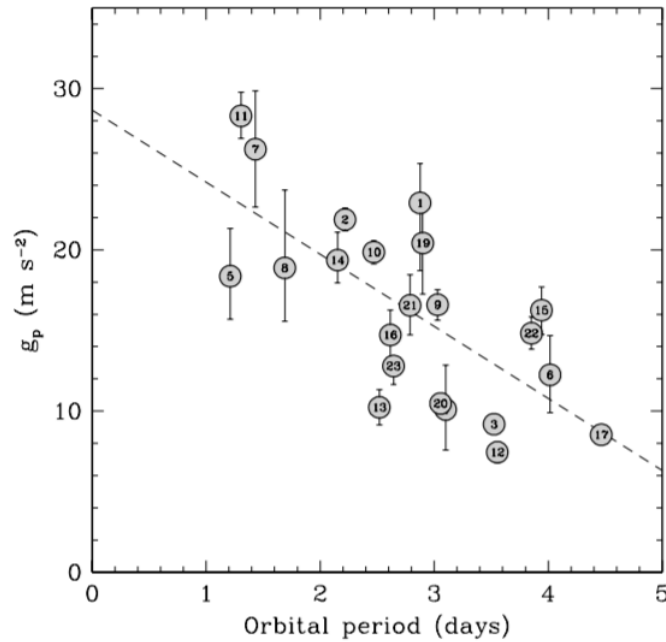


Figura 3.13: Relação entre gravidade superficial e período orbital para uma amostra de 22 Hot-Júpiters de curto período. *Créditos:* Torres et al. (2008).

WASP87-b foram $R_p = 1.385R_{jup}$, $R_* = 1.627R_{sol}$, $T = 2322K$ e $g = 5 ms^{-2}$. Com exceção da gravidade, esses valores foram obtidos por Anderson et al. (2014) através do método *Markov-Chain Monte Carlo* em conjunto com modelos estelares (Maxted et al., 2015), combinando curvas de luz fotométricas (telescópio TRAPPIST 0.6m) com a velocidade radial da estrela hospedeira (CORIALE, telescópio Leonhard Euler 1.2m). A gravidade superficial do planeta obtida por Anderson et al. (2014) com esse método foi de $g = 25,1 \pm 3.0 ms^{-2}$. A relação empírica entre gravidade superficial e período orbital demonstrada por Southworth et al. (2007) e Torres et al. (2008) corrobora com o valor obtido por Anderson et al. (2014), onde um planeta de curto período tende a ter uma maior gravidade superficial (fig. 3.13), como é o caso do WASP-87b, cujo período é de 1.68 dias.

O gráfico inferior da figura 3.12 mostra modelos de espectros de transmissão com diferentes gravidades. Segundo a equação 2.5, a escala de altura H é inversamente proporcional a gravidade, e a amplitude das estruturas do espectro de transmissão dependem diretamente de H (eq. 2.6). Desse modo, quanto maior a gravidade superficial, menor a amplitude das estruturas do espectro. Quando se utiliza $g = 25 ms^{-2}$ como parâmetro de entrada no ATMO, o espectro de transmissão gerado apresenta estruturas de absorção com amplitude da ordem de

0.1mmag, enquanto os dados apresentam variações da ordem de 1mmag (convertendo δ para magnitude). Amplitudes da ordem de 1mmag começam a aparecer nos modelos do ATMO quando a gravidade é em torno de $5ms^{-2}$, sugerindo que a gravidade superficial do WASP-87b é cinco vezes menor que a obtida por Anderson et al. (2014). Esse resultado, em conjunto com a ordem de grandeza da incerteza nos dados ($\pm 2mmag$), indica que a amplitude das estruturas do espectro de transmissão foram superestimadas.

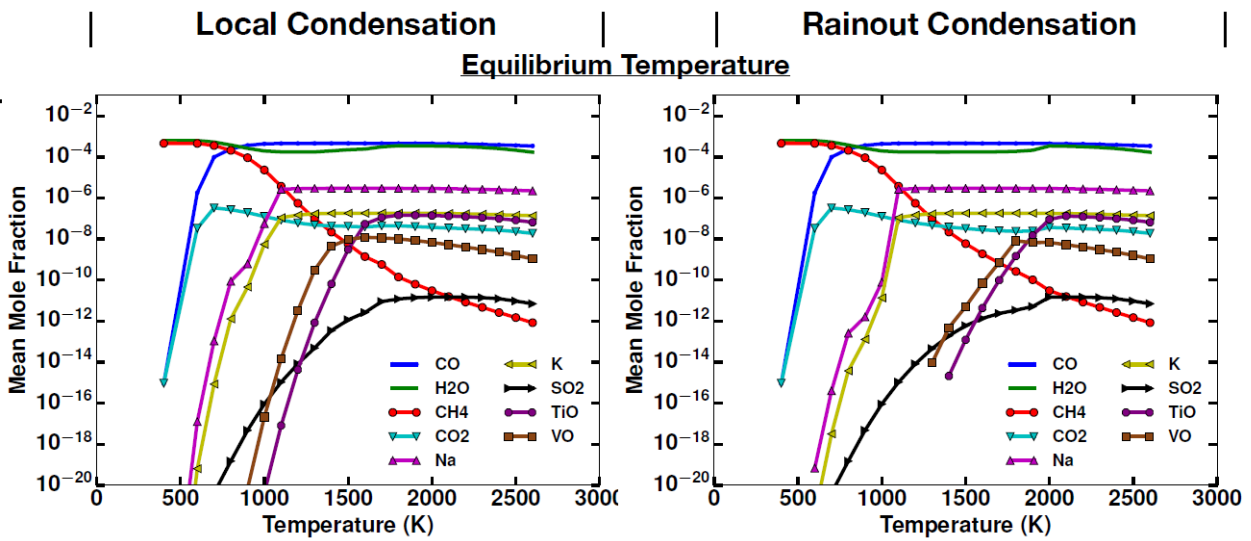


Figura 3.14: Variação da abundância química média em função da temperatura para um cenário químico com condensação local (esquerda) e condensação global (direita). Os parâmetros utilizados para geração dos modelos foram $R_p = R_{jup}$, $R_\star = R_{sol}$, $[Fe/H]$ solar, C/O solar, $haze \times 1$ e sem nuvens. Todos os pontos correspondem a um mesmo modelo com temperaturas diferentes. *Créditos:* Goyal et al. (2018).

A temperatura também é um dos fatores que mais influenciam no espectro de transmissão, sendo diretamente proporcional a H . No cenário químico de condensação local, modelos preveem o aumento da fração molar média de TiO e VO com o aumento da temperatura até 1400K, e na condensação global, até 1700K (fig. 3.14). Desse modo, temperaturas acima desses valores nos respectivos cenários químicos farão com que a absorção da radiação pela atmosfera na região do óptico seja dominada por TiO e VO, resultando em um espectro de transmissão dominado pelas estruturas de absorção dessas moléculas. Para atmosferas mais frias, as espécies condensadas de TiO e VO são menos abundantes e se encontram em camadas mais profundas da atmosfera, fazendo com que as linhas do Na, Li e K sejam dominantes no espectro de transmissão óptico. O modelo também prevê a presença de VO na fase gasosa a temperaturas acima de $\sim 2050K$, e para o TiO acima de $\sim 2350K$. A essas temperaturas, espera-se que o Na e K estejam ioniza-

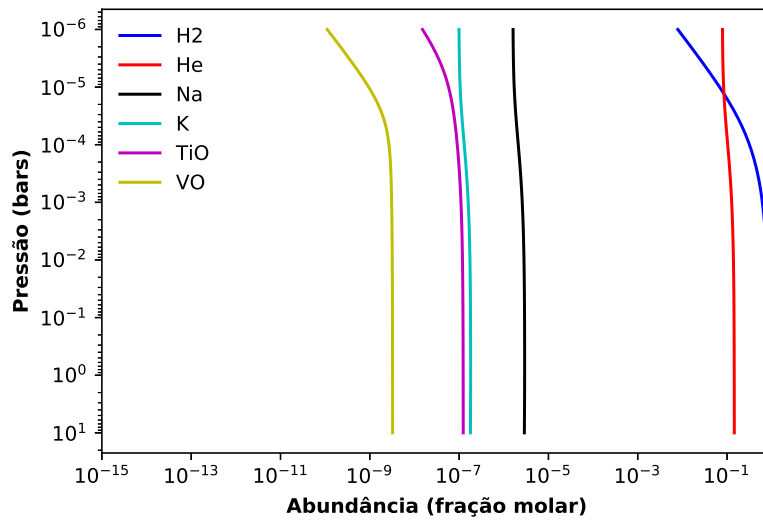


Figura 3.15: Abundância química em função da Pressão atmosférica para o melhor ajuste.

dos, porém o código do ATMO não inclui a ionização de elementos nos modelos. A detecção confirmada ou evidências da presença de TiO e/ou VO na atmosfera de Hot-Júpiter com $T_{eq} > 1700\text{K}$ foi encontrada para alguns desses planetas, como WASP-121b, com $T_{eq} = 2358\text{K}$ (Evans et al. (2016), Evans et al. (2017) e Evans et al. (2018)), WASP-19b, com $T_{eq} = 2077\text{K}$ (Sedaghati et al., 2017), WASP-12b, com $T_{eq} = 2593\text{K}$ (Stevenson et al., 2014) e WASP-74b, com $T_{eq} = 1926\text{K}$ (Mancini et al., 2019).

Dado que a temperatura de equilíbrio estimada para o WASP-87b é de 2322K (Anderson et al., 2014), espera-se que a essa temperatura as estruturas de absorção de Na e K sejam suprimidas pelas estruturas do TiO e VO e não apareçam no espectro de transmissão (região do óptico). O perfil do espectro de transmissão obtido parece estar de acordo com essa previsão, pois não há uma evidência clara da linha de absorção do sódio, centrada em $0.59\mu\text{m}$. A linha do potássio está centrada em torno de $0.77\mu\text{m}$ e não é amostrada pelos dados por se tratar de uma região de forte absorção telúrica da banda O₂ na atmosfera. Analisando o gráfico da abundância química correspondente ao modelo utilizado, também gerado com o ATMO (fig. 3.15), nota-se a presença de TiO e VO em concentrações (fração molar) da ordem de 10^{-7} e 10^{-8} , respectivamente. Como mostra o modelo, abundâncias de TiO e VO da ordem de 100 a 1000 vezes menores que a do Na e 10 a 100 vezes menores que a do K, respectivamente, são suficientes para suprimir as bandas de absorção desses elementos no espectro de transmissão.

A variação da razão C/O entre 0.35 e 0.70 não gerou mudança no perfil das estruturas do espectro de transmissão dos modelos, apenas no deslocamento do contínuo, que se deslocava ligeiramente para baixo da média dos dados com C/O = 0.70 e ligeiramente pra cima com C/O = 0.35. Isso se deve ao fato de que as abundâncias de TiO e VO estão diretamente relacionadas a razão C/O, onde uma menor razão C/O facilita a formação de compostos dependentes de oxigênio devido a sua maior abundância, e vice-versa (Madhusudhan, 2012). Para uma razão C/O ≥ 1 , a abundância de TiO e VO dos modelos decresce para altitudes maiores, chegando a frações molares da ordem de 10^{-13} e 10^{-15} para as regiões mais externas da atmosfera (fig. 3.16). Segundo Madhusudhan et al. (2011), uma atmosfera com razão C/O = 1 e $T_{eq} > 1400\text{K}$ terá a maioria do oxigênio ligado ao CO, reduzindo a abundância de H₂O e aumentando a abundância de CH₄ por um fator de duas a três ordens de magnitudes, quando comparado a uma razão C/O solar. Isso levará a uma abundância de TiO e VO de ~ 100 vezes menor que uma atmosfera com valor solar de C/O, fazendo com que as abundâncias de Na e K sejam as fontes dominantes de absorção no óptico do espectro de transmissão. O modelo gerado pelo ATMO para C/O = 1 está de acordo com essa previsão, porém não se ajusta aos dados (fig. 3.16), que por sua vez sugerem uma atmosfera rica em oxigênio para o WASP-87b, com C/O < 1 e sem a presença das linhas de Na e K.

O aumento da metalicidade [Fe/H] da atmosfera do planeta tipicamente

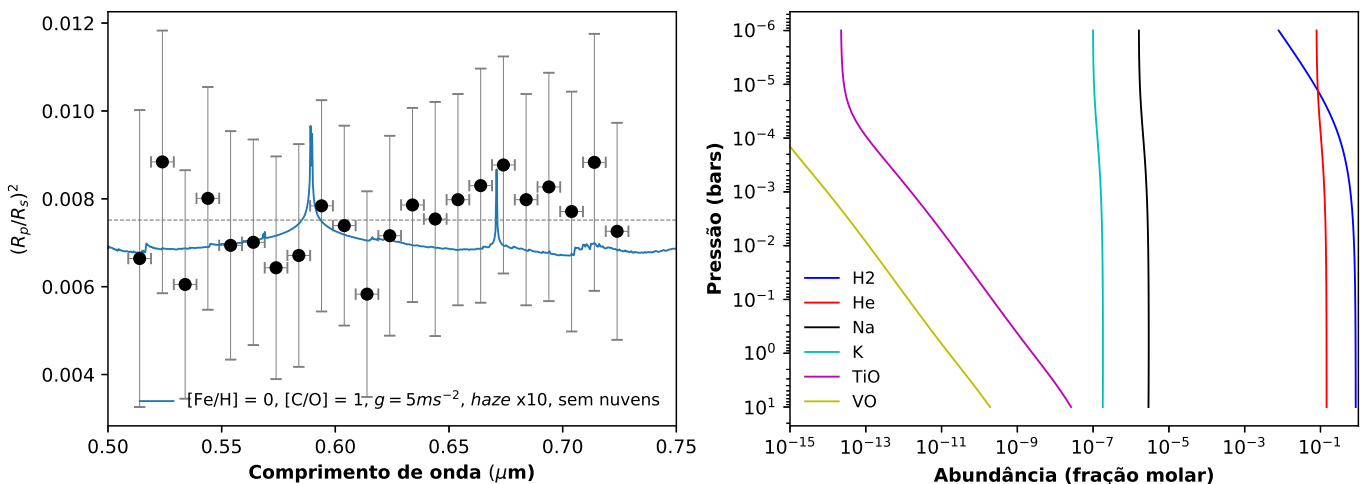


Figura 3.16: Modelo de espectro de transmissão gerado pelo ATMO para uma razão C/O = 1 (esquerda) e abundância química dos elementos desse modelo em função da pressão, onde menores valores de pressão equivalem a maiores altitudes na atmosfera.

leva a uma redução da escala de altura devido ao aumento do peso molecular médio (eq. 2.5), assim como uma redução nas amplitudes das estruturas do espectro (amplitude $\propto H$). A variação da metalicidade da atmosfera não gera mudanças significativas no perfil das estruturas na região do óptico, apenas no infravermelho médio, onde o aumento da metalicidade gera uma maior abundância de CO_2 e SO_2 , formando novas estruturas no espectro (fig. 2.11) (Goyal et al., 2018). Desse modo, a restrição da metalicidade da atmosfera do WASP-87b apenas com a região do óptico do espectro de transmissão disponível para análise pode gerar conclusões equivocadas.

Em relação ao ajuste dos dados, o aumento da metalicidade tendia a deslocar o contínuo dos modelos para valores maiores de $(R_p/R_\star)^2$, oposto ao que se esperava baseado na equação 2.5. Isso se deve ao fato do forte *haze* adicionado aos modelos, pois o aumento da metalicidade fará com que a abundância de gases como o CO_2 , CO , CH_4 e H_2O seja maior (maior opacidade) e contribua no espalhamento Rayleigh multi-gás implementado no código, deslocando o contínuo dos espectros para cima. A amplitude das estruturas diminuiu cada vez mais com o aumento da metalicidade, porém não houve nenhuma alteração no perfil das estruturas na região do óptico. Desse modo, a metalicidade cujo modelo melhor se ajustou aos dados foi a que teve o menor deslocamento em relação a média e que gerou uma amplitude das estruturas da mesma ordem de grandeza dos dados, e corresponde a $[\text{Fe}/\text{H}]$ solar. É importante notar que a amplitude das estruturas pode ter sido superestimada, como sugere o ajuste da gravidade superficial, o que induz a um ajuste com um valor subestimado de $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Não há referência na literatura para valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ da atmosfera do WASP-87b, apenas de sua estrela hospedeira, cuja metalicidade é de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.41 \pm 0.01$ (Anderson et al., 2014). Esforços foram feitos pela comunidade na tentativa de correlacionar a metalicidade das estrelas hospedeiras com a metalicidade dos planetas que as orbitam, porém nenhuma relação significativa foi encontrada, exceto que a razão entre a fração da massa de metais do planeta e da estrela Z_p/Z_\star geralmente é maior que 1 (Teske et al., 2019). A metalicidade encontrada com o ajuste satisfaz essa relação, entretanto, apenas essa relação e uma análise da região do óptico do espectro não é o suficiente para restringir valores de metalicidade para o WASP-87b. Seria necessário complementar os dados com observações no IR médio, onde a metalicidade está diretamente relacionada

ao perfil das estruturas.

Capítulo 4

Conclusão

O presente trabalho foi desenvolvido visando testar a viabilidade da caracterização da alta atmosfera de exoplanetas do Tipo Hot-Júpiters através do telescópio Perkin-Elmer de 1.6m do Pico dos Dias, utilizando a técnica da espectrofotometria diferencial do trânsito. Devido a alta relação S/R requerida para obter as curvas de luz do trânsito e gerar o espectro de transmissão da atmosfera desses planetas, a caracterização dessas atmosferas ainda é limitada à capacidade instrumental de telescópios espaciais e terrestres de grande e médio porte. Entretanto, através da espectrofotometria diferencial de baixa resolução em telescópios de pequeno porte (como o PE 1.6m), é possível atingir a relação S/R requerida com tempos maiores de exposição, mas ainda assim obter uma quantidade suficiente de exposições para amostrar a curva de luz do trânsito e gerar o espectro de transmissão óptico dessa atmosfera. Desse modo, o trânsito de 6 Hot-Júpiters com magnitude até 12 foi observado através da espectrofotometria diferencial com uma rede de 300 linhas/mm acoplada ao espectrógrafo Cassegrain, cobrindo o espectro óptico entre 0.4 e 0.8 μm .

4.1 Curvas de Luz

No geral, a qualidade dos dados foi comprometida pelas condições adversas das noites (como passagem de nuvens e interrupção nas observações devido a umidade alta) e possivelmente pela largura da fenda, que não foi o suficiente para

cobrir as estrelas. Isso resultou em curvas de luz cujas dispersões dos ajustes era da ordem ou maior que a profundidade de trânsito esperada.

A formação de dois picos na região de máximo do perfil radial de alguns objetos sugere que as estrelas oscilaram na fenda devido à guiagem, e essa oscilação em conjunto com uma fenda menor que o “diâmetro” da estrela, fez com a parte do fluxo perdido da estrela por estar fora da fenda fosse variável. Isso deveria acontecer igualmente para as duas estrelas, porém, como o alinhamento da fenda com as estrelas é feito de forma manual pelo rotator, eles acabam não sendo perfeitamente paralelos. Isso faz com que a perda de fluxo de cada objeto devido à sua oscilação na fenda (causado pela guiagem do telescópio) seja ligeiramente distinta, introduzindo erros sistemáticos nos dados e aumentando a dispersão da curva de luz. Testes para evidenciar efeitos sistemáticos e otimizar o tamanho da fenda poderiam ter sido realizados previamente às observações.

4.2 Parâmetros Atmosféricos

Em função da alta dispersão das curvas de luz, foi descartado o método do ajuste de curvas de luz individuais para cada *bin* como meio de obtenção do espectro de transmissão, utilizando então um método que consistia em combinar os espectros dentro e fora do trânsito, reduzindo assim fontes de erros aleatórias e aumentando a relação S/R dos *bins*. Só foi possível entretanto gerar um espectro de transmissão para o WASP-87b, que foi o caso com menor dispersão na curva de luz e com a maior quantidade de exposições para combinação.

Com uma temperatura de equilíbrio de 2322K e um raio de $1.38 R_{jup}$ (Anderson et al., 2014), os modelos ajustados aos dados pelo ATMO indicam uma atmosfera com uma forte bruma (*haze*), onde a absorção da luz pelos compostos TiO e VO dominam a região do óptico do espectro de transmissão, suprimindo as estruturas de absorção do Na e K, comumente encontradas em atmosferas com $T_{eq} < 1700K$ (Goyal et al., 2017). A ausência dessas estruturas de absorção de Na e K indicam uma atmosfera rica em oxigênio, com taxa C/O < 1 , pois em atmosferas ricas em carbono (C/O > 1) a abundância de TiO e VO decrescem e as estruturas de absorção do Na e K dominam o espectro de transmissão no óptico.

A gravidade superficial obtida com o modelo foi cinco vezes menor que a calculada por Anderson et al. (2014), sugerindo que a amplitude das estruturas de absorção do espectro de transmissão podem ter sido superestimadas em até 1mag. Isso impossibilita a restrição de valores para a metalicidade $[\text{Fe}/\text{H}]$ da atmosfera, pois na região do óptico a principal mudança gerada pelo aumento de $[\text{Fe}/\text{H}]$ é a redução da amplitude das estruturas. A caracterização apropriada da metalicidade apenas seria possível complementando o espectro de transmissão com pontos no infravermelho médio, onde valores distintos de $[\text{Fe}/\text{H}]$ estão associados a diferentes estruturas de absorções, como CO_2 e SO_2 .

4.3 Panorama Geral do Projeto de Pesquisa

O espectro de transmissão obtido para o WASP-87b através da espectrofotometria diferencial está de acordo com as previsões de modelos gerados com os mesmos parâmetros desse planeta. Os resultados também coincidem com espectros de transmissão da literatura obtidos para Hot-Júpiteres com $T_{eq} > 2000\text{K}$, como o WASP-121b (Evans et al., 2018), WASP-19b (Sedaghati et al., 2017) e WASP-12b (Stevenson et al., 2014). Esse resultado isolado não é o suficiente para confirmar a eficácia do método no telescópio PE, porém aponta para a viabilidade da utilização desse método em telescópios menores e incentiva novas observações, visando compreender melhor fontes de erro sistemáticas e restringir os limites de sua aplicabilidade.

De modo geral, o presente trabalho contemplou tópicos fundamentais de um projeto de pesquisa de mestrado, como estudo e compreensão de conceitos e fenômenos físicos inerentes a área de conhecimento, revisão bibliográfica, elaboração e submissão de projeto de pedido de tempo em observatório, operação de telescópios no modo presencial, aquisição de dados através de espectroscopia, redução de dados espectroscópicos com o IRAF, estudo e compreensão de modelos atmosféricos, a análise dos dados, e por fim, a elaboração da dissertação de mestrado.

Referências Bibliográficas

- Amundsen, D. S., Baraffe, I., Tremblin, P., Manners, J., Hayek, W., Mayne, N. J., and Acreman, D. M. (2014). Accuracy tests of radiation schemes used in hot jupiter global circulation models. *Astronomy & Astrophysics*, 564:A59.
- Anderson, D. R., Brown, D. J. A., Cameron, A. C., Delrez, L., Fumel, A., Gillon, M., Hellier, C., Jehin, E., Lendl, M., Maxted, P. F. L., Neveu-VanMalle, M., Pepe, F., Pollacco, D., Queloz, D., Rojo, P., Segransan, D., Serenelli, A. M., Smalley, B., Smith, A. M. S., Southworth, J., Triaud, A. H. M. J., Turner, O. D., Udry, S., and West, R. G. (2014). Six newly-discovered hot jupiters transiting f/g stars: Wasp-87b, wasp-108b, wasp-109b, wasp-110b, wasp-111b wasp-112b.
- Carter, A. L., Nikolov, N., Sing, D. K., Alam, M. K., Goyal, J. M., Mikal-Evans, T., Wakeford, H. R., Henry, G. W., Morrell, S., López-Morales, M., et al. (2019). Detection of na, k and h₂o in the hazy atmosphere of wasp-6b. *arXiv preprint arXiv:1911.12628*.
- Chen, G., Pallé, E., Welbanks, L., Prieto-Arranz, J., Madhusudhan, N., Gandhi, S., Casasayas-Barris, N., Murgas, F., Nortmann, L., Crouzet, N., et al. (2018). The gtc exoplanet transit spectroscopy survey-ix. detection of haze, na, k, and li in the super-neptune wasp-127b. *Astronomy & Astrophysics*, 616:A145.
- Cooper, C. S. and Showman, A. P. (2005). Dynamic meteorology at the photosphere of hd 209458b. *The Astrophysical Journal Letters*, 629(1):L45.
- de Wit, J., Lewis, N. K., Langton, J., Laughlin, G., Deming, D., Batygin, K., and Fortney, J. J. (2016). Direct measure of radiative and dynamical properties of an exoplanet atmosphere. *The Astrophysical Journal Letters*, 820(2):L33.
- Diamond-Lowe, H., Berta-Thompson, Z., Charbonneau, D., and Kempton, E. M.-

- R. (2018). Ground-based optical transmission spectroscopy of the small, rocky exoplanet gj 1132b. *The Astronomical Journal*, 156(2):42.
- Dobbs-Dixon, I. and Agol, E. (2013). Three-dimensional radiative-hydrodynamical simulations of the highly irradiated short-period exoplanet hd 189733b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(4):3159–3168.
- Evans, T. M., Sing, D. K., Goyal, J. M., Nikolov, N., Marley, M. S., Zahnle, K., Henry, G. W., Barstow, J. K., Alam, M. K., Sanz-Forcada, J., et al. (2018). An optical transmission spectrum for the ultra-hot jupiter wasp-121b measured with the hubble space telescope. *The Astronomical Journal*, 156(6):283.
- Evans, T. M., Sing, D. K., Kataria, T., Goyal, J., Nikolov, N., Wakeford, H. R., Deming, D., Marley, M. S., Amundsen, D. S., Ballester, G. E., et al. (2017). An ultrahot gas-giant exoplanet with a stratosphere. *Nature*, 548(7665):58.
- Evans, T. M., Sing, D. K., Wakeford, H. R., Nikolov, N., Ballester, G. E., Drummond, B., Kataria, T., Gibson, N. P., Amundsen, D. S., and Spake, J. (2016). Detection of h₂o and evidence for tio/vo in an ultra-hot exoplanet atmosphere. *The Astrophysical Journal Letters*, 822(1):L4.
- Fabrycky, D., Tremaine, S., and John, C. (2007). Shrinking binary and planetary orbits by kozai cycles with tidal friction. *The Astrophysical Journal*, 669(2):1298.
- Fischer, P. D., Knutson, H. A., Sing, D. K., Henry, G. W., Williamson, M. W., Fortney, J. J., Burrows, A. S., Kataria, T., Nikolov, N., Showman, A. P., et al. (2016). Hst hot-jupiter transmission spectral survey: Clear skies for cool saturn wasp-39b. *The Astrophysical Journal*, 827(1):19.
- Fortney, J. J., Shabram, M., Showman, A. P., Lian, Y., Freedman, R. S., Marley, M. S., and Lewis, N. K. (2010). Transmission spectra of three-dimensional hot jupiter model atmospheres. *The Astrophysical Journal*, 709(2):1396–1406.
- Gibson, N., Aigrain, S., Barstow, J., Evans, T., Fletcher, L., and Irwin, P. (2013). The optical transmission spectrum of the hot jupiter hat-p-32b: clouds explain the absence of broad spectral features? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436(4):2974–2988.
- Gillon, M., Demory, B.-O., Madhusudhan, N., Deming, D., Seager, S., Zsom, A., Knutson, H. A., Lanotte, A. A., Bonfils, X., Désert, J.-M., and et al. (2014).

- Search for a habitable terrestrial planet transiting the nearby red dwarf gj1214. *Astronomy Astrophysics*, 563:A21.
- Goyal, J. M., Mayne, N., Sing, D. K., Drummond, B., Tremblin, P., Amundsen, D. S., Evans, T., Carter, A. L., Spake, J., Baraffe, I., et al. (2017). A library of atmo forward model transmission spectra for hot jupiter exoplanets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474(4):5158–5185.
- Goyal, J. M., Wakeford, H. R., Mayne, N. J., Lewis, N. K., Drummond, B., and Sing, D. K. (2018). Fully scalable forward model grid of exoplanet transmission spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482(4):4503–4513.
- Hellier, C., Anderson, D. R., Cameron, A. C., Delrez, L., Gillon, M., Jehin, E., Lendl, M., Maxted, P. F. L., Pepe, F., Pollacco, D., and et al. (2014). Transiting hot jupiters from wasp-south, euler and trappist: Wasp-95b to wasp-101b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440(3):1982–1992.
- Kreidberg, L. (2017). Exoplanet atmosphere measurements from transmission spectroscopy and other planet star combined light observations. *Handbook of Exoplanets*, pages 1–23.
- Lecavelier des Etangs, A., Pont, F., Vidal-Madjar, A., and Sing, D. (2008). Rayleigh scattering in the transit spectrum of hd189733b. *Astronomy Astrophysics*, 481(2):L83–L86.
- Lendl, M., Cubillos, P., Hagelberg, J., Müller, A., Juvan, I., and Fossati, L. (2017). Signs of strong na and k absorption in the transmission spectrum of wasp-103b. *Astronomy & Astrophysics*, 606:A18.
- Libby-Roberts, J. E., Berta-Thompson, Z. K., Desert, J.-M., Masuda, K., Morley, C. V., Lopez, E. D., Deck, K. M., Fabrycky, D., Fortney, J. J., Line, M. R., et al. (2019). The featureless transmission spectra of two super-puff planets. *arXiv preprint arXiv:1910.12988*.
- Madhusudhan, N. (2012). C/o ratio as a dimension for characterizing exoplanetary atmospheres. *The Astrophysical Journal*, 758(1):36.
- Madhusudhan, N., Knutson, H., Fortney, J., and Barman, T. (2014a). Exoplanetary atmospheres. *arXiv preprint arXiv:1402.1169*.

- Madhusudhan, N., Knutson, H., Fortney, J., and Barman, T. (2014b). Exoplanetary atmospheres. *arXiv preprint arXiv:1402.1169*.
- Madhusudhan, N., Mousis, O., Johnson, T. V., and Lunine, J. I. (2011). Carbon-rich giant planets: Atmospheric chemistry, thermal inversions, spectra, and formation conditions. *The Astrophysical Journal*, 743(2):191.
- Mancini, L., Southworth, J., Mollière, P., Tregloan-Reed, J., Juvan, I., Chen, G., Sarkis, P., Bruni, I., Ciceri, S., Andersen, M., et al. (2019). Physical properties and transmission spectrum of the wasp-74 planetary system from multiband photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485(4):5168–5179.
- Mandel, K. and Agol, E. (2002). Analytic light curves for planetary transit searches. *The Astrophysical Journal*, 580(2):L171–L175.
- Matsuo, T., Shibai, H., Ootsubo, T., and Tamura, M. (2007). Planetary formation scenarios revisited: Core-accretion versus disk instability. *The Astrophysical Journal*, 662(2):1282.
- Maxted, P. F. L., Serenelli, A. M., and Southworth, J. (2015). Bayesian mass and age estimates for transiting exoplanet host stars. *Astronomy Astrophysics*, 575:A36.
- Mayor, M. and Queloz, D. (1995). A jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555):355.
- Palle, E., Chen, G., Prieto-Arranz, J., Nowak, G., Murgas, F., Nortmann, L., Pollacco, D., Lam, K., Montanes-Rodriguez, P., Parviainen, H., et al. (2017). Feature-rich transmission spectrum for wasp-127b-cloud-free skies for the puffiest known super-neptune? *Astronomy & Astrophysics*, 602:L15.
- Pearson, K. A., Griffith, C. A., Zellem, R. T., Koskinen, T. T., and Roudier, G. M. (2018). Ground-based spectroscopy of the exoplanet xo-2b using a systematic wavelength calibration. *The Astronomical Journal*, 157(1):21.
- Poddaný, S., Brát, L., and Pejcha, O. (2010). Exoplanet transit database. reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits. *New Astronomy*, 15(3):297–301.

- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. (2007). *Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing*. Cambridge university press.
- Sedaghati, E., Boffin, H. M., Jeřabková, T., Muñoz, A. G., Grenfell, J. L., Smette, A., Ivanov, V. D., Csizmadia, S., Cabrera, J., Kabath, P., et al. (2016). Potassium detection in the clear atmosphere of a hot-jupiter-fors2 transmission spectroscopy of wasp-17b. *Astronomy & Astrophysics*, 596:A47.
- Sedaghati, E., Boffin, H. M., MacDonald, R. J., Gandhi, S., Madhusudhan, N., Gibson, N. P., Oshagh, M., Claret, A., and Rauer, H. (2017). Detection of titanium oxide in the atmosphere of a hot jupiter. *Nature*, 549(7671):238.
- Sing, D. K. (2010). Stellar limb-darkening coefficients for corot and kepler. *Astronomy & Astrophysics*, 510:A21.
- Southworth, J., Wheatley, P. J., and Sams, G. (2007). A method for the direct determination of the surface gravities of transiting extrasolar planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 379(1):L11–L15.
- Stevenson, K. B. (2016). Quantifying and predicting the presence of clouds in exoplanet atmospheres. *The Astrophysical Journal Letters*, 817(2):L16.
- Stevenson, K. B., Bean, J. L., Seifahrt, A., Désert, J.-M., Madhusudhan, N., Bergmann, M., Kreidberg, L., and Homeier, D. (2014). Transmission spectroscopy of the hot jupiter wasp-12b from 0.7 to 5 μm . *The Astronomical Journal*, 147(6):161.
- Temple, L., Hellier, C., Albrow, M., Anderson, D., Bayliss, D., Beatty, T., Bieryla, A., Brown, D., Cargile, P., Collier Cameron, A., et al. (2017). Wasp-167b/kelt-13b: joint discovery of a hot jupiter transiting a rapidly rotating flv star. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471(3):2743–2752.
- Teske, J. K., Thorngren, D., Fortney, J. J., Hinkel, N., and Brewer, J. M. (2019). Do metal-rich stars make metal-rich planets? new insights on giant planet formation from host star abundances. *The Astronomical Journal*, 158(6):239.
- Tody, D. (1986). The iraf data reduction and analysis system. In *Instrumentation in astronomy VI*, volume 627, pages 733–748. International Society for Optics and Photonics.

- Torres, G., Winn, J. N., and Holman, M. J. (2008). Improved parameters for extrasolar transiting planets. *The Astrophysical Journal*, 677(2):1324.
- Val-Borro, M. d., Bakos, G. , Brahm, R., Hartman, J. D., Espinoza, N., Penev, K., Ciceri, S., Jordán, A., Bhatti, W., Csubry, Z., and et al. (2016). Hats-31b through hats-35b: Five transiting hot jupiters discovered by the hatsouth survey. *The Astronomical Journal*, 152(6):161.
- von Essen, C., Mallonn, M., Welbanks, L., Madhusudhan, N., Pinhas, A., Bouy, H., and Hansen, P. W. (2019). An optical transmission spectrum of the ultra-hot jupiter wasp-33 b-first indication of aluminum oxide in an exoplanet. *Astronomy & Astrophysics*, 622:A71.
- Wells, L. A. and Bell, D. J. (1994). Cleaning images of bad pixels and cosmic rays using iraf. *IRAF document*.
- Winn, J. N. (2010). Transits and occultations. *arXiv preprint arXiv:1001.2010*.