



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo



O tratamento de Ocultações Estelares com os pacotes PRAIA e SORA

Thiago Laidler Vidal Cunha

Rio de Janeiro
2023

O tratamento de Ocultações Estelares com os pacotes PRAIA e SORA

Thiago Laidler Vidal Cunha

Projeto Final da graduação submetido ao Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Orientador: Marcelo Assafin

Coorientador: Sérgio Santos-Filho

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

L185o Laidler Vidal Cunha, Thiago
Ocultações Estelares tratadas com os pacotes
PRAIA e SORA / Thiago Laidler Vidal Cunha. -- Rio
de Janeiro, 2023.
71 f.

Orientador: Marcelo Assafin.
Coorientador: Sérgio Santos-Filho.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório
do Valongo, Bacharel em Astronomia, 2023.

1. Ocultações Estelares. 2. Fotometria. 3.
Umbriel. I. Assafin, Marcelo, orient. II. Santos
Filho, Sérgio, coorient. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CCMN - OBSERVATÓRIO DO VALONGO
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA



PROJETO FINAL

RELATÓRIO DA COMISSÃO JULGADORA

ALUNO: Thiago Laidler Vidal Cunha (DRE 118030531)

TÍTULO DO TRABALHO: “O TRATAMENTO DE OCULTAÇÕES ESTELARES COM OS PACOTES PRAIA E SORA”

DATA DA DEFESA: 19 de dezembro de 2023 às 14:00 h

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Marcelo Assafin – Orientador/Presidente - (OV/UFRJ)

Prof. Bruno Morgado – (OV/UFRJ)

Prof. Júlio I. B. Camargo (ON/MCTIC)

Prof. Adrian Rodrigues – (OV/UFRJ)

Prof. Sérgio Santos Filho – (UFRJ/CEDERJ)

CANDIDATO:

Thiago Laidler Vidal Cunha

Rio de Janeiro, 19 de dezembro de 2023.

Prof. Carlos Roberto Rabaça
Coord. de Grad. do Curso de Astronomia

O presente trabalho foi realizado com apoio do
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico
e Tecnológico – (Brasil) CNPQ.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador Dr. Marcelo Assafin, pela compreensão e sabedoria para me orientar ao longo deste projeto, assim como ao Dr. Sérgio Santos-Filho e aos demais integrantes do Grupo do Rio. Sem o suporte, orientação e ajuda de vocês, eu não teria sido capaz de concluir este projeto com sucesso. Obrigado por todo o trabalho e dedicação que vocês demonstraram. Gostaria de agradecer também ao professor Dr. Bruno Morgado, por estar sempre disponível para tirar dúvidas sobre o SORA e por ser um excelente professor de computação e estatística.

Quero agradecer a todos os meus amigos e familiares, em especial ao meu pai Cesar Vidal Cunha, minha mãe Adriana Vieira Laidler e meu irmão Matheus Laidler Vidal Cunha. Seu amor, incentivo e apoio emocional foram fundamentais para que eu pudesse perseverar durante os momentos difíceis e alcançar minhas metas. Sem o amor e o suporte de vocês, eu não estaria aqui hoje.

Finalmente, gostaria de agradecer também aos meus tios, Cláudio Vidal e Cláudia Lassance, não só pelo apoio como também por me possibilitarem aprender a língua inglesa desde cedo, o que foi fundamental para a feitura deste trabalho e de minha formação. Agradeço também às minhas tias Alessandra Vieira Laidler e Christiane Vieira Laidler pelo apoio e incentivo.

Dedico este trabalho a todos vocês com todo o meu coração.

”É estupidez pedir aos deuses aquilo que se pode conseguir sozinho.”

— Epicuro

Resumo

O tratamento de Ocultações Estelares com os pacotes PRAIA e SORA

Thiago Laidler Vidal Cunha

Orientador: Marcelo Assafin

Coorientador: Sérgio Santos-Filho

RESUMO DO PROJETO FINAL DA GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO OBSERVATÓRIO DO VALONGO, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO NECESSÁRIO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM ASTRONOMIA.

O objetivo deste projeto de fim de graduação foi estudar as ocultações estelares, utilizando a ocultação de Umbriel, satélite de Urano. O estudo das características de corpos pequenos, como objetos transneptunianos (TNOs) e Centauros, muitas vezes só era possível por meios indiretos ou com telescópios espaciais, como o Hubble ou Spitzer. Por outro lado, de custo bem inferior, a observação de ocultações estelares, com telescópios terrestres, passou também a dar contribuições importantes para o conhecimento da periferia do Sistema Solar. As ocultações estelares permitem determinar as formas e tamanhos do corpo com precisão somente atingível por sondas (Sicardy et al., 2011). Cada observação do fenômeno gera uma curva de luz – a medida da variação do brilho da estrela com o tempo. A combinação dessas curvas permite a determinação do tamanho e da forma do corpo com precisão de quilômetros. Portanto, o objetivo deste projeto foi o de iniciar meu aprendizado nos conceitos e na técnica de tratamento de observações de ocultações estelares, para que no futuro eu possa contribuir, via ocultacoes estelares, com a exploracao de mais dados sobre os corpos do Sistema Solar Exterior. Para isso, foi utilizado o pacote PRAIA (Package for the Reduction of Astronomical Images Automatically) (Assafin et al., 2011) como ferramenta para obter e analisar as curvas de luz, e o SORA (Stellar Occultation Reduction and Analysis) (Gomes-Júnior et al., 2022) para o tratamento dessas curvas com vistas a obter as informações, como formato e tamanho do corpo, com base nos instantes de ingresso e egresso da ocultação. A ênfase na utilização desses softwares foi na ocultação por Umbriel, observada em 21 de setembro de 2020. Mesmo não sendo um objeto transnetuniano (TNO), Umbriel é uma lua de Urano e está posicionado na mesma região, no Sistema Solar Exterior.

palavras chave: *Ocultação Estelar, Fotometria, Sistema Solar*

Rio de Janeiro

2023

Abstract

The treatment of Stellar Occultations with the PRAIA and SORA packages.

Thiago Laidler Vidal Cunha

Advisor: Marcelo Assafin

Coorientador: Sérgio Santos-Filho

FINAL PROJECT ABSTRACT SUBMITTED TO VALONGO OBSERVATORY, FEDERAL UNIVERSITY OF RIO DE JANEIRO, IN FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE BACHELOR'S DEGREE IN ASTRONOMY.

The aim of this undergraduate project was to study stellar occultations, using the occultation of Umbriel, a moon of Uranus. The study of small body characteristics, such as Trans-Neptunian Objects (TNOs) and Centaurs, was previously only possible through indirect means or with space telescopes, such as Hubble or Spitzer. On the other hand, the observation of stellar occultations with ground-based telescopes, at a much lower cost, has also become a valuable contribution to understanding the outer regions of the Solar System. Stellar occultations allow for the precise determination of the shapes and sizes of celestial bodies, a level of accuracy otherwise achievable only by space probes (Sicardy et al., 2011). Each observation of the phenomenon generates a light curve – a measure of the star's brightness variation over time. The compilation of these curves enables the determination of the size and shape of the celestial body with kilometer-level precision. Therefore, the goal of this project is to help me understand the concepts and techniques in the context of stellar occultation so that I can contribute in the future to the exploration of more data about bodies in the Outer Solar System (beyond the orbit of Saturn). For this purpose, the PRAIA package (Package for the Reduction of Astronomical Images Automatically) (Assafin et al., 2011) is used as a tool to obtain and analyze light curves, and the SORA package (Stellar Occultation Reduction and Analysis) (Gomes-Júnior et al., 2022) for processing these curves to extract information such as the body's shape and size based on the moments of ingress and egress of the occultation. The focus of the use of such software was on the occultation of Umbriel, observed on September 21, 2020, which, although not a TNO, is a moon of Uranus and is located in the same region in the Outer Solar System.

keywords: *Stellar Occultation, Photometry, Solar System*

Rio de Janeiro

2023

Lista de Figuras

2.1	Projeção da sombra do corpo ocultador na superfície terrestre durante uma ocultação estelar. Devido à grande distância entre o corpo ocultador e a estrela de fundo, as dimensões e forma projetadas na superfície terrestre fornecem medidas precisas e exatas do corpo em quilômetros (km). A alta precisão das medidas fotométricas permite a obtenção de instantes de ingresso e egresso com grande precisão, resultando em estimativas altamente precisas da silhueta ou limbo do corpo ocultador, com variações da ordem de poucos quilômetros (km). Referência: International Occultation Timing Association (IOTA), editado por G. Benedetti-Rossi.	20
2.2	Visualização da ocultação de um TNO, Chariklo. Serve como um bom exemplo de uma curva em casos de ocultação estelar. (Reprodução artística) © Lucie Maquet - 2014.	21
2.3	Ocultação de Antiope via Kelly Beatty Sky & Telescope, 9 de Setembro de 2011, F. Colas, F. Marchis com amadores americanos e europeus. A imagem ilustra a projeção das cordas no plano do céu, em que os pontos de início e final do evento se ajustam na forma da silhueta do corpo, obtidos com precisão de km. Referência: David Dunham / International Occultation Timing Association (IOTA).	22
3.1	Ilustração do cálculo do Sinal/Ruído (S/R ou S/N) com base na abertura que circula o alvo, aplicada em um frame da ocultação de Umbriel. No caso, a abertura de 2 pixels de raio obteve o melhor valor e, portanto, deve ser escolhida.	25
3.2	Exemplo de coronagrafia digital retornada pelo PRAIA. No caso, o brilho de Urano é retirado da contagem dos pixels pois afetava a contagem de uma estrela ao seu redor. Imagem antes e depois da coronagrafia, da esquerda para direita.	33
3.3	Coronagrafia digital de Urano com suas luas, observada com o telescópio de 1,6 metros no Observatório do Pico dos Dias - OPD/LNA, Brasil (código IAU 874). Trata-se de imagens do mapa de cores invertidas antes (superior esquerdo) e depois (superior direito) da coronagrafia digital; os gráficos inferiores mostram os perfis de luz correspondentes de Miranda ao longo de um segmento que liga os centros de Urano e Miranda antes (esquerda) e depois da coronagrafia (Assafin, 2023a).	43

4.1	A figura à esquerda mostra os efeitos de difração de uma frente de onda causada por um corpo opaco bidimensional com bordas bem definidas (a chamada difração de Fresnel). A difração mudará o aspecto aparente do fluxo na entrada e saída do evento. Ela suaviza mais a queda próximo a entrada e saída do evento em cordas mais razantes, como pode ser visto na figura à direita. A variação de fluxo na entrada e saída dos eventos (na região crítica para a determinação dos instantes de entrada e saída da estrela durante a ocultação), causada pela difração observada no comprimento de onda λ a uma distância do corpo D , provoca um alargamento da sombra observada que pode ser estimada pela escala de Fresnel $f = \sqrt{D\lambda/2}$. Referência: Gomes-Júnior et al. (2022).	45
4.2	Representação de uma geometria de ocultação. S é a posição da estrela candidata, B_1 e B_2 são as efemérides do corpo nos tempos t_1 e t_2 , respectivamente, e mais próximas da estrela. Δ_1 e Δ_2 são as separações angulares da estrela em relação a B_1 e B_2 , respectivamente, enquanto ΔB é a separação angular entre as efemérides. CA é a distância de abordagem mais próxima. PA é o ângulo de posição da abordagem mais próxima do corpo à estrela. N e E indicam a direção celestial Norte e Leste no plano tangente. Referência: Gomes-Júnior et al. (2022).	47
4.3	Na imagem, são evidenciadas todas as considerações essenciais para otimizar a precisão do modelo aplicado à curva de luz, visando a obtenção acurada dos tempos de ingresso e egresso. Os pontos vermelhos na curva representam a resposta instrumental, refletindo as informações adquiridas por frame, com a largura de cada linha correspondendo ao tempo de exposição. A representação em azul ilustra o efeito esperado na curva de luz ao levar em consideração o tamanho aparente da estrela durante a ocultação, resultando em uma suavização sutil devido ao desaparecimento gradual da estrela. O destaque em verde indica o Modelo Geométrico, também conhecido como modelo caixa, que representa a forma mais simples de modelar uma curva de luz durante uma ocultação. Por fim, o destaque em preto enfoca a difração de Fresnel, previamente discutida. Referência da imagem: Dr Bruno Morgado.	48
4.4	Exemplo de saída do SORA. Após ajustada o modelo da curva, retornase os valores do tempo de imersão e tempo de emersão com suas devidas incertezas. OBS: Perceba que a distribuição de χ^2 está assimétrica. Isso se deve à limitação da janela de tempo, imposta pelo usuário, para o SORA testar os modelos. Isso resulta em uma incerteza (em 3-sigma) não confiável, e nesses casos o usuário deve alterar essa restrição e tentar novamente.	49
4.5	19 cordas positivas (azul) ajustadas a uma borda circular e 5 cordas negativas (verde). A barra de erro (1σ) é representada nas extremidades das cordas (vermelho). O diâmetro obtido é de 1164.8 km. O ajuste da borda aparente com uma elipse é visualmente indistinguível. No plano do céu (f, g) , o norte está para cima e o leste está para a esquerda, com (f_0, g_0) sendo os deslocamentos das efemérides. O meridiano destacado está no plano que contém os polos de Umbriel e Urano, e indica onde o suposto elipsoide de Umbriel seria mais oblato, já que o satélite está em "equilíbrio de maré" com o planeta. Referência: Assafin et al. (2023). . . .	53

5.1	A ocultação de Umbriel ocorreu em 21 de Setembro de 2020, e pôde ser visto em território norte americano.	55
5.2	Localização de alguns observadores via satélite. Os pontos verdes referem-se aos observadores que obtiveram cordas positivas, e os pontos vermelhos aos observadores que obtiveram cordas negativas. Imagens de Google Earth.	55
6.1	Coronagrafia digital aplicada à observação de Urano. Da esquerda para o meio e para a direita temos a imagem original, o brilho de perfil obtido de Urano isolado, e a imagem coronagrafada. Os satélites de cima a baixo são Titânia, Ariel, Miranda, Umbriel e Oberon. Referência: Assafin et al. (2009).	58
6.2	Curva de luz da ocultação de Umbriel, relativa ao observador 'Kai Getroski'. O sinal 'Sky' é o fluxo do fundo de céu; perceba como Umbriel sempre tem fluxo acima deste durante o evento, indicando que a fotometria captou um fluxo residual. OBS: Nessa observação, houve a necessidade de aplicar coronagrafia digital.	59
6.3	Curva de luz da ocultação de Umbriel, relativa ao observador 'G. Viscome'. OBS: Não houve a necessidade de aplicar coronagrafia digital, perceba que os ruídos de fundo de céu se interceptam menos do que na curva anterior.	59
6.4	Curva de luz da ocultação por Umbriel, em que os pontos marcados em azul são utilizados para o cálculo do modelo. Observador Barton Billard.	60
6.5	Curva de luz da ocultação por Umbriel junto com seu modelo já ajustado e seus resultados finais. Observador Jerry Bardecker.	61
6.6	Curva de luz de Umbriel. Observador Paul Maley.	61
6.7	Curva de luz de Umbriel. Observador George Viscome	61
6.8	Curva de luz de Umbriel. Observador David Dunham	62
6.9	Curva de luz de Umbriel. Observador Kai Getrost	62
6.10	Curva de luz de Umbriel. Observador Bob Dunford	62
6.11	Curva de luz da ocultação de Umbriel, chamada de 'negativa' pois não observa o evento. Ainda assim, não é o presente caso, essas observações podem ser muito úteis para descobertas interessantes, como a de objetos orbitantes ao corpo ocultador ou a detecção de uma atmosfera.	63
6.12	Cálculo do chi quadrado das medidas de tempo de ingresso e egresso da curva de Viscome. Seu resultado foi de 0.663 qui quadrado mínimo por grau de liberdade.	63
6.13	O conjunto de curvas de luz tratadas, projetadas no plano do céu, resulta na silhueta do corpo estudado, no caso Umbriel. Os valores referentes ao achatamento e ângulo do semieixo maior foram nulos. Já o cálculo de seu raio, em 3-sigma foi de 582.423 ± 0.804 km. O valor de mínimo quadrado por grau de liberdade foi de 18.013 para 19 cordas tratadas. As linhas em verde são referentes às cordas negativas. A figura 4.5 mostra a ilustração final.	64

Lista de Tabelas

4.1	Informações sobre a estrela, Umbriel e Urano durante a ocultação.	51
4.2	Ajustes da borda circular e elíptica de Umbriel a partir das 19 cordas positivas.	52
5.1	Tabela de todas as observações de Umbriel, incluindo a posição de cada observador, a razão focal, tempo de exposição, tempo de ciclo e status da corda. Em Status temos N para cordas <i>Negativas</i> , P para cordas <i>Positivas</i> , L para gravação de vídeo perdida, T para problemas técnicos e O para nublado. Detectores: 1 = QHY 174, 2 = QHY 174M, 3 = Watec 910HX, 4 = Watec 120N+, 5 = Celestron Skyris 618M, 6 = Watec 910BD, 7 = Mallincam, 8 = ZWO ASI224MC, 9 = RunCam Night Eagle Astro. Cordas ordenadas de norte a sul no plano do céu. Referência: Assafin et al. (2023).	56
6.1	Tabela com os instantes de ingresso/egresso de cada corda. Coronografia (Coro): C e N significam com coronagrafia ou sem coronagrafia. Calibração fotométrica (Cal): C e N significam calibrado ou não calibrado. A dispersão da razão de fluxo da curva de luz normalizada $\sigma(\text{fluxo})$ é o desvio padrão calculado fora da ocultação. Os deslocamentos $(O-C)_{IN}$ (entrada) e $(O-C)_{EG}$ (saída) são as diferenças de distância radial entre os extremos da corda medida e os limites circulares/elípticos ajustados, com valores positivos/negativos para extremos fora/dentro dos limites (consulte a Seção 4.2). Os erros $(O-C)$ são os erros medidos da corda nas extremidades projetados nas direções radiais; eles são os mesmos para limites circulares/elípticos. As cordas são ordenadas de norte a sul no plano do céu. Referência: Assafin et al. (2023).	60
7.1	Características físicas e astrometria de Umbriel a partir da ocultação estelar de 21 de setembro de 2020. Resultados da Voyager II também estão listados para comparação.	66

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Contexto científico	14
1.2	Fotometria em ocultações estelares	18
1.3	Análise de curvas de ocultações estelares	18
1.4	Objetivo do trabalho	19
2	Ocultação Estelar	20
3	Fotometria para Obtenção das Curvas de Luz: pacote PRAIA	23
3.1	Fotometria com o pacote PRAIA	23
3.1.1	Guias, calibradores, alvos e imagens de referência	27
3.1.2	BOIA (Browsing Objects: Identification and Analysis) - detecção de objetos, localização e otimização de abertura	28
3.1.2.1	Detecção automática de objetos com o BOIA	29
3.1.2.2	BOIA para aberturas fixas	29
3.1.2.3	BOIA para aberturas variáveis	29
3.1.3	Centragem do objeto: Photogravity Center Method (PGM)	30
3.1.4	Rastreamento de objetos fixos e em movimento	31
3.1.5	Construindo curvas de luz com PRAIA	32
3.1.6	Coronagrafia digital com o pacote PRAIA	33
3.1.6.1	Normalização do fundo de céu	34
3.1.6.2	O objeto de referência	34
3.1.6.3	A fonte	35
3.1.6.4	O centro e a elipse da coronagrafia	36
3.1.6.5	Aneis elípticos e aberturas	37
3.1.6.6	Estatísticas de Quartis com Anéis	39
3.1.6.7	Coronagrafia digital	42
4	Análise das Curvas de Luz e Ajuste de Limbo: pacote SORA	44
4.1	Análise de curva de ocultações estelares com o pacote SORA	44
4.2	Ajuste do Limbo aparente (forma e tamanho)	50
5	A Ocultação Estelar de Umbriel de 21 de Setembro de 2020	54
6	Resultados e Análise da Ocultação de Umbriel	57
6.1	Curvas de luz e instantes de ingresso e egresso	57
6.2	Forma de Umbriel	59
7	Conclusões e Perspectivas	65

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto científico

O estudo sistemático do Sistema Solar começou com o mapeamento cinemático de seus constituintes e posteriormente com o estudo de sua dinâmica. A Astronomia Fundamental e a Mecânica Celeste cumprem papel central nesse contexto. Ensaio modernos baseados na integração direta das equações de movimento têm ampliado nosso entendimento dos cenários de formação do Sistema Solar e de sua evolução, como a migração dos planetas gigantes e os efeitos da evolução das regiões de ressonância sobre os pequenos corpos, descritos pelo Modelo de Nice (Gomes, 2009). Nesse contexto, é de suma importância a investigação do Sistema Solar Exterior, que inclui Centauros: entre as órbitas de Saturno e Netuno, e Transneptunianos: em torno das orbitas de Netuno e além (incluindo Plutão). Estes objetos tem tipicamente da ordem de 500 km de diâmetro e situam-se entre cerca de 15 a 100 UA (1 UA = distância média Sol – Terra, cerca de 150 milhões de km).

O estudo das órbitas dos corpos dessa parte do Sistema Solar e de suas características físicas ajuda a entender os mecanismos mais prováveis para a evolução do Sistema Solar como um todo, desde o passado até o seu estado atual, e futuro. Esse estudo permite responder a questões importantes sobre a formação e evolução do Sistema Solar na época da formação planetária, e a definir melhor as condições em que os planetas se formaram.

De fato, considerando a distribuição das órbitas dos TNOs e as características dos discos de poeira observados em outras estrelas, conclui-se que estes objetos devem ter se formado na parte mais interna do sistema solar (região hoje ocupada por Júpiter). Eles teriam sido colocados, pelo menos em parte, nas suas órbitas atuais devido a troca de

momento angular entre os planetas em formação e os planetesimais, o que ocasionou a migração dos planetas atuais (fora Júpiter) essencialmente para a parte mais externa do Sistema Solar. Nesta evolução, a passagem dos planetas e planetesimais por regiões de ressonância orbital (ressonância de movimento médio), definiu a distribuição atual dos planetas e dos planetesimais que seriam os TNOs. Essas passagens teriam permitido colocar asteroides co-orbitando Júpiter – os troianos (Morbidelli et al., 2005). Teriam permitido Júpiter e Saturno capturarem gravitacionalmente objetos menores, de forma irregular, por vezes em órbitas retrógradas, e de inclinações diversas – os satélites irregulares desses planetas (Nesvorný et al., 2013). E teriam até mesmo carregado corpos maiores para dentro do Cinturão Principal de asteroides, como visto para Ceres em Gomes et al. (2005) e Gomes-Júnior et al. (2015).

Por serem formados e/ou situados a distâncias muito grandes do Sol, os TNOs guardam estruturas e composições relativamente inalteradas em relação a sua época de formação, constituindo-se assim em fósseis de grande valor para o estudo da origem do Sistema Solar. O conhecimento de parâmetros dinâmicos e físicos de Centauros e TNOs é essencial para confirmar ou refinar o Modelo de Nice e alternativas, e vários de seus detalhes e previsões, além de valores de parâmetros usados na sua formulação. Com a crescente descoberta de milhares de planetas extra-solares, ou exoplanetas, redobrou-se a importância do estudo da estrutura e evolução do Sistema Solar, já que a compreensão dos mecanismos de formação dos planetas e corpos de nosso sistema traz valiosas informações sobre a origem e evolução de exoplanetas, incluindo as questões de viabilidade de formação planetária em ambientes que comportem vida em outros sistemas estelares. São questões como essas que realçam a importância do estudo contínuo do Sistema Solar Exterior.

Entretanto, esta região ainda foi relativamente pouco explorada. Ao contrário da parte mais interna, onde planetas como Vênus, Marte, Júpiter e Saturno têm ou tiveram sondas que os orbitaram e estudaram a fundo, apenas as sondas Voyager I e II na década de 80 visitaram de passagem, sem orbitar, os planetas Urano e Netuno. Apenas dois corpos foram visitados pela mesma sonda além da órbita de Netuno: o planeta-anão Plutão (Stern et al., 2015) e o TNO Arrokoth (Keane et al., 2022), dentro da Missão Espacial New Horizons da NASA. Apesar do grande impacto científico destas visitas, com dados colhidos ainda sendo estudados, a altíssima velocidade de passagem da sonda por esses sistemas não permite um estudo mais completo desses corpos e seus arredores. O mesmo ocorreu com as sondas Voyager, com o agravante de que estas possuíam instrumentos ainda mais simples. Note-se que Centauros e TNOs começaram a ser descobertos apenas recentemente, a partir do final do século passado. Tirando Plutão, o primeiro TNO foi descoberto faz pouco mais de 25 anos (Jewitt & Luu, 1993). A caracterização da distribuição espacial de TNOs ainda está no início. Por isso, as

propriedades básicas desta população ainda não estão claramente estabelecidas, como a distribuição de tamanhos, composição e estruturas internas. Há uma população que se espalha no disco ou plano da Eclíptica (plano orbital da Terra, basicamente o mesmo dos demais planetas), já outra se afasta com inclinações orbitais significativas, maiores do que 10 graus. Alguns objetos seguem em aparentes ressonâncias orbitais com Netuno, como Plutão. TNOs relativamente grandes começaram a ser descobertos a longas distâncias, como Sedna, com 600 UA de semi-eixo maior de sua órbita elítica. Há indícios de que hajam mais corpos relativamente grandes ainda a serem descobertos a distâncias além de 100 UA. Até poucos anos, devido a suas distâncias, a obtenção de propriedades físicas dos TNOs, como tamanho e forma, existência de atmosfera, massa, densidade e constituição interna, só era possível por meios indiretos, com resultados fortemente dependentes dos diversos modelos adotados, para ajustar as observações de solo (via fotometria e espectroscopia) ou com telescópios espaciais, como o Hubble ou o Spitzer. Por outro lado, de custo comparativamente irrisório, um certo tipo de observação com telescópios da Terra, mesmo com tamanhos modestos, passou a contribuir de forma importante para desvendar as características físicas e químicas desses corpos do Sistema Solar: **a observação de ocultações estelares.**

As ocultações estelares permitem a determinação do tamanho e forma desses corpos, mesmo com o uso de telescópios em solo e detectores modestos, com precisão somente atingível por sondas (Sicardy et al., 2011). Em uma ocultação estelar, o corpo em estudo (um TNO, por exemplo) passa na frente de uma estrela, e a obstrução da luz da estrela é medida por detectores em telescópios espalhados em pontos pré-determinados, permitindo a observação do fenômeno de diferentes pontos de visada. Cada telescópio gera uma curva de luz – a medida da variação do brilho da estrela com o tempo. Essa curva possui fluxo de luz constante, e uma queda relativamente abrupta característica, correspondente ao intervalo de tempo em que a estrela é ocultada pelo corpo. A composição das curvas de luz dos diversos telescópios usados fornece um quadro completo do fenômeno, permitindo a determinação do tamanho e da forma do corpo com precisão de 1 km ou menos, rivalizando com a capacidade de observação de sondas espaciais. Caso o corpo tenha atmosfera, a Física se aproxima a da luz de uma estrela de diâmetro muito pequeno sendo refratada pela atmosfera do corpo e observada à distância. A absorção por aerossóis (poeira) presentes nas camadas mais baixas da atmosfera, também pode ser detectada nas curvas de luz observadas em diferentes comprimentos de onda. As cáusticas produzidas em uma ocultação central (alinhamento perfeito entre a estrela, o corpo e o observador), cujo modelo matemático é idêntico aquele dos “Anéis de Einstein”, também são observadas como “flashes” - repentino crescimento da luz observada, em contraste com a queda de luz esperada. A observação de flashes centrais permitem uma caracterização quase completa da atmosfera. Picos de luz “repentinos”, na parte

mais “funda” da curva de luz (correspondente a camadas mais profundas da atmosfera) podem sinalizar a presença de brumas. A inversão semi-analítica das equações, ou a integração numérica direta por “ray-tracing”, permite modelar a curva de luz observada extraindo-se da atmosfera sua composição química e perfil de temperatura em função da altura, com sensibilidades de 0.3 nbar a 1 nbar no perfil de densidade, a depender da qualidade da curva de luz. A partir de 20 UA, a resolução obtida para as escalas de altura pode ir de 20 km a 1 km, competindo com a capacidade de sondas espaciais. Ondulações em grande escala na atmosfera, ventos zonais e sua variação temporal podem ser medidos. A partir das informações de temperatura e composição química da atmosfera, e do tamanho do corpo, pode-se estimar melhor a sua densidade e também sua massa. Flutuações, ou absorções abruptas nas medidas, antes, durante ou depois da ocultação, são indícios da presença de detritos, como matéria espalhada, ou indicam a presença de satélites e mesmo anéis orbitando o corpo central.

Ocultações estelares apresentam grandes vantagens como técnica observacional. O que define o telescópio adequado a ser usado é o brilho da estrela a ser ocultada e não o brilho aparente do TNO. Isto permite que boas observações possam ser obtidas com detectores CCD modestos até com telescópios com aberturas modestas, a partir de 20 cm, desde que a estrela ocultada seja brilhante. Isso viabiliza o deslocamento de pequenos instrumentos para qualquer ponto acessível da superfície terrestre, na busca pelo local ideal para observar um evento promissor. Naturalmente, o resultado (melhor razão sinal/ruído) é tanto melhor quanto maior o telescópio e quanto melhor for a qualidade do detector. Mas isso não é um fator impeditivo. Além disso, as técnicas de observação são bastante simples, pois consistem em obter sequências de imagens, de preferência rápidas e, sobretudo, com o menor tempo possível entre cada observação, para se medir a queda de luz da estrela-alvo – fazendo uso da chamada técnica de fotometria diferencial (uma técnica de medida de luz simples e bem conhecida na Astronomia). Mas ocultações estelares por TNOs também apresentam algumas dificuldades específicas. Primeiramente, são um pouco raras, pois implicam que um objeto de diâmetro angular aparente no céu tipicamente menor que 20 mas (1 mas = 1 milésimo de segundo de arco) passe na frente de uma estrela. Isto exige um conhecimento preciso da posição da estrela e da órbita do TNO, com erros totais de no máximo 20 mas. Em parte, este problema pode ser contornado espalhando telescópios em uma área maior em torno da região prevista para observação, mas isso nem sempre é possível, além de ser muito oneroso, tanto do ponto de vista do esforço humano quanto instrumental e financeiro. Além disso, como a sombra passa por locais específicos da Terra, nem sempre uma rede densa e bem distribuída de telescópios está disponível.

1.2 Fotometria em ocultações estelares

Embora as ocultações estelares e os fenômenos mútuos durem apenas alguns minutos, a quantidade de imagens adquiridas é enorme (5 a 10 GB ou mais) devido às exposições de tempo muito curto (geralmente menos de 1 s), necessárias para melhorar a resolução temporal/espacial. Isso, juntamente com a heterogeneidade dos dados das campanhas (muitos tipos de telescópios, detectores, condições de céu, regimes de relação sinal-ruído, etc.), fez com que logo percebêssemos que o uso de pacotes de fotometria estelar padrão, como o Image Reduction and Analysis Facility IRAF¹, (Tody, 1993) e o DAOPHOT (Stetson, 1987), não era prático devido à excessiva parametrização e interação humana.

A solução encontrada pelo Grupo do Rio foi desenvolver o próprio software de fotometria diferencial de abertura - a task de fotometria PRAIA, a seguir denominada PPT. Como apenas o fluxo relativo é importante, a fotometria diferencial foi uma escolha clara. Nesse contexto, a fotometria de abertura claramente oferece resultados superiores em comparação com a fotometria de Função de Dispersão Pontual (PSF), porque caracterizar a PSF sempre variável do alvo em uma ocultação estelar ou fenômeno mútuo é muito problemático. Um ou ambos os objetos envolvidos podem não ser fontes de luz pontuais, mas mesmo nesse caso, o alvo resultante da mistura dos dois objetos não será. E frequentemente ocorre uma queda severa ou total no fluxo em eclipses e ocultações estelares, tornando impossível definir e medir uma PSF. A fotometria, que envolve a medição da luz de objetos astronômicos, desempenha um papel crucial para analisar a variação de brilho estelar durante ocultações, e o pacote PRAIA, Package for the Reduction of Astronomical Images Automatically, é nossa principal ferramenta fotométrica, permitindo a análise de curvas de luz (Assafin et al., 2011; Assafin, 2023a,b). Este pacote automatiza a fotometria de abertura e lida eficientemente com grandes volumes de dados, sendo utilizado no tratamento de dados de corpos do Sistema Solar, como asteroides, Centauros e TNOs, para estudar rotação e ocultações estelares. O programa de fotometria do PRAIA é essencial para alcançar esses objetivos (Assafin et al. 2011; Assafin 2023a,b).

1.3 Análise de curvas de ocultações estelares

O estudo de ocultações estelares por corpos pequenos apresenta desafios significativos devido à necessidade de previsões precisas das posições tanto das estrelas ocultadas

¹IRAF foi distribuído pelo National Optical Astronomy Observatory, que é operado pela Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) sob um acordo cooperativo com a National Science Foundation. Atualmente, ele é suportado pela IRAF Community: <https://iraf-community.github.io>

quanto dos corpos ocultantes. O lançamento do catálogo Gaia tem desempenhado um papel crucial ao aprimorar a precisão na localização das estrelas, possibilitando, assim, previsões mais acuradas. No entanto, para a observação em maior quantidade, é imperativo aperfeiçoar ainda mais as predições. Isso envolve não apenas a alta precisão nas posições estelares, mas também a previsão das posições do corpo ocultante, que apresenta movimentos significativos. Esse aprimoramento pode ser alcançado por meio da melhoria das efemérides e da determinação de offsets de posição às vésperas da ocultação, utilizando técnicas de astrometria. Esses avanços promovem não apenas um aumento na precisão das observações, mas também uma expansão na frequência e na qualidade das ocultações estelares ao longo do tempo.

Isso representa uma nova era de Big Data, na qual o **SORA** (Stellar Occultation Reduction and Analysis), uma biblioteca Python de código aberto, desempenha um papel fundamental na redução e análise de ocultações estelares (Gomes-Júnior et al., 2022). A análise das curvas de luz geradas por essas ocultações permite identificar quedas no fluxo luminoso, fornecendo informações sobre características físicas dos corpos ocultantes e seus ambientes, como atmosferas, anéis e topografia (Sicardy et al., 2016; Braga-Ribas et al., 2014). O SORA, em sua versão atual, concentra-se na análise de ocultações por corpos sem atmosfera e por uma única estrela, permitindo *insights* valiosos nesse cenário específico.

1.4 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho foi de expor a experiência que adquiri quanto a observação e análise de ocultações estelares, assim como na utilização e modo com que funcionam os softwares utilizados nesse tipo de pesquisa. Para isso, utilizamos a ocultação de Umbriel, uma lua de Urano, que ocorreu em setembro de 2020. As ocultações estelares oferecem uma oportunidade única para estudar objetos do Sistema Solar, como luas e asteroides, ao analisar as variações no brilho das estrelas à medida que são ocultadas por esses corpos celestes.

A pesquisa da ocultação de Umbriel em particular era relevante, pois poderia fornecer informações valiosas sobre essa lua de Urano, incluindo sua forma, tamanho e talvez até mesmo pistas sobre sua topografia e atmosfera. Além disso, ao aprender a trabalhar com ocultações estelares, os pesquisadores ganham habilidades que podem ser aplicadas a uma variedade de estudos astronômicos, expandindo seu conhecimento e capacidades na área. Em última análise, o objetivo é contribuir para o avanço da ciência e o entendimento dos corpos que compõem o nosso Sistema Solar.

Capítulo 2

Ocultação Estelar

A ocultação estelar é um fenômeno astronômico em que um objeto celeste, como um planeta, uma lua ou um asteroide, passa na frente de uma estrela, causando a sua temporária diminuição ou até mesmo a sua completa ocultação. Esses eventos oferecem uma oportunidade única para estudar características dos objetos ocultadores, como tamanho, forma e atmosfera.

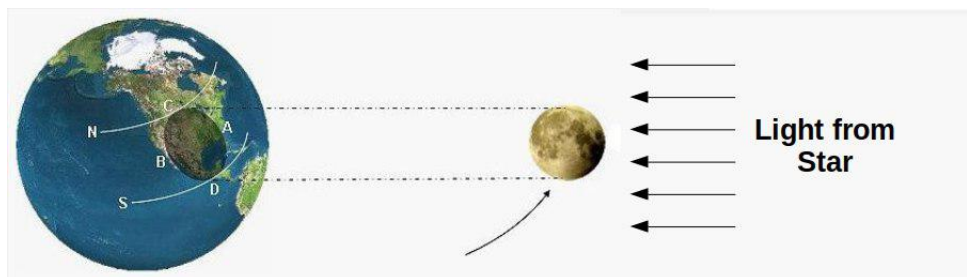


FIGURA 2.1. Projeção da sombra do corpo ocultador na superfície terrestre durante uma ocultação estelar. Devido à grande distância entre o corpo ocultador e a estrela de fundo, as dimensões e forma projetadas na superfície terrestre fornecem medidas precisas e exatas do corpo em quilômetros (km). A alta precisão das medidas fotométricas permite a obtenção de instantes de ingresso e egresso com grande precisão, resultando em estimativas altamente precisas da silhueta ou limbo do corpo ocultador, com variações da ordem de poucos quilômetros (km). Referência: International Occultation Timing Association (IOTA), editado por G. Benedetti-Rossi.

A fotometria desses eventos produz uma curva de luz de ocultação, onde a variação do brilho observado mostra diretamente o intervalo de tempo da ocultação desde o início, onde a borda do objeto começa ocultar a estrela, até o término, momento em que a borda diametralmente oposta (assumindo o caso de se tratar de uma observação central) sai da linha de visada. Um modelo é ajustado a curva observada (uma ilustração de como se parece esse modelo pode ser visto na Figura 2.2, e um exemplo real pode ser visto na Figura 6.4). Ele leva em consideração o diâmetro aparente da estrela, difração de Fresnel e tempo morto entre as poses. Do ajuste, determinamos os instantes de início e término do evento.

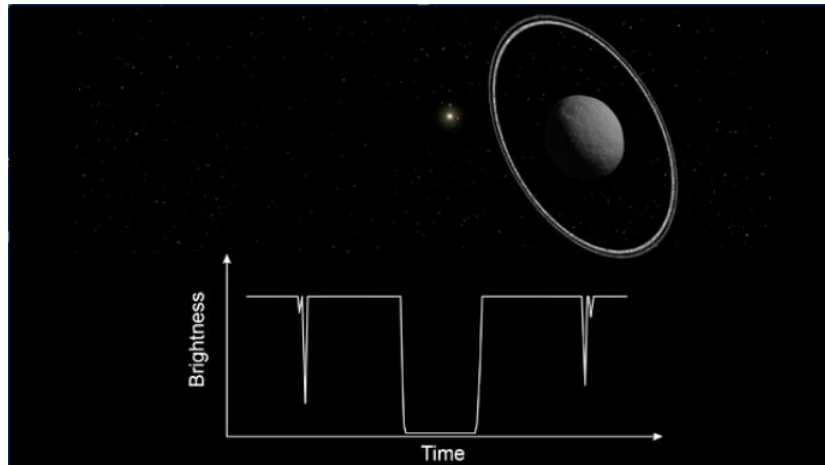


FIGURA 2.2. Visualização da ocultação de um TNO, Chariklo. Serve como um bom exemplo de uma curva em casos de ocultação estelar. (Reprodução artística) © Lucie Maquet - 2014.

Dependendo da posição geográfica de cada observador, a duração do evento será diferente. Essas informações geram um perfil de cada linha, sendo esta chamada de corda. Cada posição geográfica irá gerar diferentes cordas. Diferentes observadores em diferentes pontos da Terra podem observar o mesmo evento, permitindo medir a silhueta instantânea do corpo no plano do céu com precisão de poucos quilômetros. Isto permite a determinação do tamanho real do corpo em km.

Para obter várias cordas, é necessário uma coordenação internacional pois é preciso haver observadores nos locais onde ocorrerão os eventos. Com um telescópio modesto que contenha uma CCD ou câmera de vídeo, e GPS corretamente configurado, já é possível registrar esses eventos de ocultação, o que permite colaboração com vários astrônomos amadores por todo o mundo.

A figura 2.3 mostra o resultado da ocultação por Antiope, um asteroide duplo, utilizando a combinação de várias cordas obtidas tanto por astrônomos profissionais quanto por astrônomos amadores americanos e europeus em uma grande colaboração.

A técnica de ocultação estelar permite obter características físicas do corpo ocultante, como tamanho e perfil, por meio da observação indireta de sua interação aparente com a estrela. A previsão de ocultações estelares depende da precisão das posições das estrelas e das efemérides, enquanto o sucesso da observação depende de fatores como a relação sinal-ruído da curva de luz e a sincronização das posições e tempos dos observadores. O uso de catálogos estelares de qualidade como o Gaia, e de efemérides precisas, é essencial. A obtenção de observações de alta qualidade e a redução precisa considerando todos os efeitos relevantes são fundamentais para determinar os parâmetros físicos do corpo ocultante. A previsão de ocultações estelares é focada em eventos próximos no tempo e requer efemérides dedicadas e atualizadas. A técnica de ocultação estelar também pode ser utilizada para melhorar as efemérides, seja por meio da utilização da

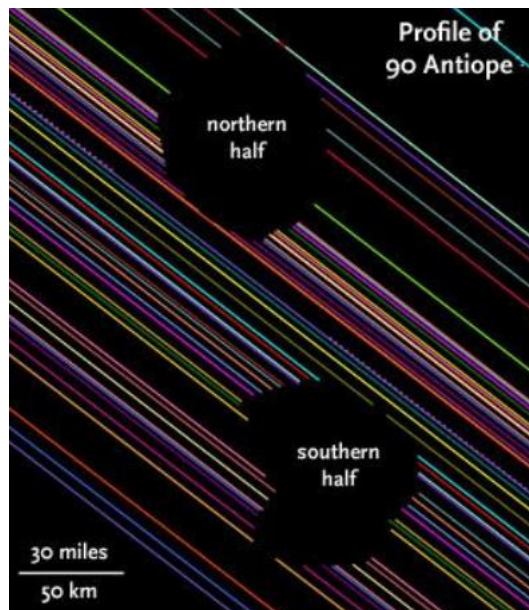


FIGURA 2.3. Ocultação de Antiope via Kelly Beatty Sky & Telescope, 9 de Setembro de 2011, F. Colas, F. Marchis com amadores americanos e europeus. A imagem ilustra a projeção das cordas no plano do céu, em que os pontos de início e final do evento se ajustam na forma da silhueta do corpo, obtidos com precisão de km. Referência: David Dunham / International Occultation Timing Association (IOTA).

posição resultante de uma ocultação estelar em si, seja por meio da determinação de um deslocamento do corpo alguns dias antes da ocultação e a sua aplicação para corrigir as efemérides.

Capítulo 3

Fotometria para Obtenção das Curvas de Luz: pacote PRAIA

3.1 Fotometria com o pacote PRAIA

A análise das curvas de luz obtidas durante as ocultações estelares enfrenta alguns problemas. Um deles é a falta de softwares específicos para a fotometria eficiente desses eventos. Embora existam opções como Tangra e PyMovie, esses programas não apresentam os procedimentos de fotometria claramente descritos em sua documentação, e não há artigos publicados que os certifiquem até o momento.

A fotometria consiste em medir o brilho da estrela alvo durante a ocultação, porém a presença de ruídos, variações atmosféricas e a necessidade de ajustes precisos requerem ferramentas especializadas. A falta de softwares adequados pode dificultar o tratamento dos dados e afetar a precisão das medições. Outra problemática é a ausência de padronização no tratamento das curvas de luz. Cada observador pode utilizar métodos e algoritmos diferentes para analisar os dados, resultando em resultados discrepantes e dificultando a comparação entre estudos. A falta de uma abordagem padronizada impede a obtenção de resultados confiáveis e limita o avanço do conhecimento nessa área.

O pacote PRAIA, Package for the Reduction of Astronomical Images Automatically, é a principal ferramenta fotométrica deste projeto e, com ela, é possível obter e analisar as curvas de luz, como explicada em Assafin et al. 2011; Assafin 2023a,b. Trata-se de um pacote independente desenvolvido em FORTRAN, sem interfaces gráficas, composto por várias tarefas (tasks) independentes. Cada task possui um código-fonte e um arquivo de texto de entrada (formato ASCII) com parâmetros de entrada editáveis. O PRAIA permite controle total pelo usuário para manipular dados de entrada e saída com suas

próprias ferramentas externas de estatística, visualização e plotagem, e é responsável por automatizar a fotometria de abertura, lidar com uma grande quantidade de dados (vários frames de uma observação) e com alta velocidade de processamento. Um importante programa do pacote, usado tanto no trabalho fotométrico quanto no astrométrico, é a coronagrafia digital do PRAIA, que será descrita em mais detalhes na próxima sessão.

O objetivo do programa de fotometria do PRAIA é duplo: realizar fotometria de aberturas diferenciais em imagens FITS digitalizadas e construir curvas de luz. O programa é adequado para o tratamento de observações fotométricas diferenciais de corpos do Sistema Solar (asteroides, Centauros e TNOs, satélites naturais, planetas e planetas anões) para análise de rotação, ocultações estelares e fenômenos mútuos.

Ao utilizar uma abertura circular, o fluxo bruto é calculado somando-se as contagens de unidades digitais analógicas (ADU) de todos os pixels dentro da abertura. Em seguida, é necessário subtrair o fluxo de fundo do céu que contamina o resultado. O fluxo de fundo do céu é calculado a partir das contagens de ADU de um anel circular de fundo do céu. Após determinar o valor ADU da contribuição do fundo do céu por pixel, subtrai-se o fluxo bruto da contribuição total do fundo do céu de todos os pixels dentro da abertura para obter o "fluxo limpo" da abertura do objeto.

É necessário ter cuidado com a forma circular das aberturas devido à forma quadrada dos pixels que compõem os perfis dos objetos em imagens CCD ou digitalizadas. É computacionalmente dispendioso calcular para todas as medições a área parcial dos pixels intersectados pela circunferência da abertura. Além disso, não existem esquemas de extrapolação satisfatórios que possam fornecer precisamente o verdadeiro fluxo sob uma determinada área parcial do pixel, resultando inevitavelmente em uma propagação de erros líquidos nas medições.

Para calcular a média e a dispersão do fundo do céu, o PRAIA utiliza estatísticas de quartil, que são mais robustas e precisas do que a visualização por histogramas tradicional. Os 25% mais baixos e mais altos das contagens de pixels dentro do anel de fundo do céu são eliminados, evitando a presença de pixels frios e objetos contaminantes próximos. Os pixels restantes são usados para obter a média e a dispersão do fundo do céu.

A relação sinal-ruído (S/N) é uma quantidade importante no PRAIA. É expressa em termos dos parâmetros do detector CCD e das medições fotométricas do objeto e do fundo do céu, de acordo com uma fórmula clássica. Essa fórmula leva em consideração o número total de fótons recebidos pelo objeto e subtraídos dos fótons do fundo do céu, o número de pixels associados ao objeto, o número de fótons do céu por pixel, a corrente escura de fótons por pixel e o ruído de leitura do CCD em elétrons por pixel. A relação

sinal/ruído pode ser calculada pela fórmula clássica (Howell, 1989):

$$S/N = \frac{N}{\sqrt{N + n_{pix}(N_s + N_d + N_r^2)}} \quad (3.1)$$

Em que N é o numero total de ftons do alvo subtraído do céu de fundo, n_{pix} é o número de pixels associados ao objeto, N_s é o número de ftons do céu de fundo por pixel, N_d é a contagem escura por pixel e N_r é o ruído do CCD em elétrons por pixel, como descrito em Howell (1989).

Mantendo o seu significado exato, Newberry (1991) reescreve a equação 3.1 de forma mais prática, apenas em termos de contagens ADU, como na equação 3.2, onde C_0 (em unidades ADU) é o fluxo limpo do objeto, g é o ganho, n é o número de pixels associados ao objeto, σ_{bg} é a dispersão do fundo do céu (em unidades ADU) e p é o número de pixels usados na estimação do nível e da dispersão do fundo do céu.

$$\frac{S}{N} = \frac{\sqrt{C_0}}{\sqrt{\frac{1}{g} + n \sigma_{bg} C_0^{-1} (1 + \frac{1}{p})}} \quad (3.2)$$

PPT permite o uso de fórmulas tanto "clássicas" (equação 3.1) quanto "baseadas em ADU" (equação 3.2) para o cálculo da relação sinal-ruído dos objetos.

A Figura 3.1 apresenta um exemplo ilustrativo do calculo do S/N de aberturas circulares de diferentes tamanhos que envolvem o alvo.

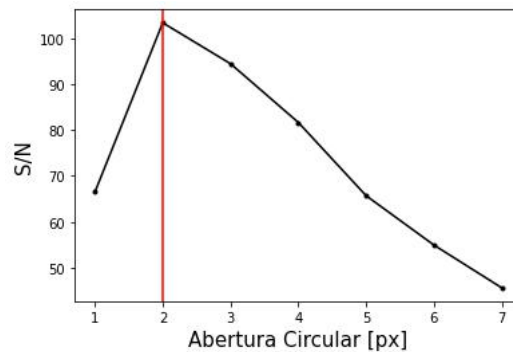


FIGURA 3.1. Ilustração do cálculo do Sinal/Ruído (S/R ou S/N) com base na abertura que circula o alvo, aplicada em um frame da ocultação de Umbriel. No caso, a abertura de 2 pixels de raio obteve o melhor valor e, portanto, deve ser escolhida.

Na fotometria padrão, além do alvo, são necessárias medidas auxiliares adicionais de objetos padrão fotométricos com magnitudes conhecidas em um sistema fotométrico para lidar com extinção e outros efeitos, a fim de medir o fluxo em um sistema fotométrico padrão. Isso resulta em um procedimento complicado e demorado, tanto no telescópio

quanto na análise de dados. E mesmo assim, dependendo das condições do céu e do instrumento, os resultados podem não ser satisfatórios.

Felizmente, no estudo de corpos do sistema solar, frequentemente não buscamos medir o fluxo 'absoluto' em um sistema fotométrico padrão, mas sim sua variação ao longo do tempo. Nesse caso, se as observações forem feitas em uma área de visão suficientemente pequena - o que geralmente ocorre em muitos estudos de corpos do sistema solar - é possível se beneficiar da técnica de fotometria diferencial e medir a variação do fluxo com alta precisão e acurácia internas. Na fotometria diferencial, quaisquer estrelas não padrão ou até mesmo outros corpos do sistema solar na área de visão podem ser usados como calibradores fotométricos. Em princípio, uma vez que os mesmos efeitos sistemáticos que afetam o fluxo-alvo também estão presentes no fluxo dos calibradores (se o campo de visão for pequeno o suficiente, e para casos em que a diferença entre as cores dos corpos em questão não seja significativo), os erros sistemáticos são cancelados após o procedimento de calibração, resultando em medidas de fluxo relativo altamente precisas e acuradas. Outra vantagem da fotometria diferencial é que as observações científicas também servem como calibração, simplificando bastante as observações e o tratamento de dados do telescópio, sem concessões à precisão/acurácia.

Exemplos da aplicação bem-sucedida da técnica de fotometria diferencial estão na observação de curvas de luz de rotação, ocultações estelares e fenômenos mútuos. Curvas de luz de rotação são usadas na determinação da proporção dos eixos e limites na densidade do corpo. Ocultações estelares são usadas para obter tamanhos e formas altamente precisos e acurados para os corpos ocultantes. Fenômenos mútuos fornecem posições relativas altamente precisas e acuradas no plano do céu entre os corpos envolvidos.

Devido à natureza das observações de ocultações estelares e fenômenos mútuos, é preferível evitar o uso de fotometria de função de espalhamento de ponto (PSF). Nas ocultações estelares, o alvo é composto por duas PSFs misturadas - aquelas do corpo e da estrela a ser ocultada. Além disso, a distância entre esses objetos varia ao longo do evento e, em algum momento, o corpo pode obstruir parcialmente a estrela.

Por esses motivos, usamos *apenas* a **fotometria por abertura** nessa tarefa. As técnicas de fotometria por abertura são mais flexíveis e podem medir com sucesso a luz dos alvos em todas as situações descritas acima, mesmo nos casos de queda parcial ou total de fluxo durante uma ocultação estelar. Justifica-se a extrema utilidade do PRAIA nesse trabalho, que irá automatizar todo o processo de fotometria.

Portanto, a metodologia consistiu, primariamente, na utilização das tarefas de fotometria do PRAIA, com vista a gerar curvas de luz a partir de imagens das ocultações estelares.

3.1.1 Guias, calibradores, alvos e imagens de referência

O PRAIA photometry task (PPT), que nada mais é que o pipeline de fotometria diferencial, trabalha com 4 categorias de objetos: o guia, calibradores, alvos e ghosts (fantasmas) associados. O guia serve para rastrear automaticamente os calibradores e alvos no campo de visão (FOV) de todas as imagens. Calibradores servem para calibrar o fluxo dos alvos. Alvos são os objetos de interesse científico. Um fantasma é um "objeto vazio" centrado a uma distância relativa fixa próxima a um alvo, amostrando uma região dominada pelo fundo do céu local, com os mesmos tamanhos de abertura e anel de fundo de céu do alvo. Fantasmas servem para comparações do fundo do céu com seus alvos associados e devem apresentar fluxos variando em torno de zero, pois é o fluxo limpo do fundo do céu local. Um alvo ou um calibrador também pode ser o objeto guia. O guia, os calibradores e os alvos podem ser objetos fixos ou móveis no FOV.

Às vezes, os cabeçalhos FITS das imagens contêm dados incorretos ou não têm informações suficientes para a identificação de objetos por sua ascensão reta e declinação corretas, mesmo quando o FOV contém estrelas de referência suficientes. O FOV também pode não conter estrelas de referência suficientes, impedindo a redução precisa dos pixels para coordenadas esféricas mesmo com algumas chaves válidas do Sistema de Coordenadas em Palavras (WCS). Portanto, o PPT não identifica objetos no FOV por sua ascensão reta e declinação. Na verdade, o PPT identifica calibradores e alvos em todas as imagens, independentemente de quaisquer chaves WCS ou cabeçalhos de posicionamento.

O PPT rastreia calibradores e alvos por suas distâncias relativas ao guia em todas as imagens. Fantasmas são localizados por suas distâncias fixas em relação aos respectivos alvos. O guia deve ser o objeto mais brilhante em uma região fixa do FOV para todas as imagens. Essa região pode ter qualquer tamanho. O guia é automaticamente identificado em todas as imagens. Para a localização correta de calibradores, alvos e fantasmas, é obrigatório que: a) o mesmo guia esteja sempre presente dentro da região fixa fornecida em todas as imagens; b) os calibradores, alvos e fantasmas estejam sempre dentro do FOV em todas as imagens; c) o FOV tenha a orientação dos eixos (x,y) e a escala de pixels fixas ou variáveis de forma que possam ser modeladas por um polinômio de grau N (tipicamente $N \leq 2$) com o tempo. Essas condições são facilmente satisfeitas quando as imagens são adquiridas com a mesma configuração de instrumento.

As coordenadas iniciais em pixels dos calibradores, alvos e fantasmas e, em seguida, suas distâncias relativas iniciais em relação ao guia são definidas no FOV de uma *imagem de referência*. Essas coordenadas iniciais relativas são então usadas para rastrear os objetos nas demais imagens. A imagem de referência deve ser a mais bem amostrada

do conjunto, com os maiores valores S/N para o guia, calibradores e especialmente para os alvos. Nos modos de fotometria do PPT de 0 a 2, o usuário seleciona a imagem de referência e indica as coordenadas iniciais em pixels dos calibradores, alvos e fantasmas (também o guia no modo 0). No modo de fotometria 3, a imagem de referência e as coordenadas iniciais dos alvos também podem ser indicadas pelo usuário, com as coordenadas dos fantasmas calculadas automaticamente. Na forma totalmente automática, o modo 3 escolhe a imagem de referência procurando o guia com o maior S/N entre todas as observações, em seguida, detecta automaticamente os melhores calibradores, os alvos e seus fantasmas na imagem de referência (Seção 3.1.2.1), e calcula suas coordenadas iniciais relativas ao guia. A partir das distâncias relativas iniciais, o rastreamento dos objetos é feito para todas as imagens - veja detalhes na Seção 3.1.4.

Na detecção totalmente automática de calibradores e alvos no modo de fotometria 3, todos os objetos recebem tamanhos de abertura provisórios em todas as imagens. Objetos com aberturas fora do FOV são excluídos. O usuário só precisa fornecer o número T de alvos e C de calibradores. Calibradores apresentam fluxos mais estáveis, enquanto alvos têm variações de fluxo mais altas no caso de curvas de luz de rotação, ocultações estelares ou observações de fenômenos mútuos. Assim, o PPT define os T objetos com as maiores variações de fluxo como alvos. Os C objetos restantes com os maiores valores S/N são definidos como calibradores. Quando os alvos são explicitamente fornecidos pelo usuário no modo 3, os C objetos detectados com as maiores valores S/N também são definidos como calibradores.

3.1.2 BOIA (Browsing Objects: Identification and Analysis) - detecção de objetos, localização e otimização de abertura

Para diferentes aberturas, é necessário encontrar os melhores parâmetros de abertura e anel de fundo do céu que maximizem o S/N (Sinal-Ruído). Isso inclui encontrar o melhor centro do objeto (abertura). Mesmo para aberturas fixas, o melhor centro - e, portanto, a melhor abertura - é obtido através da otimização do S/N. O PPT faz isso por meio de um procedimento inovador chamado de BOIA - Browsing Objects: Identification and Analysis. O BOIA incorpora de forma natural a busca pela melhor abertura e anel de fundo do céu, assim como o melhor centro objeto/abertura em termos do S/N. Detalhes sobre o uso do BOIA no contexto da astrometria pelo método astrométrico PRAIA são fornecidos em Assafin (2023a). O BOIA combina fotometria de alta precisão e astrometria.

No modo de fotometria 3, o BOIA examina a imagem de referência e detecta automaticamente objetos no campo de visão (FOV), conforme descrito na Seção 3.1.2.1.

Nos modos 0 a 2, a localização dos objetos é determinada pelo rastreamento em relação ao guia (Seção 3.1.4). Uma vez que os objetos são localizados no FOV das imagens, o BOIA prossegue com a análise e encontra suas aberturas ótimas fixas (Seção 3.1.2.2) ou variáveis (Seção 3.1.2.3).

3.1.2.1 Detecção automática de objetos com o BOIA

No PPT, o BOIA examina a imagem de referência por células de pixels 3×3 e as ordena pelo fluxo total. Começando pela célula com o maior fluxo, aplicamos o procedimento descrito na Seção 3.1.2.3 para detectar o objeto e simultaneamente caracterizar sua abertura e anel de fundo do céu. Não são utilizados ajustes gaussianos para o centróide, a fim de acelerar os cálculos. Os pixels da abertura são marcados e não são amostrados novamente. Em seguida, a próxima célula brilhante é amostrada e o procedimento é repetido até que as detecções atinjam um limite mínimo de S/N (por exemplo, 5). As detecções sobrepostas são eliminadas - apenas a de maior S/N é preservada.

3.1.2.2 BOIA para aberturas fixas

A partir de uma abertura com raio fixo R definido pelo usuário, centrada nas coordenadas provisórias (x, y) do objeto, é realizado um novo centróide (Método de Centro Photogravity - PGM, consulte a Seção 3.1.3) utilizando os pixels dentro da área circular da abertura. A abertura com raio fixo R é então recentralizada nas novas coordenadas (x, y) e o centro PGM final (x_{PGM}, y_{PGM}) é obtido. Se definido pelo usuário, um perfil gaussiano (Seção 3.1.3) também é ajustado e um centro (x_G, y_G) é obtido para os pixels da abertura R centrada em (x_{PGM}, y_{PGM}) . O S/N das aberturas centradas em (x_{PGM}, y_{PGM}) e (x_G, y_G) é comparado. A abertura com o maior S/N é preservada.

3.1.2.3 BOIA para aberturas variáveis

A partir de um raio inicial, centrado nas coordenadas provisórias (x, y) do objeto, dois anéis circulares de largura 2 pixels com raios r_1 e $r_2 = r_1 + 2$ pixels são amostrados iterativamente, com seu raio aumentando em 2 pixels a cada iteração. Testes F e t-Student para distribuições significativamente diferentes (Press, 1982) são aplicados às distribuições de pixels de cada anel, após eliminar contagens altas/baixas seguindo estatísticas de quartis. A iteração para quando não há diferença significativa, o que significa que os anéis alcançaram o fundo do céu local ao redor do objeto. Um novo centróide (PGM) é realizado com os pixels dentro do último anel. O procedimento

de dois anéis é novamente aplicado em torno das novas coordenadas (x, y) e obtemos o raio definitivo r_{MAX} do último anel. Usando os pixels dentro da abertura de raio r_{MAX} centrada em (x, y) , calculamos dois centros de referência, um pelo método PGM (x_{PGM}, y_{PGM}) e (se definido pelo usuário) outro pelo centro do perfil gaussiano ajustado (x_G, y_G) . Em seguida, fixamos o raio do fundo do céu como r_{MAX} e calculamos o S/N para todas as combinações de tamanhos de abertura e larguras do fundo do céu para cada um dos centros de referência (x_{PGM}, y_{PGM}) e (x_G, y_G) . O raio da abertura e a largura do fundo do céu são amostrados por bins definidos pelo usuário, geralmente 0.1 pixels para a abertura e 1 pixel para o anel. São calculados centros de referência definitivos (x_{PGM}, y_{PGM}) e (x_G, y_G) , desta vez com os pixels dentro da abertura aprimorada encontrada com o maior S/N. Em seguida, todas as combinações de tamanhos de abertura e larguras do fundo do céu são novamente amostradas com esses centros aprimorados, e o melhor conjunto de abertura/centro com o maior S/N é finalmente armazenado.

3.1.3 Centragem do objeto: Photogravity Center Method (PGM)

O PPT realiza astrometria, ou seja, centraliza o objeto com alta precisão para obter o melhor da fotometria por abertura. Atualmente, o PPT possui dois algoritmos de centróide para determinar o centro (x, y) dos objetos no campo de visão: o Photogravity Center Method (PGM) e o ajuste gaussiano 2D. O usuário define qual método de centróide deve ser usado (ou ambos) para cada tipo de objeto: guia, calibradores e alvos.

A partir de Mighell (1999), a forma bidimensional do Método dos Momentos Modificado é dada pela equação 3.3 para calcular o centro (x_M, y_M) de um objeto. Os (j, i) são as coordenadas de pixel associadas a (x, y) e $C(j, i)$ são as contagens de ADU nos pixels (j, i) acima de um limiar dado T . Os pixels (j, i) devem estar dentro do círculo da abertura contida em uma caixa de tamanhos (N_x, N_y) .

$$C(j, i) > T \quad x_M = \frac{\sum_{j=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_y} C(j, i) x(j, i)}{\sum_{k=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} C(k, m)} \quad y_M = \frac{\sum_{j=1}^{N_x} \sum_{i=1}^{N_y} C(j, i) y(j, i)}{\sum_{k=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} C(k, m)}$$

O PPT utiliza uma forma aprimorada do algoritmo dos Momentos Modificados, chamado de Método de Centro Photogravity (PGM). No PGM, como antes, apenas pixels mais brilhantes com contagens $C(j, i)$ acima de um limiar dado T e dentro do círculo da abertura são usados. Mas além disso, cada pixel (j, i) também é ponderado por um valor $w(j, i)$ de acordo com sua distância média quadrada para os outros pixels

mais brilhantes usados no cálculo. O centro (x_{PGM}, y_{PGM}) no método PGM é calculado como na equação 3.3.

$$\begin{aligned}
 & C(j, i) > T, \\
 w(j, i) &= \frac{1}{\sum_{m=1}^{N_X} \sum_{k=1}^{N_Y} [x(j, i) - x(m, k)]^2 + [y(j, i) - y(m, k)]^2}, \\
 x_{PGM} &= \frac{\sum_{j=1}^{N_X} \sum_{i=1}^{N_Y} w(j, i) C(j, i) x(j, i)}{\sum_{k=1}^{N_X} \sum_{m=1}^{N_Y} w(k, m) C(k, m)} \\
 y_{PGM} &= \frac{\sum_{j=1}^{N_X} \sum_{i=1}^{N_Y} w(j, i) C(j, i) y(j, i)}{\sum_{k=1}^{N_X} \sum_{m=1}^{N_Y} w(k, m) C(k, m)} \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

A ideia por trás do PGM é dar mais peso e influência aos pixels mais brilhantes que estão mais próximos uns dos outros na determinação do centro. O método é especialmente eficaz para objetos mais fracos, nos quais o cálculo do centro com o Momento Modificado é especialmente afetado por pixels espúrios brilhantes relativamente distantes do centro verdadeiro.

Os 25% dos pixels mais brilhantes são selecionados primeiro para usar a equação 3.3 no cálculo de (x, y) . Se menos de 4 pixels estiverem disponíveis, então os 50% dos pixels mais brilhantes são selecionados, e se ainda restarem menos de 4 pixels, os 75% dos pixels mais brilhantes são escolhidos para o cálculo de (x, y) .

No ajuste gaussiano 2D, o centro (x_0, y_0) de um objeto é calculado de acordo com a equação 3.4, onde (x_0, y_0) é o centro, h é a altura acima do fundo do céu local B e σ é a largura gaussiana "estatística" usual (relacionada à Meia-Largura a Meia-Altura, ou seeing, por um fator 2.35). O ajuste da equação 3.4 é feito por um procedimento de Mínimos Quadrados não lineares.

$$G_C(x, y) = h \cdot \exp - \left(\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2 \sigma^2} \right) + B \quad (3.4)$$

3.1.4 Rastreamento de objetos fixos e em movimento

Não há restrição quanto aos guias, calibradores ou alvos sendo objetos em movimento (corpos do Sistema Solar de qualquer tipo) no campo de visão. O PPT rastreia objetos em movimento em relação ao guia (que por sua vez pode ser ele próprio um objeto em movimento). À medida que as distâncias relativas objeto-guia (dx, dy) mudam

com o tempo de imagem para imagem, elas são ajustadas por polinômios (dx, dy) em função do tempo de grau N (sendo N definido pelo usuário). A posição relativa de cada objeto em relação ao guia é projetada para o instante intermediário da próxima imagem a ser processada, de modo que a localização (x, y) no campo de visão seja prevista e cada objeto possa ser corretamente identificado. O usuário pode configurar parâmetros para a eliminação de valores discrepantes nos ajustes dos polinômios (dx, dy) por meio de um procedimento de sigma-clip.

Quando não se espera que o objeto altere sua distância em relação ao guia, o usuário tem 4 opções de rastreamento, cada uma mais adequada para uma condição específica de observação, e afetando de formas distintas a distância relativa objeto-guia projetada (dx, dy) computada para a próxima imagem.

A primeira opção de rastreamento utiliza distâncias relativas objeto-guia fixas (dx, dy) para todas as imagens a partir das medições dos centros (x, y) feitas para o objeto e o guia na imagem de referência. A segunda opção de rastreamento também fixa as distâncias relativas objeto-guia (dx, dy) para todas as imagens, mas elas são fornecidas pelas coordenadas (x, y) de entrada fornecidas pelo usuário para a imagem de referência. Isso é útil quando objetos próximos impedem qualquer atualização do centro (x, y) . A terceira opção de rastreamento fixa as distâncias relativas entre objeto-guia (dx, dy) apenas para a imagem seguinte à imagem de referência. As distâncias relativas (dx, dy) projetadas podem variar amplamente de imagem para imagem, o que pode ser útil em condições de céu não ideais. A quarta opção de rastreamento fixa as distâncias relativas objeto-guia (dx, dy) apenas para a próxima imagem, tomando a média das distâncias relativas objeto-guia de todas as imagens processadas até o momento, após a eliminação de valores discrepantes com um sigma-clipping, proporcionando uma determinação mais robusta para as distâncias relativas (dx, dy) .

3.1.5 Construindo curvas de luz com PRAIA

Uma curva de luz (LC) gerada pelo PPT exibe as razões de fluxo entre o alvo e o calibrador ao longo do tempo. É comum aplainar e normalizar essa razão de fluxo, utilizando porções específicas das medidas fotométricas como referência. Essa prática visa mitigar os efeitos de variações nos fluxos do calibrador e do próprio alvo, que não estão diretamente relacionados à queda de brilho durante a ocultação. Além de utilizar fotometria anterior do PPT, a task também aceita medidas de fotometria de abertura ou PSF de outros pacotes.

3.1.6 Coronagrafia digital com o pacote PRAIA

A coronagrafia digital é uma técnica crucial para remover a luz espalhada de objetos brilhantes em imagens astronômicas, permitindo o estudo preciso de alvos próximos. Nessa sessão, apresento a coronagrafia digital do PRAIA, um método avançado desenvolvido para aprimorar o contraste do brilho de objetos de interesse afetados pela luz espalhada de fontes próximas.



FIGURA 3.2. Exemplo de coronagrafia digital retornada pelo PRAIA. No caso, o brilho de Urano é retirado da contagem dos pixels pois afetava a contagem de uma estrela ao seu redor. Imagem antes e depois da coronagrafia, da esquerda para direita.

A coronagrafia digital do PRAIA é dividida em duas etapas: a determinação precisa do centro da fonte de interesse e a aplicação da própria técnica de coronagrafia. Na etapa de determinação do centro, foram desenvolvidos métodos aprimorados que levam em consideração a forma elíptica da fonte e utilizam estatísticas de quartis para calcular o perfil da fonte.

Os resultados obtidos com a coronagrafia digital do PRAIA têm sido altamente satisfatórios, permitindo a recuperação precisa do perfil de brilho de alvos astronômicos afetados pela luz espalhada de fontes luminosas próximas. Essa técnica tem se mostrado especialmente útil para estudos fotométricos e astrométricos do Sistema Solar, envolvendo satélites naturais próximos a planetas brilhantes, além de ter aplicações em estudos astrofísicos mais amplos.

Em resumo, a coronagrafia digital do PRAIA é uma poderosa ferramenta para remover a luz espalhada e melhorar o perfil de brilho de objetos astronômicos em imagens. Assim, o PRAIA oferece uma abordagem abrangente e automatizada para estudos astronômicos de alta precisão, permitindo avanços significativos em nossa compreensão do Universo.

3.1.6.1 Normalização do fundo de céu

Antes da coronagrafia, o fundo do céu em todo o campo de visão (FOV) é nivelado. Esse processo uniformiza o fundo do céu no FOV ou, pelo menos, em grandes áreas do FOV em torno da área de trabalho da coronagrafia.

O fundo do céu é modelado por um polinômio bivariado em (x, y) de grau N . Supondo que a maioria dos pixels no FOV represente o fundo do céu, inicialmente ajustamos o polinômio em todo o FOV. As contagens de pixels ajustadas são previamente suavizadas por um filtro binomial de $(2n+1)$ canais (usamos $n = 5$). O polinômio é então normalizado, e a imagem de entrada original é nivelada dividindo as contagens originais não suavizadas pelo polinômio normalizado, pixel a pixel. Em seguida, é feita uma análise de sua distribuição (em histograma) para determinar o modo M e uma dispersão S para o fundo do céu - o modo está associado ao valor típico do fundo do céu para todo o FOV. O ajuste do polinômio é então repetido, levando em consideração apenas os pixels do fundo do céu dentro de $2.5 S$ a partir de M . O polinômio é normalizado novamente, e a imagem é nivelada novamente pela última vez. Uma última análise de histograma e ajuste do polinômio do fundo do céu são realizados. Esse polinômio representa um fundo do céu modelado para todo o FOV. Ele possui 2 utilidades: a) mascarar contagens para pixels ruins; b) mascarar contagens para pixels de coronagrafia que eventualmente resultaram em contagens negativas após o final do processo de coronagrafia.

Pequenos efeitos de vinheta geralmente podem ser tratados com polinômios de baixa ordem de grau $N = 2$, e vinheta moderada com $N = 4$. Frequentemente, não é realmente necessário nivelar o fundo do céu, portanto, apenas usar $N = 0$ funciona. Mesmo assim, o nível e a dispersão do fundo do céu são determinados, e uma solução de fundo de céu plano é calculada e usada para mascarar as contagens de pixels ruins ou pixels de coronagrafia negativos.

Após a coronagrafia, o nivelamento é revertido, e o fundo do céu original é restaurado, ou seja, as propriedades fotométricas originais são totalmente preservadas nas imagens coronagrafiadas.

3.1.6.2 O objeto de referência

O Objeto de Referência serve como referência para a localização (x, y) da Fonte e para a configuração da elipse de coronagrafia (3.1.6.4). Deve ter uma alta relação sinal-ruído (S/N) e ser um objeto isolado e não muito distante da Fonte. Deve ser o objeto mais brilhante na faixa de FOV válida. Também pode ser a própria Fonte.

O PRAIA Digital Coronagraphy task (PDC) encontra automaticamente e determina o centro (x_R, y_R) do Objeto de Referência (veja a 3.1.2). Muitos algoritmos de centralização de alto nível estão agora disponíveis: o novo Método de Centro Fotogravitacional (PGM), 2 PSFs Circulares e 2 PSFs Elípticos, PSFs Gaussianos ou Lorentzianos, ajustados aos pixels selecionados pelo BOIA. Também podemos inserir diretamente o centro (x_R, y_R) do Objeto de Referência e mantê-lo fixo para todas as imagens - essa opção é útil apenas em casos de teste ou ocasiões muito específicas.

Também temos a opção de fixar a distância relativa entre o Objeto de Referência e a Fonte para todas as imagens (veja a 3.1.6.4). Nesse caso, o centro (x_R, y_R) é inserido junto com as coordenadas (x_C, y_C) da Fonte (3.1.6.3).

Uma análise de momento central é realizada e a excentricidade da elipse, os semi-eixos maior e menor e o ângulo de orientação do Objeto de Referência são armazenados. Se um dos dois modelos de PSF elípticos for escolhido como algoritmo de centralização, os valores correspondentes também são armazenados. Também podemos impor esses parâmetros, que permanecem fixos para todas as imagens. Esses valores podem ser usados para configurar a elipse de coronagrafia (3.1.6.4).

3.1.6.3 A fonte

A Fonte é o objeto no campo de visão (FOV) que desejamos coronografar. Pode ser qualquer objeto no FOV, independentemente de seu brilho. Pode até ser o Objeto de Referência.

As mesmas opções de Objeto de Referência (3.1.6.2) estão disponíveis para impor ou determinar o centro (x_C, y_C) da Fonte, a excentricidade da elipse, os semi-eixos maior e menor, e o ângulo de orientação. As coordenadas de entrada da Fonte podem ser usadas juntamente com as do Objeto de Referência para fixar a distância relativa para todas as imagens.

Essa distância relativa também pode ser usada como ponto de partida, sendo continuamente atualizada para estimar, para cada imagem, uma entrada inicial (x_i, y_i) para encontrar aberturas BOIA ótimas e atualizar os centros da Fonte (x_C, y_C) (veja 3.1.2). As possíveis configurações de centro/elipse da Fonte e do Objeto de Referência são exploradas a seguir em 3.1.6.4).

3.1.6.4 O centro e a elipse da coronagrafia

Para obter o melhor resultado na coronagrafia, é essencial determinar o centro (x_C, y_C) da Fonte e os parâmetros da elipse que melhor representam o perfil da Fonte com precisão e exatidão. O PDC permite uma configuração muito flexível para definir o centro (x_C, y_C) da Fonte, que será usado como o centro da coronagrafia. Existem três possibilidades para obter esse centro: 1) ele é imposto; 2) ele é derivado do centramento da Fonte; 3) ele é derivado apenas do centramento do Objeto de Referência.

No caso 1, impor o centro da Fonte (x_C, y_C) é útil apenas em testes ou casos muito específicos, pois é válido apenas para uma imagem.

No caso 2, definimos inicialmente uma distância relativa (dx, dy) entre a Fonte e o Objeto de Referência. Ela é calculada antes do processamento da primeira imagem a partir das coordenadas de entrada (x, y) do Objeto de Referência e da Fonte (veja 3.1.6.2 e 3.1.6.3). Essas coordenadas podem ser obtidas a partir da inspeção de qualquer imagem, preferencialmente de uma bem exposta. A única exigência é que elas sejam estimadas a partir da mesma imagem para consistência astrométrica. Após melhorar o centro (x_R, y_R) do Objeto de Referência com o algoritmo de centragem, a distância relativa inicial (dx, dy) é usada para estimar a localização (x, y) da Fonte. Usando essa localização (x, y) , o algoritmo de centragem escolhido para a Fonte é aplicado para obter o centro da coronagrafia final melhorado (x_C, y_C) . As novas coordenadas melhoradas (x_R, y_R) e (x_C, y_C) são usadas para atualizar a distância relativa (dx, dy) . O processo é repetido para todas as imagens. As distâncias relativas são atualizadas a cada imagem e usadas na próxima imagem. Ou a primeira distância atualizada é fixa e mantida para as imagens restantes.

No caso 3, nenhuma atualização de distância é feita. Não é realizado nenhum centrado real da Fonte e as coordenadas (x_C, y_C) são obtidas a partir da distância de entrada e do centrado do Objeto de Referência. Observe que no caso 2, quando atualizamos a distância apenas para a primeira imagem, o centrado da Fonte é realizado apenas para a primeira imagem.

Escolher o caso mais adequado depende das circunstâncias. Se o Objeto de Referência também for a Fonte e for um objeto brilhante - como um planeta - então o caso 3 se ajusta perfeitamente. O caso 3 também pode ser adequado para a coronagrafia de uma estrela fraca muito próxima de uma estrela-alvo mais brilhante, caso em que o Objeto de Referência deve ser outro objeto isolado - não a mesma estrela que a Fonte ou o alvo.

Quanto à definição dos parâmetros da elipse a ser usada na coronagrafia - a excentricidade e o ângulo de orientação - a tarefa (task) também permite uma configuração flexível. Existem duas classes de soluções, uma envolvendo a Fonte em si e outra envolvendo o Objeto de Referência. Em cada classe, existem três maneiras de definir os parâmetros da elipse: 1) entrada direta; 2) análise de momentos centrais; 3) ajuste de PSF.

A imposição de parâmetros de elipse por meio do Objeto de Referência ou da configuração da Fonte é útil para anéis circulares, onde a excentricidade é zero (usar modelos de PSF circulares tem o mesmo efeito). Caso contrário, é útil apenas em testes ou casos específicos.

É importante ter cautela ao escolher o objeto para extrair os parâmetros da elipse para a coronagrafia da Fonte. A Fonte em si pode não ser a melhor escolha em certos casos, como quando seu perfil de brilho é comprometido, como quando uma estrela mais fraca está parcialmente obscurecida por uma estrela-alvo mais brilhante próxima. Nesses casos, é recomendado o uso dos parâmetros de elipse do Objeto de Referência, assumindo que as PSFs de objetos próximos no campo de visão são semelhantes. Isso pode fornecer resultados mais precisos e precisos para a coronagrafia.

Independentemente da origem dos parâmetros (Objeto de Referência ou Fonte, entrada direta, análise de momentos ou ajuste de PSF), a solução final é chamada de elipse de coronagrafia. Os valores finais da excentricidade e do ângulo de orientação θ da elipse de coronagrafia serão usados na coronagrafia do campo de visão. O mesmo vale para o (x_C, y_C) da Fonte, que é referido como (x_C, y_C) do centro de coronagrafia.

3.1.6.5 Anéis elípticos e aberturas

Anéis e aberturas são essenciais em nossa coronagrafia digital. Após a amostragem dos pixels de anel - um procedimento que descrevemos nesta seção - aplicamos estatísticas refinadas por quartis (Assafin, 2023a) para construir o perfil da Fonte para a coronagrafia do campo de visão. As aberturas também são importantes porque os pixels internos são usados para determinar os centros (x, y) .

Nas versões anteriores da task, eram usados anéis/aberturas circulares. Agora é utilizado aberturas elípticas. Isso permite lidar com imagens alongadas devido a distorções ópticas moderadas (refração de cores sem filtros, imagens desfocadas, problemas com espelhos ou lentes, etc), observações não sidéreas ou má orientação, ou ventos fortes. Ao contrário das formas circulares, a identificação de pixels dentro de anéis/aberturas elípticas exige um procedimento mais elaborado, como descrito aqui.

Dada uma elipse nominal com ângulo de orientação θ em relação ao eixo x , excentricidade e com eixos semi-maiores associados a e semi-menores b , centrados em (x_C, y_C) , o anel da elipse deve conter pixels que não estão muito longe da elipse nominal, a uma distância maior que a metade de sua largura w . Portanto, é calculado a distância mais próxima entre pixels e a elipse nominal para determinar se um pixel pertence ao anel da elipse. Primeiramente, obtemos novas coordenadas de pixel após deslocar a origem para (x_C, y_C) e rotacionar os eixos por θ . A equação canônica da elipse $(X/a)^2 + (Y/b)^2 = 1$ agora se aplica com $a > b$. Em seguida, após encontrar as coordenadas de pixel correspondentes (X_P, Y_P) no primeiro quadrante, é necessário encontrar a raiz \bar{s} da equação $G(s) = 0$ da Eq. 3.5:

$$\begin{aligned} r_0 &= \left(\frac{a}{b}\right)^2, \quad z_0 = \frac{X_P}{a}, \quad z_1 = \frac{Y_P}{b}, \\ G(s) &= \left(\frac{r_0 z_0}{s + r_0}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{s + 1}\right)^2 - 1 \end{aligned} \quad (3.5)$$

A raiz \bar{s} entre $-1 + z_1$ e $-1 + \sqrt{r_0^2 z_0^2 + z_1^2}$ é calculada por um algoritmo de bissecção adaptado de Press (1982). Em seguida, definimos a quantidade $\bar{t} = \bar{s} b^2$. Para $\bar{t} < 0$, $\bar{t} = 0$ e $\bar{t} > 0$ o pixel está, respectivamente, dentro, sobre ou fora da elipse canônica. A distância mais próxima d entre o pixel (X_P, Y_P) e a elipse canônica no ponto (X_E, Y_E) é finalmente obtida pelas fórmulas na Eq. 3.6.

$$Y_P > 0 \text{ and } X_P > 0 \quad \begin{cases} X_E = \frac{a^2 X_P}{\bar{t} + a^2} \\ Y_E = \frac{b^2 Y_P}{\bar{t} + b^2} \\ d = \sqrt{(X_P - X_E)^2 + (Y_P - Y_E)^2} \end{cases}$$

$$Y_P > 0 \text{ and } X_P = 0 \quad \begin{cases} X_E = 0 \\ Y_E = b \\ d = |Y_P - Y_E| \end{cases}$$

$$Y_P = 0 \text{ and } X_P < (a^2 - b^2)/a \quad \begin{cases} X_E = \frac{a^2 X_P}{a^2 - b^2} \\ Y_E = b \sqrt{1 - \left(\frac{X_E}{a}\right)^2} \\ d = \sqrt{(X_P - X_E)^2 + Y_E^2} \end{cases}$$

$$Y_P = 0 \text{ and } X_P \geq (a^2 - b^2)/a \begin{cases} X_E = a \\ Y_E = 0 \\ d = |X_P - X_E| \end{cases} \quad (3.6)$$

Uma vez que as distâncias são invariantes a deslocamentos da origem e rotação, d é a distância mais próxima do pixel para a elipse nominal no quadro (x, y) não deslocado e não rotacionado do campo de visão (FOV). Pixels com $d \leq w/2$ estão dentro do anel da elipse. Adotamos $w = \sqrt{2}$ pixels como a largura dos anéis elípticos, pois isso corresponde à diagonal de um pixel.

3.1.6.6 Estatísticas de Quartis com Anéis

Nas estatísticas de quartis, os valores de dados mais baixos e mais altos do primeiro e último quartis são descartados. Apenas os 50 por cento dos valores médios são usados para estimar a média e a dispersão (desvio padrão) da amostra de dados. A ideia pode ser estendida para qualquer percentagem de eliminação. Os extremos dos valores dos dados podem conter informações corrompidas, enquanto o meio contém informações mais precisas para estimar as propriedades estatísticas básicas da amostra de dados.

Ao utilizar as estatísticas de quartis, melhoramos o processamento de anéis, veja a seção 10 de Assafin (2023a), em substituição aos histogramas utilizados nas versões anteriores da task. As estatísticas de histograma nas regiões internas da Fonte são especialmente afetadas, uma vez que há menos pixels disponíveis em comparação com as regiões externas, resultando em estatísticas de histograma menos precisas, contagens de moda enviesadas, contagens de pixels de perfil da Fonte pouco realistas e, consequentemente, resultados insatisfatórios em coronagrafia. Por outro lado, as estatísticas de quartis são mais robustas com menos pixels, uma vez que não há problemas relacionados ao agrupamento de células.

No caso dos anéis, é provável que a maioria dos pixels atípicos tenha contagens mais altas associadas a objetos contaminantes próximos à Fonte. No entanto, essa quantidade pode variar de anel para anel de acordo com a quantidade de contaminação de alto fluxo invasora. O mesmo raciocínio se aplica às contagens mais baixas. Portanto, adotamos uma abordagem robusta para determinar os limites inferiores e superiores do quartil ótimo.

Primeiro, a porcentagem do quartil Q de valores atípicos é definida. Para a maioria dos casos, 25-50 por cento são suficientes. Isso fixa o tamanho dos pixels de anéis utilizáveis em $1 - Q$ por cento. Em seguida, ordenamos as contagens de pixels classificando-as em ordem crescente. Começando do primeiro pixel do anel como o primeiro limite

mais baixo e seguindo para o próximo pixel, e definindo o limite mais alto como o último pixel utilizável de acordo com o percentual $1 - Q$, amostramos todos os possíveis limites mais baixos/mais altos até que o último pixel do anel com a maior contagem seja alcançado. Os limites mais baixos e mais altos do quartil são obtidos como os pixels extremos com o menor gradiente de contagem, calculado a partir das classificações e contagens dos pixels. A suposição é que o gradiente é menor para valores típicos de pixels dentro do anel. Esta abordagem melhora as estatísticas de quartis, no sentido de que obtemos limites mais precisos mais baixos/mais altos. Por exemplo, para $Q = 50$ por cento, em vez de fixar limites mais baixos/mais altos em 25/25 por cento como de costume, podemos obter diferentes proporções para valores atípicos mais fracos/mais brilhantes, por exemplo, 15/35 por cento (ainda totalizando $Q = 50$ por cento), evitando com sucesso uma maior contaminação de fluxo no anel, o que é provável ocorrer na coronagrafia digital. Este procedimento robusto para a eliminação de valores atípicos de pixels de anel é realizado sempre que o número de pixels restantes for superior a 12. Na prática, isso significa que nenhuma eliminação ocorre nas partes muito centrais da Fonte (raio ≤ 2 pixels), para as quais o número de pixels disponíveis é extremamente pequeno.

No caso dos anéis, é provável que a maioria dos pixels atípicos tenha contagens mais altas associadas a objetos contaminantes próximos à Fonte. No entanto, essa quantidade pode variar de anel para anel de acordo com a quantidade de contaminação de alto fluxo invasora. O mesmo raciocínio se aplica às contagens mais baixas. Por isso, adotamos uma abordagem robusta para determinar os limites de quartis mais baixos e mais altos.

Primeiro, a porcentagem de quartis Q de valores atípicos é definida. Para a maioria dos casos, 25-50 por cento são suficientes. Isso fixa o tamanho dos pixels de anéis utilizáveis em $1 - Q$ por cento. Em seguida, ordenamos as contagens de pixels classificando-as em ordem crescente. Começando a partir do primeiro pixel do anel como o primeiro limite mais baixo e seguindo para o próximo pixel, e definindo o limite mais alto como o último pixel utilizável de acordo com o percentual $1 - Q$, amostramos todos os possíveis limites mais baixos/mais altos até que o último pixel de anel com a maior contagem seja alcançado. Os limites de quartis mais baixos e mais altos são obtidos como os pixels extremos com o menor gradiente de contagem, calculado a partir das classificações e contagens dos pixels. A suposição é que o gradiente é menor para valores típicos de pixels dentro do anel. Esta abordagem melhora as estatísticas de quartis, no sentido de que obtemos limites mais precisos mais baixos/mais altos. Por exemplo, para $Q = 50$ por cento, em vez de fixar limites mais baixos/mais altos em 25/25 por cento como de costume, podemos obter diferentes proporções para valores atípicos mais fracos/mais brilhantes, por exemplo, 15/35 por cento (ainda totalizando $Q = 50$ por cento), evitando

com sucesso uma maior contaminação de fluxo no anel, o que é provável ocorrer na coronografia digital. Este procedimento robusto para a eliminação de valores atípicos de pixels de anel é realizado sempre que o número de pixels restantes for superior a 12. Na prática, isso significa que nenhuma eliminação ocorre nas partes muito centrais da Fonte (raio ≤ 2 pixels) para as quais o número de pixels disponíveis é extremamente pequeno.

Em vez de simplesmente calcular a contagem média após a remoção dos valores atípicos de pixels, o PDC refina ainda mais a estimativa média para os pixels dentro do anel. Após a eliminação de valores atípicos, usamos dois pesos para calcular as contagens médias do anel.

O primeiro peso é o peso da distância w_D . Com base na distância d do pixel até a elipse nominal (consulte a Seção 3.1.6.5), os pixels mais próximos da elipse nominal recebem mais peso. O peso da distância w_D é calculado para cada pixel do anel como na Eq. 3.7.

$$w_D = \frac{1}{(1 + d)^2} \quad (3.7)$$

O segundo peso é o peso do modo w_M . Ele está relacionado com a frequência com que uma contagem de pixel ocorre dentro do anel. A ideia é dar mais peso aos pixels com contagens mais próximas entre si. De certa forma, isso imita a busca pelo pico nas estatísticas de histograma, mas supera problemas com números pequenos para obter o modo de contagens (uma novidade nas estatísticas de quartis introduzida por nós, até onde sabemos). O peso do modo w_M é calculado para cada pixel do anel pela Eq. 3.8, onde c é a contagem do pixel em questão e c_m é a contagem de cada pixel do anel m de um total de N pixels do anel.

$$w_M = \frac{1}{\sum_{m=1}^N [1 + (c - c_m)^2]} \quad (3.8)$$

A média final das contagens C para o anel é calculada conforme a Equação 3.9, onde c é a contagem de cada pixel do anel:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N w_D(j) w_M(j) c(j)}{\sum_{k=1}^N w_D(k) w_M(k)} \quad (3.9)$$

3.1.6.7 Coronagrafia digital

Aqui, descrevemos como o perfil da Fonte é obtido pixel a pixel para obter a imagem coronografada. Os valores de contagem do perfil da Fonte são calculados para cada pixel i na área de trabalho da coronagrafia em suas coordenadas exatas (x_i, y_i) . Para cada pixel i , uma elipse nominal i é construída. Ela passa exatamente pelas coordenadas (x_i, y_i) , é centrada em (x_C, y_C) , tem um ângulo de orientação θ e relações de semi-eixo menor e semi-eixo maior $\frac{b}{a}$ exatamente iguais às da elipse de coronagrafia, ou seja, a mesma excentricidade. Para cada elipse nominal i , é definido um anel elíptico ri de largura w (3.1.6.5). Os pixels dentro do anel elíptico ri são submetidos às estatísticas por quartil descritas em Assafin (2023a). A melhor estimativa de contagem encontrada para o anel elíptico ri é então atribuída ao pixel i e armazenada. O procedimento é repetido para todos os pixels i na área de trabalho da coronagrafia. O perfil de brilho derivado da Fonte é então armazenado. A imagem original é subtraída deste perfil para obter a imagem digitalmente coronografada.

Pixels ruins mascarados têm seus valores definidos pela intensidade local do céu em suas coordenadas (x_i, y_i) (3.1.6.1). Pixels coronografados que eventualmente obtêm valores de contagem negativos também têm seus valores redefinidos para o céu local. A luminosidade do céu na periferia da área de trabalho é equiparada à do perímetro externo circundante. Isso preserva as propriedades fotométricas de todos os objetos dentro e fora da área de trabalho, ou seja, as propriedades fotométricas das imagens originais são preservadas na coronagrafia. A configuração das áreas de trabalho é detalhada no Guia do Usuário do PDC.

É possível observar um exemplo prático do uso da coronagrafia digital na figura 3.3, já que a luminosidade de Urano é um dos grandes obstáculos ao se tratar da fotometria de seu satélites.

Na figura 3.3 é possível observar como a coronagrafia digital melhorou drasticamente as medições astrométricas. Antes disso, era praticamente impossível delimitar corretamente Miranda sob a luz espalhada de Urano. As medições (x, y) desse perfil de luz contaminada são fortemente dependentes da modelagem das contagens de alta intensidade da luz espalhada que cerca a lua. Após a coronagrafia, isolamos claramente Miranda da fonte mais brilhante (Urano) e recuperamos com sucesso o perfil de luz da lua. Consequentemente, as medições (x, y) são dramaticamente aprimoradas.

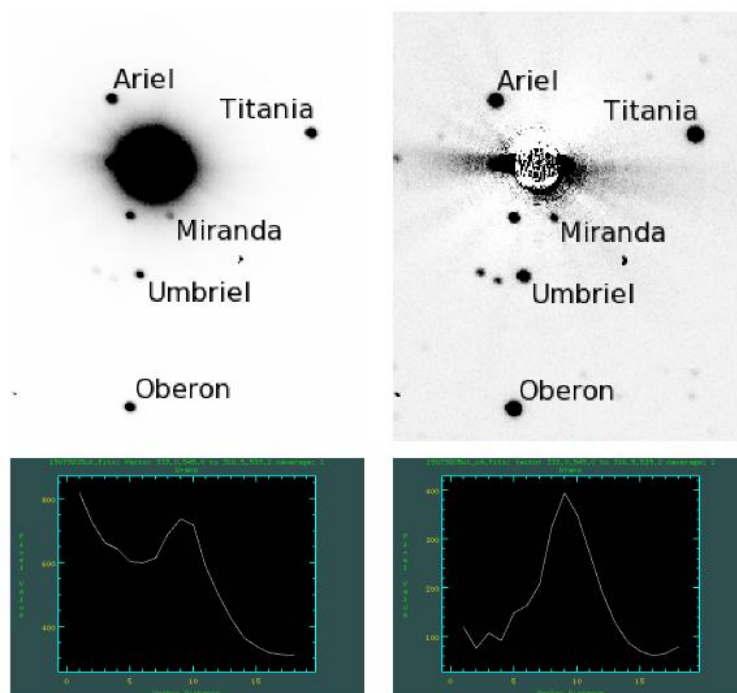


FIGURA 3.3. Coronagrafia digital de Urano com suas luas, observada com o telescópio de 1,6 metros no Observatório do Pico dos Dias - OPD/LNA, Brasil (código IAU 874). Trata-se de imagens do mapa de cores invertidas antes (superior esquerdo) e depois (superior direito) da coronagrafia digital; os gráficos inferiores mostram os perfis de luz correspondentes de Miranda ao longo de um segmento que liga os centros de Urano e Miranda antes (esquerda) e depois da coronagrafia (Assafin, 2023a).

Capítulo 4

Análise das Curvas de Luz e Ajuste de Limbo: pacote SORA

4.1 Análise de curva de ocultações estelares com o pacote SORA

As ocultações estelares por corpos pequenos sempre foram difíceis de prever e observar. Para uma previsão confiável, é necessário conhecer com precisão a posição da estrela ocultada e do corpo ocultante. Com o lançamento do catálogo Gaia, a posição das estrelas agora é muito precisa, com incertezas podendo chegar na casa dos 0,01 mas a depender da magnitude da estrela. Isso permite previsões precisas de ocultações estelares e um aumento no número de eventos observados ao longo dos anos. Isso permitirá um aumento significativo no número de ocultações estelares previstas e observadas. Para aproveitar essa nova era de Big Data, foi desenvolvido o SORA (Stellar Occultation Reduction and Analysis), uma biblioteca Python de código aberto para redução e análise de ocultações estelares (Gomes-Júnior et al., 2022).

A análise da curva de luz revelará uma diminuição (seja ela parcial ou mesmo múltipla) no fluxo luminoso causada pela ocultação em uma detecção *positiva* (onde o evento é observado diretamente, permitindo assim a medição das características do corpo ocultante). Em contrapartida, não haverá queda na detecção *negativa* (quando o evento não é observado diretamente, indicando a ausência de ocultação à primeira vista, mas ainda permitindo a identificação de possíveis ocultações relativas a estruturas ao redor do corpo). Esse tipo de detecção é útil para definir os limites do objeto e para descartar efeitos atmosféricos e/ou anéis. Em outras palavras, diferentes formas da curva de luz revelarão diversas características físicas do corpo e de seu ambiente, como atmosferas

(Sicardy et al., 2016) e anéis (Braga-Ribas et al., 2014). Características intrínsecas da estrela ocultada (ou sistema estelar) também podem ser traduzidas em características presentes na curva de luz.

Durante a análise da curva de luz, a queda a ser detectada depende de vários fatores, como a fase de rotação, que geralmente é desconhecida devido às típicas altas incertezas na estimativa do período de rotação, e a difração, como descrito por Roques et al. (1987) e como ilustrado na figura 4.1. Além disso, diferentes quedas de magnitude são esperadas para serem detectadas por diferentes observadores, devido aos diferentes ângulos de visada.

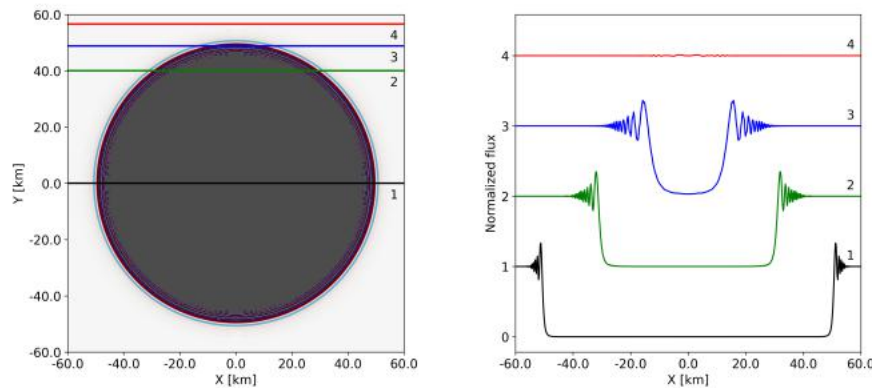


FIGURA 4.1. A figura à esquerda mostra os efeitos de difração de uma frente de onda causada por um corpo opaco bidimensional com bordas bem definidas (a chamada difração de Fresnel). A difração mudará o aspecto aparente do fluxo na entrada e saída do evento. Ela suaviza mais a queda próximo a entrada e saída do evento em cordas mais razantes, como pode ser visto na figura à direita. A variação de fluxo na entrada e saída dos eventos (na região crítica para a determinação dos instantes de entrada e saída da estrela durante a ocultação), causada pela difração observada no comprimento de onda λ a uma distância do corpo D , provoca um alargamento da sombra observada que pode ser estimada pela escala de Fresnel $f = \sqrt{D\lambda/2}$. Referência: Gomes-Júnior et al. (2022).

No entanto, ao considerar observações de corpos tão pequenos a distâncias tão grandes, cordas não tangentes e, principalmente, observações com tempo de exposição insuficiente para capturar o efeito, essas características geralmente não se manifestam nas curvas.

Outro parâmetro físico importante que pode afetar a curva de luz é o tamanho da estrela projetado na distância do corpo ocultante. Se for significativo, a penumbra pode ser detectada na curva de luz à medida que a estrela desaparece lentamente atrás do corpo. Um exemplo foi mostrado por Widemann et al. (2009) em uma ocultação de uma estrela Hipparcos pela lua de Urano, Titânia. O Gaia-EDR3 não fornece o raio estelar, mas esse parâmetro pode ser encontrado no Gaia-DR2 para mais de 70 milhões de estrelas. No entanto, mesmo sem essa informação, o SORA ainda pode estimar o diâmetro da estrela segundo os procedimentos de Kervella & Fouqué (2008) ou van Belle (1999), conforme o tipo de estrela, e conforme suas magnitudes em certas bandas. Foi o que aconteceu com o caso da ocultação por Umbriel, em que o Gaia DR2

classificou a estrela de ocultação como do tipo G no sistema MK. Para $V \equiv G$, uma magnitude absoluta $V = 3,214443$ (Anders et al., 2019) e um índice $B-V = 0,404 \pm 0,003$ (ver Tabela 4.1) posicionam a estrela como uma anã da sequência principal ou subgigante no diagrama H-R. Seguindo os modelos empíricos baseados nas magnitudes B, V ($\equiv G$) e K por Kervella & Fouqué (2008) para anãs e subgigantes, e por van Belle (1999) para estrelas da sequência principal, calculamos o diâmetro aparente para 0,0246 milissegundos de arco para a estrela, o que equivale a 0,339 km.

Além disso, é importante ressaltar que a duração de uma ocultação estelar dependerá da velocidade do corpo ocultante em relação à estrela e ao observador, geralmente durando menos de alguns minutos. Por exemplo, considerando apenas a velocidade orbital média da Terra de $29,78 \text{ km/s}$, a sombra do pequeno corpo cruzaria a Terra em cerca de 7 minutos. Portanto, podemos assumir um movimento linear da sombra em relação ao observador durante o evento. Dessa forma, calculamos os parâmetros da ocultação: distância e instante de maior aproximação (CA); ângulo de posição (PA); e velocidade da sombra (VS). Para isso, utilizamos a geometria mostrada em Assafin, M. et al. (2010) e reproduzida na Figura 4.4. Para duas posições de efemérides consecutivas (B_1 , B_2 , associadas aos tempos respectivos t_1 e t_2 , onde $t_2 > t_1$) próximas à estrela (S), a distância (CA) e o instante (t_0) de maior aproximação são determinados usando as equações 4.1 e 4.2, respectivamente:

$$CA = \sqrt{\Delta_1 - \left(\frac{\Delta_1^2 - \Delta_2^2 + \Delta B^2}{2\dot{\Delta}B} \right)} \quad (4.1)$$

$$t_o = t_1 + (t_2 - t_1) \sqrt{\frac{\Delta_1^2 - CA^2}{\Delta B^2}} \quad (4.2)$$

Onde Δ_1 e Δ_2 são as respectivas separações angulares da estrela para B_1 e B_2 , e ΔB é a separação angular entre B_1 e B_2 .

A velocidade da sombra (VS) em t_0 é determinada usando:

$$V_S = \frac{D_o \dot{\sin} \Delta B}{t_2 - t_1} \quad (4.3)$$

Em que D_o é a distância radial até o corpo ocultador. Finalmente, o ângulo de posição pode ser facilmente calculado a partir das efemérides em t_0 e das posições da estrela usando procedimentos padrão (Gomes-Júnior et al., 2022). Além disso, esses parâmetros podem ser usados para criar um mapa de ocultação.

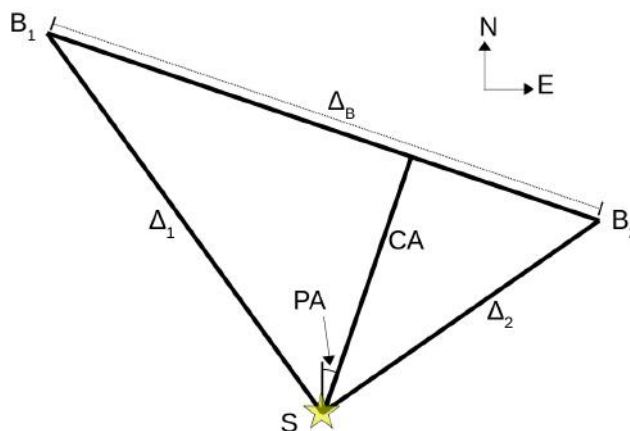


FIGURA 4.2. Representação de uma geometria de ocultação. S é a posição da estrela candidata, B_1 e B_2 são as efemérides do corpo nos tempos t_1 e t_2 , respectivamente, e mais próximas da estrela. Δ_1 e Δ_2 são as separações angulares da estrela em relação a B_1 e B_2 , respectivamente, enquanto Δ_B é a separação angular entre as efemérides. CA é a distância de abordagem mais próxima. PA é o ângulo de posição da abordagem mais próxima do corpo à estrela. N e E indicam a direção celestial Norte e Leste no plano tangente. Referência: Gomes-Júnior et al. (2022).

Por fim, as observações são feitas com um determinado tempo de exposição. Cada observador deve escolher essa exposição para maximizar o S/N, mas ser curta o suficiente para ter muitos pontos de dados durante a ocultação. É importante lembrar que a ocultação converte a resolução temporal em resolução espacial. A representação espacial de uma exposição é simplesmente calculada usando $r_t = V_S \times t_{exp}$, onde V_S é a velocidade da sombra do corpo ocultador e t_{exp} é o tempo de exposição. Se a exposição for longa o suficiente, ela dominará a difração de Fresnel (f) e o tamanho aparente da estrela. O modelo de difração, convoluído pela banda fotométrica e pelo tamanho da estrela, usando a velocidade normal à superfície, também deve ser integrado pela duração da exposição. Em seguida, podemos determinar um modelo de curva de luz e compará-lo com o observado com um ponto de dados para cada exposição. A figura 4.3 ilustra a junção de todas essas considerações que o modelo final deve possuir.

O SORA possui um módulo chamado "sora.lightcurve", criado para permitir ao usuário ajustar uma curva de luz a partir de uma ocultação estelar e determinar os tempos de imersão e emersão. As curvas de luz são gerenciadas pela classe "LightCurve". As funções deste módulo podem ser divididas em quatro procedimentos principais: Definir os parâmetros do modelo, preparar a curva de luz para ser ajustada, criar modelos de curva de luz, ajustar os parâmetros da ocultação e plotar e exportar informações.

Derivar uma curva de luz otimizada a partir de fotometria requer um software dedicado para essa tarefa. Embora vários softwares estejam disponíveis, como Tangra e PyMovie, é aconselhado utilizar o PRAIA devido ao que foi discutido no Capítulo 3. No entanto, isso em nada compromete a funcionalidade do SORA, e os usuários podem

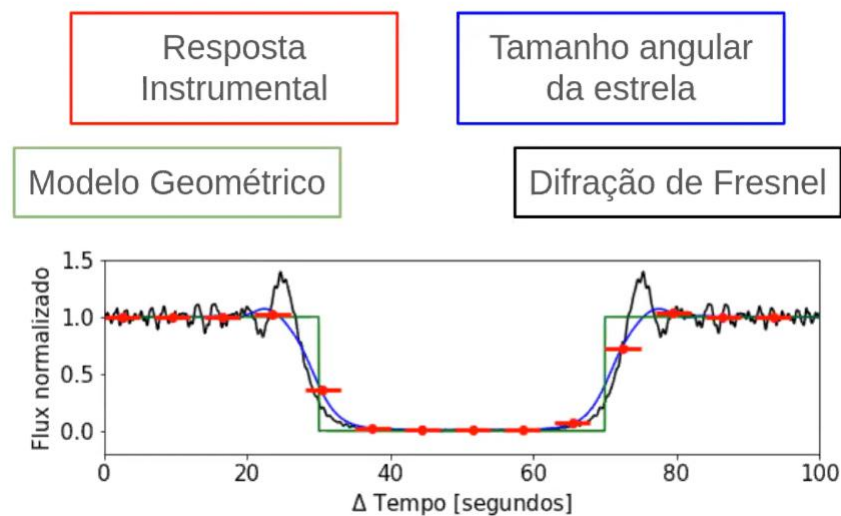


FIGURA 4.3. Na imagem, são evidenciadas todas as considerações essenciais para otimizar a precisão do modelo aplicado à curva de luz, visando a obtenção acurada dos tempos de ingresso e egresso. Os pontos vermelhos na curva representam a resposta instrumental, refletindo as informações adquiridas por frame, com a largura de cada linha correspondendo ao tempo de exposição. A representação em azul ilustra o efeito esperado na curva de luz ao levar em consideração o tamanho aparente da estrela durante a ocultação, resultando em uma suavização sutil devido ao desaparecimento gradual da estrela. O destaque em verde indica o Modelo Geométrico, também conhecido como modelo caixa, que representa a forma mais simples de modelar uma curva de luz durante uma ocultação. Por fim, o destaque em preto enfoca a difração de Fresnel, previamente discutida. Referência da imagem: Dr Bruno Morgado.

escolher o software que acharem mais adequado. Em seguida, a curva de luz pode ser importada para um objeto "LightCurve".

Um objeto "LightCurve" é instanciado a partir do tempo médio das observações, fluxo e tempo de exposição fornecidos pelo usuário. A escala de tempo esperada é o UTC, mas o usuário pode inserir um objeto Astropy Time na escala de tempo desejada que o SORA irá manipular corretamente. A incerteza do fluxo também pode ser fornecida. Quando nenhuma incerteza do fluxo é fornecida, ela é calculada como a dispersão da fotometria da curva de luz fora da queda da ocultação.

Ao modelar uma curva de luz de ocultação, devem ser considerados cinco parâmetros: comprimento de onda e largura de banda do instrumento (relacionados à difração); tempo de exposição; diâmetro aparente da estrela; distância entre o observador e o corpo ocultante; e velocidade de desaparecimento (reaparecimento) da estrela. A largura de banda e o tempo de exposição devem ser fornecidos pelo usuário, enquanto o diâmetro aparente, distância e velocidade podem ser definidos automaticamente pela classe "Occultation" quando o objeto "LightCurve" está associado a um evento.

Um método de normalização é fornecido para reduzir ruídos e tendências causados por flutuações observacionais não relacionadas à ocultação. Um polinômio é calculado usando os dados fora da ocultação e propagado para toda a curva. Esse procedimento é essencial principalmente nos casos em que nenhuma estrela de calibração está presente

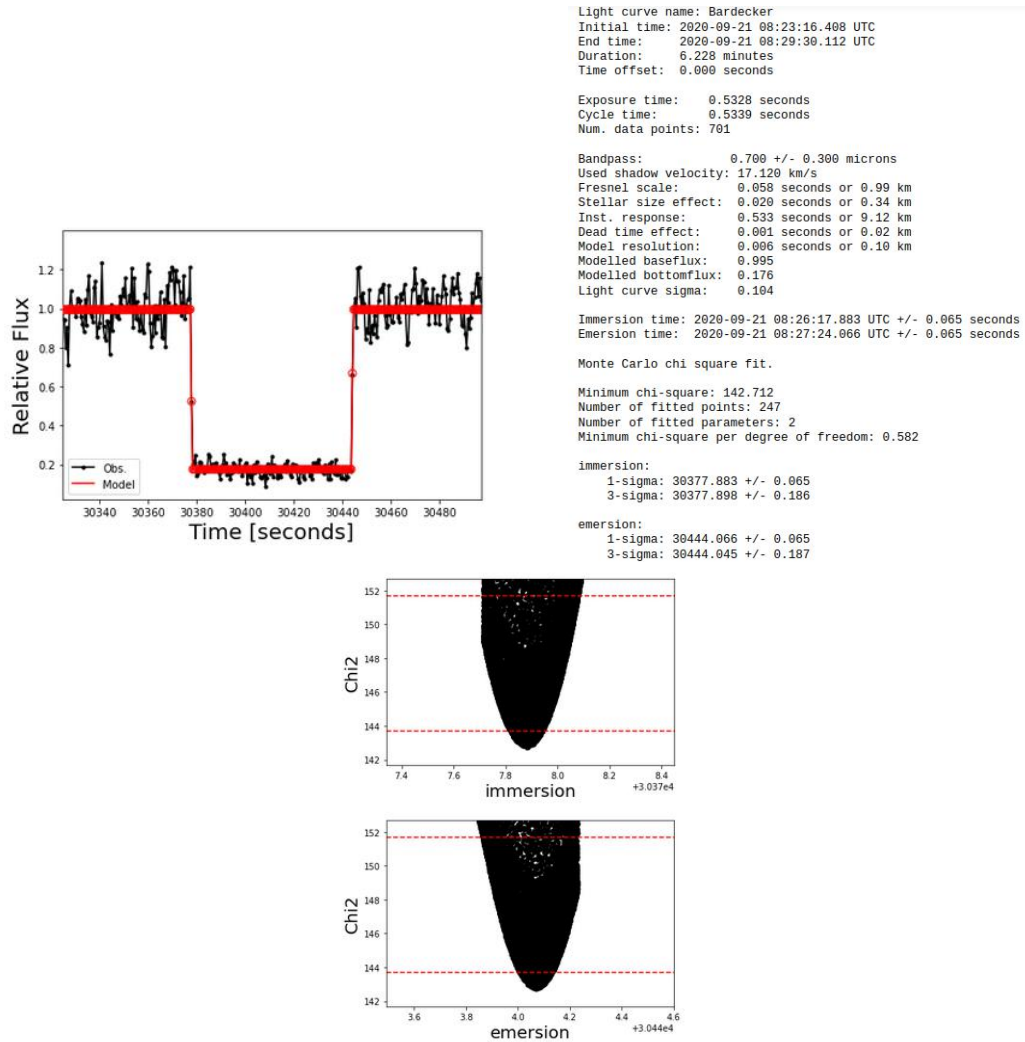


FIGURA 4.4. Exemplo de saída do SORA. Após ajustada o modelo da curva, retorna-se os valores do tempo de imersão e tempo de emersão com suas devidas incertezas. **OBS:** Perceba que a distribuição de χ^2 está assimétrica. Isso se deve à limitação da janela de tempo, imposta pelo usuário, para o SORA testar os modelos. Isso resulta em uma incerteza (em 3-sigma) não confiável, e nesses casos o usuário deve alterar essa restrição e tentar novamente.

no campo, impedindo a fotometria diferencial. É importante observar que tanto SORA quanto PRAIA possibilitam realizar essa normalização. Portanto, no caso de se utilizar PRAIA como ferramenta de fotometria, esse processo torna-se dependente da preferência pessoal do usuário. Para identificar automaticamente uma ocultação na curva de luz, é fornecida uma função baseada no algoritmo de ajuste de mínimos quadrados com caixa (box-fitting) descrito em Kovács, G. et al. (2002). Em vez de uma busca de período, calculamos a estatística como se fosse realizada na curva de luz dobrada (equações 1 a 4 no trabalho referido). Resumidamente, ajustamos uma função de degrau aos dados com posições, larguras e profundidades variáveis e coletamos o melhor ajuste como o resultado mais provável.

SORA possui outros módulos, como o "sora.body", que fornece funcionalidades

para lidar com corpos do Sistema Solar. Ele inclui a classe "Body", que representa e manipula as informações de um único corpo do Sistema Solar. Os objetos "Body" podem ser criados pelo usuário ou usando informações baixadas automaticamente do banco de dados JPL Small-Body Database Browser (SBDB). Os parâmetros físicos do SBDB são atribuídos como atributos do objeto "Body", como albedo, diâmetro, densidade, parâmetro gravitacional padrão (GM), período de rotação, coordenadas do polo, cores B-V e U-B, magnitude absoluta (H), inclinação de fase (G) e ID SPK (usado para identificar o corpo nos kernels SPICE). O módulo 'sora.star' lida com informações sobre estrelas. Ele inclui a classe "Star", que armazena informações sobre uma única estrela. Os objetos "Star" podem ser criados consultando os catálogos Gaia-DR2, Gaia-EDR3 ou Gaia-DR3 no serviço CDS Vizier. Os parâmetros astrométricos, magnitude e tamanho da estrela são armazenados como atributos. O módulo também permite corrigir as paralaxes e os movimentos próprios usando metodologias específicas. O módulo "sora.observer" lida com a definição e uso da posição do observador. Ele inclui as classes "Observer" e "Spacecraft" para observadores em terra e espaçonaves, respectivamente. Com a classe "Observer", as coordenadas geodésicas podem ser fornecidas pelo usuário ou obtidas do Minor Planet Center. A classe "Spacecraft" permite fornecer a posição de uma espaçonave usando kernels SPICE ou o serviço web JPL Horizons.

Esses módulos fazem parte da biblioteca SORA e fornecem funcionalidades para manipulação de dados para o estudo do Sistema Solar.

4.2 Ajuste do Limbo aparente (forma e tamanho)

O caso que usaremos para estudar a aplicação das técnicas de tratamento de ocultações estelares será a da ocultação de Umbriel, satélite de Urano, observada em Setembro de 2020. Esse evento forneceu 19 cordas positivas e cinco negativas, sendo as mais próximas a 293,0 e 93,2 km do limbo (após o ajuste), respectivamente nos lados norte e sul da figura do corpo no plano do céu. Utilizamos o SORA para ajustar um círculo e uma elipse às cordas no plano do céu. Para um limbo circular, os parâmetros ajustados em $M = 3$ são os deslocamentos das efemérides observados f_c e geocêntricos g_c projetados no plano do céu (respectivamente em α e δ), e o raio R . Para um limbo elíptico, ajustamos $M = 5$ parâmetros. Além de f_c e g_c , temos o semi-eixo aparente a' , a oblaticidade aparente $\epsilon' = (a' - b')/a'$, onde b' é o semi-eixo aparente menor, e o ângulo de posição P de b' no plano do céu (com norte = 0° , aumentando no sentido horário para leste). Para $N = 38$ extremidades de cordas projetadas no plano do céu, temos $N - M = 35$ graus de liberdade para ajustes circulares e $N - M = 33$ para ajustes elípticos. Também inserimos um parâmetro de limbo nos ajustes - o parâmetro σ_{modelo} do SORA

na equação 11 em Gomes-Júnior et al. (2022). Ele regula a incerteza dos limites do círculo/elipse associada à suposta existência de características topográficas na superfície do corpo. Isso é justificado, uma vez que Umbriel - junto com Miranda - tem o limbo mais irregular entre os satélites uranianos. (Thomas 1988; Schenk & Moore 2020).

TABELA 4.1. Informações sobre a estrela, Umbriel e Urano durante a ocultação.

Estrela Ocultada	
Epoch	21 de setembro de 2020 às 08:24:36.000 UTC
ID da Fonte	Gaia DR3 75195604519240064
Posição da Estrela ⁽¹⁾	$\alpha = 02^h 30^m 28.^s 84657 \pm 0.0873$ mas $\delta = 14^\circ 19' 36''.3762 \pm 0.0860$ mas
Magnitude ⁽²⁾	R = 13.474 \pm 0.002; G = 13.779 \pm 0.002 B = 14.183 \pm 0.002; J = 11.904 \pm 0.021 H = 11.412 \pm 0.023; K = 11.323 \pm 0.022 Magnitude G absoluta = 3.214443
RUWE ⁽³⁾	1.11
Diâmetro Aparente ⁽⁴⁾	0.0246 mas = 0.339 km
Classe Estelar ⁽⁵⁾	Estrela anã ou subgigante da sequência principal do tipo G
Umbriel	
Efémeris ⁽⁶⁾	DE435/URA111
Distância Geocêntrica	19.0194591323518 au
Velocidade Aparente	17.2 km/s (velocidade relativa Umbriel - estrela)
Magnitude Aparente ⁽⁷⁾	V = 14.978
Massa ⁽⁸⁾	$(1.275 \pm 0.028) \times 10^{21}$ kg
Período de Rotação ⁽⁹⁾	4.144 dias
Polo ⁽¹⁰⁾	AD = 17 ^h 08 ^m 55. ^s 6624 Declinação = -15° 02' 00".809
Ângulo de Posição ⁽¹¹⁾	P = 145.082 graus
Ângulo de Aspecto ⁽¹²⁾	$\zeta = 38^\circ 16' 24''.82$ (polo norte)
Ponto Subobservador ⁽¹³⁾ em Umbriel	Longitude = 204° 20' 04".518 Latitude = +51° 43' 35".183
Ponto Sub-Urano ⁽¹⁴⁾ em Umbriel	Longitude = 1° 04' 17".394 Latitude = -0° 11' 08".356

O melhor χ^2 para o ajuste circular - esperado em torno de $N/(N-M) = 38/(38-3) = 1,086$ - foi alcançado com $\sigma_{modelo} = 4,2$ km. O ângulo de posição não pôde ser determinado sem grandes incertezas no ajuste elíptico, então o fixamos usando o valor esperado (Tabela 4.1) a partir da geometria satélite-Urano (Assafin et al., 2023). O grau de liberdade para o ajuste elíptico foi, portanto, $N - M = 34$, e o melhor χ^2 - esperado em torno de $N/(N-M) = 38/(38-4) = 1,118$ - foi alcançado com $\sigma_{modelo} = 4,3$ km. A Tabela 4.2 mostra os resultados para os ajustes de limbo circular e elíptico. A Figura 4.5 mostra as cordas ajustadas com um limbo circular, visualmente indistinguíveis do ajuste elíptico.

TABELA 4.2. Ajustes da borda circular e elíptica de Umbriel a partir das 19 cordas positivas.

Borda circular	
Raio	$R = 582.4 \pm 0.8$ km (1-sigma)
Deslocamentos Efemérides	$f_c = -23.7 \pm 0.8$ km $g_c = -169.4 \pm 1.9$ km
Parâmetro de Borda	$\sigma_{modelo} = 4.2$ km
χ^2 por grau de liberdade	1.077
Borda elíptica	
Ângulo de Posição ⁽¹⁾	P = 145.082 graus (fixo)
Semi-eixo aparente maior	$a' = 582.6 \pm 1.1$ km (1-sigma)
Achatamento aparente	$e' = 0.003 \pm 0.003$ (1-sigma)
Raio equivalente aparente ⁽²⁾	$R'_{eq} = 581.7 \pm 2.0$ km
Deslocamentos Efemérides ⁽³⁾	$f_c = -23.7 \pm 0.9$ km $g_c = -169.5 \pm 2.0$ km
Parâmetro de Borda	$\sigma_{modelo} = 4.3$ km
χ^2 por grau de liberdade	1.104

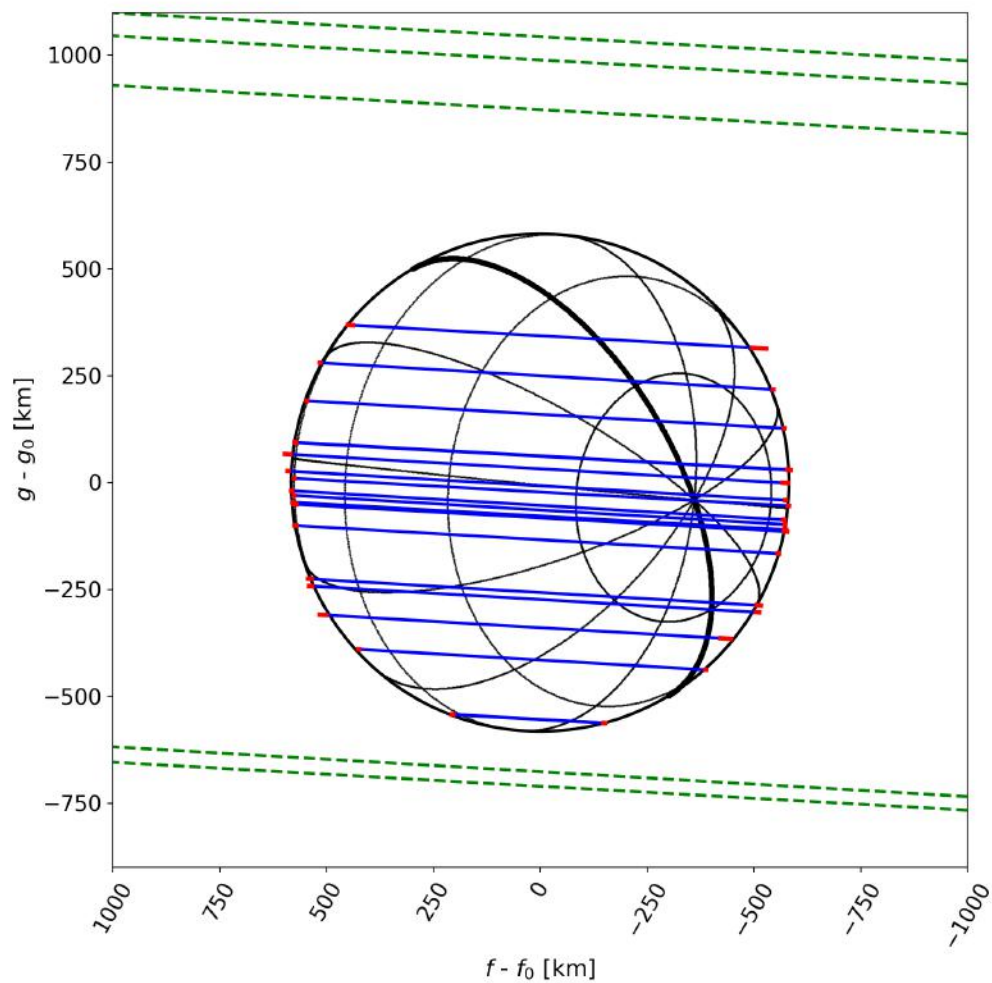


FIGURA 4.5. 19 cordas positivas (azul) ajustadas a uma borda circular e 5 cordas negativas (verde). A barra de erro (1σ) é representada nas extremidades das cordas (vermelho). O diâmetro obtido é de 1164.8 km. O ajuste da borda aparente com uma elipse é visualmente indistinguível. No plano do céu (f, g), o norte está para cima e o leste está para a esquerda, com (f_0, g_0) sendo os deslocamentos das efemérides. O meridiano destacado está no plano que contém os polos de Umbriel e Urano, e indica onde o suposto elipsoide de Umbriel seria mais oblato, já que o satélite está em "equilíbrio de maré" com o planeta. Referência: Assafin et al. (2023).

Capítulo 5

A Ocultação Estelar de Umbriel de 21 de Setembro de 2020

Neste capítulo, apresento os detalhes da observação da ocultação estelar de Umbriel, um dos satélites de Urano, que ocorreu em 21 de setembro de 2020. Este evento astronômico despertou o interesse de diversos observadores amadores, que contribuíram com suas observações para a produção dos dados.

O mapa na figura 5.1 indica a região onde a ocultação foi visível. O evento pôde ser observado a partir de boa parte do território norte americano. Com base nessas informações, poderemos analisar diferentes perspectivas e ângulos de observação, enriquecendo nossa caracterização de Umbriel.

Vale ressaltar que todos os registros utilizados nesta pesquisa foram fornecidos por observadores amadores, que dedicaram seu tempo e esforço para capturar o momento da ocultação estelar de Umbriel. Apresenta-se, no presente capítulo, detalhes sobre a localização geográfica desses observadores, destacando a diversidade de locais e pontos de vista envolvidos na coleta de dados, mostrando que a técnica de ocultação estelar é capaz de extrair dados valiosos e precisos mesmo com observações mais modestas.

Para registrar a ocultação, foi preciso obter a predição do evento, posicionar-se dentro ou próximo ao caminho de sombra previsto, conectar uma câmera de vídeo sensível ao telescópio e registrar o campo estelar ao redor, incluindo a "Estrela-Alvo", próximo ao momento do evento previsto. Por diversas razões, as previsões possuem fatores de incerteza que podem frustrar quem observa. Geralmente, isso ocorre devido à incerteza da órbita do corpo ocultador, e, em menor medida, à incerteza da posição da estrela.

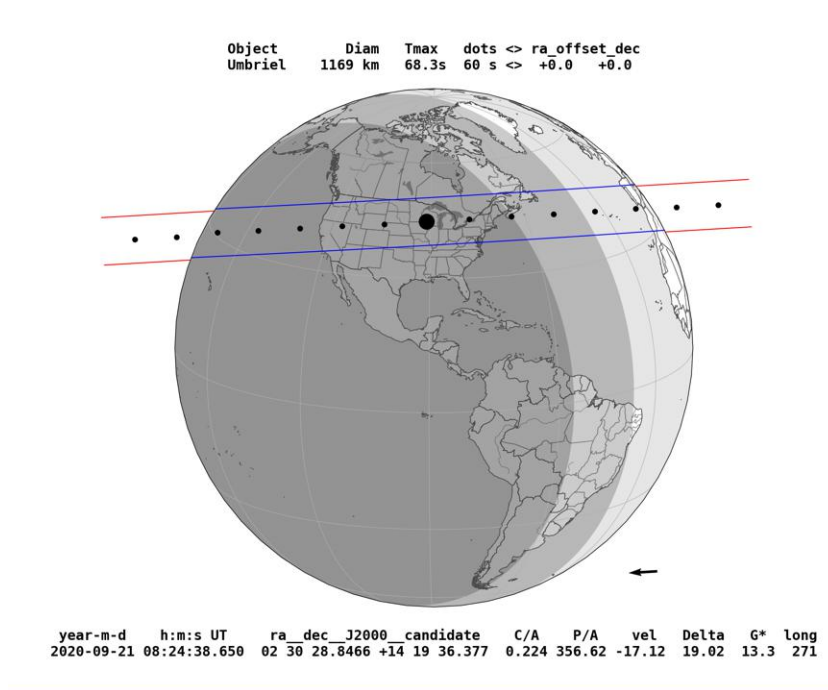


FIGURA 5.1. A ocultação de Umbriel ocorreu em 21 de Setembro de 2020, e pôde ser visto em território norte americano.

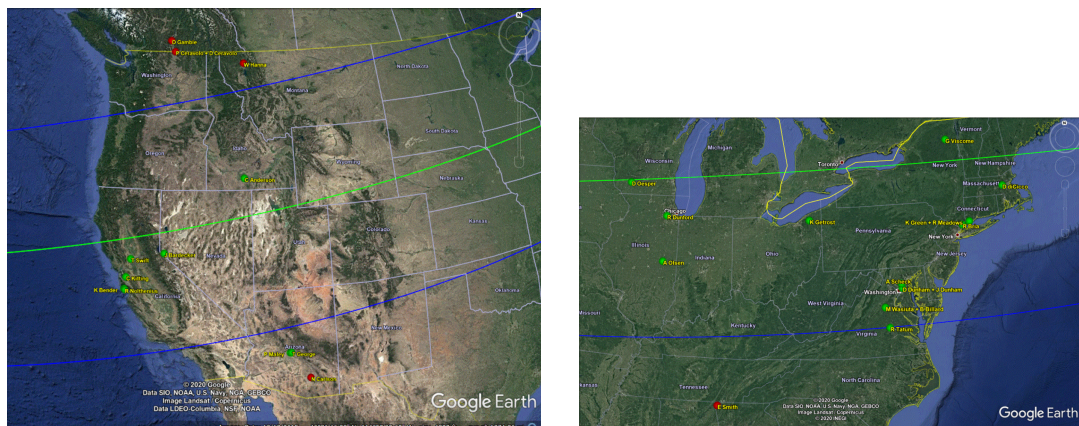


FIGURA 5.2. Localização de alguns observadores via satélite. Os pontos verdes referem-se aos observadores que obtiveram cordas positivas, e os pontos vermelhos aos observadores que obtiveram cordas negativas. Imagens de Google Earth.

Após o evento, os observadores estimam os tempos de desaparecimento e reaparecimento para em seguida enviar a observação para a associação de astrônomos usando um formulário padrão de relatório.

A tabela 5.1 detalha as observações realizadas pelos amadores. Isso inclui informações relevantes, como o tempo de exposição em segundos, utilizado para registrar o evento, que são cruciais para a análise e interpretação dos dados coletados. No próximo capítulo, apresentaremos os resultados obtidos a partir dessas observações, fornecendo insights valiosos sobre a natureza do satélite.

Observer	Latitude ($^{\circ} ' ''$), Longitude ($^{\circ} ' ''$), Altitude (m)	D(cm), f/, Detector, Format	Observation (UTC) Start (08:mm:ss), End (08:mm:ss)	Exp. time (s), Cycle time (s), Time device	Status
Dave Gamble, CAN	+49 35 34.000, -119 41 55.900, 522	45.70, 04.5, 1, FITS	19:00 - 29:00	0.11300, 0.11300, GPS	N
Peter & Debra Ceravolo, CAN	+49 00 32.000, -119 21 47.000, 1097	28.00, 05.0, 1, FITS	24:00 - 28:00	0.35000, 0.35141, GPS	N
William Hanna, USA	+48 23 38.730, -114 12 43.960, 979	27.94, 10.0, 1, FITS	21:37 - 30:03	1.00000, 1.00235, GPS	N
Chris Anderson, USA	+42 35 01.800, -114 28 13.200, 1120	60.00, 12.8, 4, AVI	22:48 - 30:15	2.06832, 2.06930, GPS	P
Steve Messner, USA	+44 29 57.500, -093 07 45.080, 289	45.00, 03.0, 3			O
George Viscome, USA	+44 15 40.140, -074 00 25.460, 596	36.83, 06.0, 2, FITS	19:31 - 25:38	0.17500, 0.17630, GPS	P
David Oesper, USA	+42 57 36.900, -090 08 31.100, 390	30.50, 03.3, 3, AVI	09:00 - 36:10	0.12800, 0.13310, GPS	P
James Bean, USA					O
Dennis di Cicco, USA	+42 21 01.000, -071 23 21.000, 43	40.60, 20.0, 5	20:01 - 28:00	0.25000, 0.25000, NTP	L
Jerry Bardecker, USA	+38 53 23.500, -119 40 20.300, 1524	30.48, 10.0, 3, AVI	23:15 - 29:30	0.03330, 0.03330, GPS	P
Theodore J. Swift, USA	+38 33 08.260, -121 47 08.140, 18	20.00, 10.0, 3, AVI	24:30 - 28:30	0.26400, 0.26700, GPS	P
Robert Dunford, USA	+41 45 32.400, -088 07 00.010, 230	35.56, 01.9, 1, FITS	18:52 - 28:46	3.00000, 3.00070, GPS	P
Kai Getrost, USA	+41 35 06.100, -081 04 45.720, 348	25.40, 10.0, 1, FITS	20:01 - 28:06	0.50000, 0.50030, GPS	P
Chris Kitting, USA	+37 38 48.840, -122 02 09.096, 189	25.40, 04.7, 3, AVI	23:00 - 30:30	0.26640, 0.26670, GPS	P
Kevin Green, USA	+41 10 15.900, -073 19 39.300, 87	35.60, 07.7, 1, SER	18:39 - 27:18	1.00000, 1.00220, GPS	P
Rick Bria, USA	+41 04 01.000, -073 41 30.000, 118	35.50, 07.2, 3, AVI	20:00 - 26:05	0.13320, 0.13320, GPS	P
Kirk Bender, USA	+37 03 27.470, -122 07 23.200, 555	20.32, 10.0, 3, AVI	23:30 - 31:00	0.26640, 0.26700, GPS	P
Richard Nolthenius, USA	+37 01 04.120, -122 04 45.310, 341	20.32, 06.3, 3, AVI	23:10 - 30:00	0.52800, 0.53390, GPS	P
Aart Olsen, USA	+40 05 12.400, -088 11 46.300, 224	50.00, 04.0, 6, AVI	19:27 - 29:27	0.40000, 0.40000, GPS	P
Andrew Scheck, USA	+39 08 59.070, -076 53 13.330, 120	20.00, 06.3, 7, MOV	20:36 - 24:51	0.99000, 1.00050, GPS	P
David Dunham, USA	+38 59 12.745, -076 52 08.880, 46	41.00, 04.4, 1, FITS	20:01 - 25:04	1.00000, 1.00050, GPS	P
Barton Billard & Myron E. Wasiuta, USA	+38 20 02.000, -077 42 38.000, 96	10.20, 07.0, 1, FITS	20:51 - 26:51	4.00000, 4.00172, GPS	P
John Moore, USA					T
Randy Tatum, USA	+37 35 42.576, -077 33 02.484, 77	30.00, 10.0, 8, AVI	21:22 - 26:16	0.10000, 0.10000, NTP	P
Paul Maley, USA	+33 48 42.858, -111 57 07.974, 654	28.00, 05.0, 3, AVI	24:57 - 27:55	0.53280, 0.53390, GPS	P
Tony George, USA	+33 49 00.100, -111 52 07.300, 843	30.00, 03.3, 3, AVI	24:30 - 28:30	0.13320, 0.13390, GPS	P
Ned Smith, USA	+34 52 30.000, -085 28 15.600, 210	63.50, 03.2, 1, FITS	20:14 - 28:13	1.00000, 1.00011, GPS	N
Norman Carlson, USA	+32 25 53.140, -110 44 43.940, 2391	23.50, 00.5, 9 AVI	23:28 - 30:00	0.13340, 0.13340, NTP	N
Roger Venable, USA	+32 22 25.080, -083 12 06.720, 103	35.60, 07.7, 3			O

TABELA 5.1. Tabela de todas as observações de Umbriel, incluindo a posição de cada observador, a razão focal, tempo de exposição, tempo de ciclo e status da corda. Em Status temos N para cordas *Negativas*, P para cordas *Positivas*, L para gravação de vídeo perdida, T para problemas técnicos e O para nublado. Detectores: 1 = QHY 174, 2 = QHY 174M, 3 = Watec 910HX, 4 = Watec 120N+, 5 = Celestron Skyris 618M, 6 = Watec 910BD, 7 = Mallincam, 8 = ZWO ASI224MC, 9 = RunCam Night Eagle Astro. Cordas ordenadas de norte a sul no plano do céu. Referência: Assafin et al. (2023).

Capítulo 6

Resultados e Análise da Ocultação de Umbriel

O presente capítulo apresenta as curvas de luz tratadas no projeto. Serão exibidos os ajustes das curvas de luz obtidas através da técnica de fotometria diferencial, pelo PRAIA, e o tratamento posterior pelo SORA, permitindo a determinação dos instantes de entrada e saída, e o ajuste do limbo (forma e tamanho) do corpo.

6.1 Curvas de luz e instantes de ingresso e egresso

A ocultação de Umbriel, observada em 21 de Setembro de 2020, forneceu uma grande oportunidade para estudar esse objeto celeste. O processo de análise começou com o tratamento dos dados fotométricos obtidos das observações. A saída do PRAIA na forma de curva de luz registra a variação do brilho da estrela alvo à medida que o corpo ocultador passa em sua frente. No processo de análise dessa curva, faz-se crucial realizar uma cuidadosa normalização dos dados para eliminar variações indesejadas causadas por efeitos atmosféricos e outros fatores.

Uma abordagem comum é normalizar as curvas de luz utilizando pontos fora da ocultação, tipicamente a partir de polinômios de grau 1. A normalização com pontos fora da ocultação permite estabelecer um padrão de referência para o brilho da estrela alvo. Essa abordagem ajuda a remover efeitos atmosféricos e outras fontes de ruído de fundo, permitindo uma representação mais precisa da variação do brilho da estrela durante a ocultação. Faz-se necessário também, realizar a eliminação de pontos discrepantes que possam comprometer a precisão dos resultados. Para isso, é comum utilizar um critério de eliminação baseado no fator 2.5 em relação ao erro do ajuste polinomial. Isso significa

que pontos que estão além de 2.5 vezes à incerteza do ajuste polinomial são excluídos da normalização, garantindo uma maior confiabilidade nos dados resultantes. Ao aplicar essas técnicas, o PRAIA é capaz de obter uma representação precisa da variação do brilho da estrela alvo durante a ocultação.

Houve também a consideração do fator brilho de Urano, que contaminava a contagem de pixels do alvo, sendo alguma vezes necessário aplicar a técnica de coronagrafia digital.

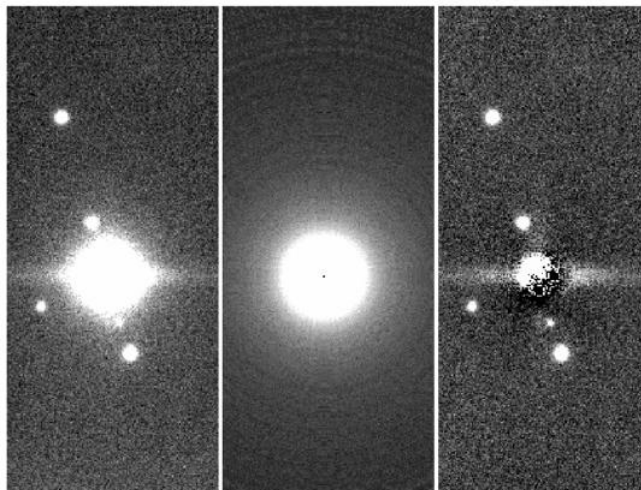


FIGURA 6.1. Coronagrafia digital aplicada à observação de Urano. Da esquerda para o meio e para a direita temos a imagem original, o brilho de perfil obtido de Urano isolado, e a imagem coronagrafada. Os satélites de cima a baixo são Titânia, Ariel, Miranda, Umbriel e Oberon. Referência: Assafin et al. (2009).

As Figuras 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.8, 6.10, e 6.11 mostram as curvas (positivas e negativas) com as quais tive contato direto durante o projeto, seja realizando fotometria e tratamento desde o início, seja remodelando as curvas para obter valores mais precisos dos tempos de ingresso e egresso.

Realizei a fotometria das observações usando o modo 2 do PRAIA, que, embora menos automatizado que o modo 3, permitiu-me compreender melhor a escolha dos objetos nas imagens de referência e ter uma melhor compreensão de como o programa funciona. Quanto à utilização do SORA, minha responsabilidade envolveu a verificação dos resultados por meio da aplicação de modelos com diversas variações de tempo diferentes, visando avaliar o ajuste dos modelos, além de conduzir a análise para obter os resultados finais dos tempos de ingressão e egressão das cordas nas quais realizei a fotometria. A praticidade do SORA ser em Python foi explorada para gerar gráficos (plots) e examinar as curvas, sendo utilizado inclusive nas cordas negativas com o intuito de identificar possíveis ocultações.

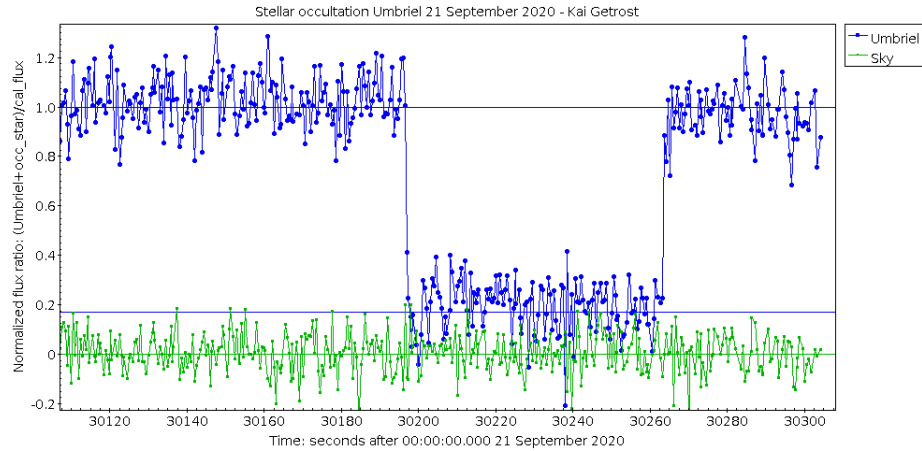


FIGURA 6.2. Curva de luz da ocultação de Umbriel, relativa ao observador 'Kai Getroski'. O sinal 'Sky' é o fluxo do fundo de céu; percebe como Umbriel sempre tem fluxo acima deste durante o evento, indicando que a fotometria captou um fluxo residual. **OBS:** Nessa observação, houve a necessidade de aplicar coronagrafia digital.

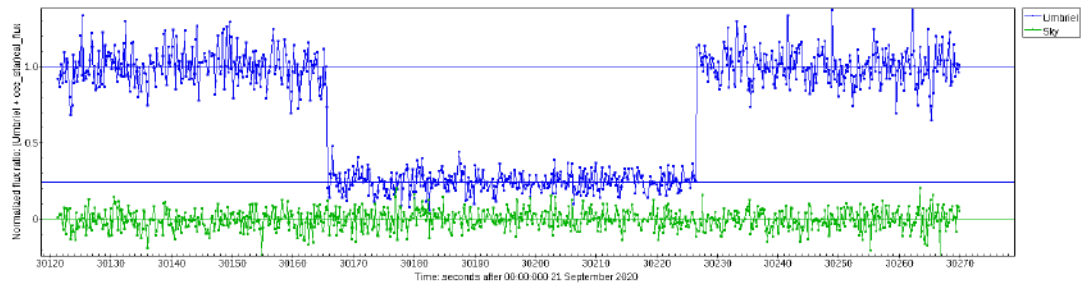


FIGURA 6.3. Curva de luz da ocultação de Umbriel, relativa ao observador 'G. Viscome'. **OBS:** Não houve a necessidade de aplicar coronagrafia digital, percebe que os ruídos de fundo de céu se interceptam menos do que na curva anterior.

A partir da medida dos tempos de ingresso e egresso, é possível determinar o tamanho e forma aparente do objeto ocultador. As figuras entre 6.4 e 6.10 ilustram os ajustes feitos em algumas das cordas. A figura 6.12 ilustra o cálculo de um dos chi quadrado. A tabela 6.1 mostra os principais resultados das cordas positivas tratadas durante a pesquisa. Fiquei responsável pelos reajustes das cordas com as velocidades de evento atualizadas, e participei das tentativas iniciais de ajustar um círculo no formato de Umbriel.

6.2 Forma de Umbriel

A medida do tamanho e forma de Umbriel a partir das curvas de luz tratadas pelo PRAIA e SORA envolve um processo de análise cuidadoso e refinado. Essas curvas de luz registradas durante a ocultação estelar fornecem informações valiosas sobre a silhueta de Umbriel à medida que ele passa em frente a uma estrela de fundo.

Observer	Ingress		Egress		Chord length (km)	(O-C) _{IN} (km)		σ (flux)	Coro Cal
	(08:mm:ss.s)	σ (s) σ (km)	(08:mm:ss.s)	σ (s) σ (km)		Circle	Ellipse		
Anderson	25:51.712	0.943 16.220	26:46.677	0.357 6.140	945.398 ± 17.343	+18.346 ± 16.439 19.533	-5.560 ± 6.225 -5.722	0.13	N N
Viscome	22:45.657	0.028 0.482	23:46.549	0.023 0.396	1047.342 ± 0.623	+3.662 ± 0.488 +4.602	+4.105 ± 0.401 +3.940	0.10	N C
Oesper	23:57.557	0.022 0.378	25:01.655	0.024 0.413	1102.486 ± 0.560	+1.833 ± 0.384 +2.502	-3.412 ± 0.419 -3.489	0.11	C C
Bardecker	26:17.330	0.066 1.135	27:23.519	0.069 1.187	1138.451 ± 1.642	-2.417 ± 1.151 -2.034	-1.557 ± 1.203 -1.460	0.11	C C
Swift	26:26.857	0.187 3.216	27:33.196	0.065 1.118	1141.031 ± 3.405	+0.217 ± 3.260 +0.597	-2.140 ± 1.133 -2.040	0.14	C C
Dunford	23:47.455	0.373 6.416	24:54.651	0.385 6.622	1155.771 ± 9.220	-2.138 ± 6.724 -1.846	+12.690 ± 2.970 +12.852	0.10	C C
Getrost	23:14.272	0.047 0.808	24:21.048	0.047 0.808	1148.547 ± 1.143	-7.269 ± 0.821 -7.086	+8.724 ± 0.821 +8.976	0.09	C C
Kitting	26:29.916	0.047 0.808	27:36.347	0.051 0.877	1142.613 ± 1.193	+0.923 ± 0.819 +1.073	-6.404 ± 0.889 -6.113	0.15	C C
Green	22:37.692	0.085 1.462	23:43.770	0.053 0.912	1136.542 ± 1.723	-5.969 ± 1.483 -5.904	-0.355 ± 0.925 +0.010	0.11	C C
Bria	22:39.130	0.031 0.533	23:45.047	0.038 0.654	1133.772 ± 0.844	-1.692 ± 0.541 -1.650	-5.146 ± 0.663 -4.751	0.18	C C
Bender	26:31.960	0.133 2.288	27:38.105	0.073 1.256	1137.694 ± 2.610	+1.211 ± 2.319 +1.226	-1.633 ± 1.273 -1.198	0.19	N C
Nolthenius	26:31.794	0.206 3.543	27:37.742	0.180 3.096	1134.306 ± 4.705	+3.326 ± 3.592 +3.332	-5.914 ± 3.140 -5.464	0.35	C C
Olsen	23:49.104	0.092 1.582	24:53.865	0.118 2.030	1113.889 ± 2.574	-1.102 ± 1.607 -1.206	-0.412 ± 2.062 +0.170	0.10	C C
Scheck	22:56.083	0.283 4.868	23:56.284	0.214 3.681	1035.457 ± 6.103	+3.751 ± 3.943 +3.484	+2.744 ± 3.739 +3.660	0.07	N C
Dunham	22:55.982	0.210 3.612	23:55.951	0.202 3.474	1031.467 ± 5.012	+10.195 ± 3.668 +9.919	+7.622 ± 3.529 +8.576	0.14	C C
Billard-Wasiuta	23:03.893	0.711 12.229	23:57.896	0.414 7.121	928.852 ± 14.151	-15.204 ± 12.424 -15.484	+13.803 ± 7.235 +14.912	0.08	C N
Tatum	23:05.211	0.030 0.516	23:51.710	0.033 0.568	799.783 ± 0.767	+2.691 ± 0.524 +2.481	-5.068 ± 0.577 -3.785	0.25	N C
Maley	26:14.879	0.073 1.256	26:35.260	0.099 1.703	350.553 ± 2.116	+0.606 ± 1.276 +0.974	-1.399 ± 1.731 -0.163	0.09	C C
George	26:14.606	0.018 0.310	26:34.791	0.020 0.344	347.182 ± 0.463	+0.461 ± 0.315 +0.836	-1.078 ± 0.350 +0.156	0.09	C C

TABELA 6.1. Tabela com os instantes de ingresso/egresso de cada corda. Coronografia (Coro): C e N significam com coronografia ou sem coronografia. Calibração fotométrica (Cal): C e N significam calibrado ou não calibrado. A dispersão da razão de fluxo da curva de luz normalizada σ (fluxo) é o desvio padrão calculado fora da ocultação. Os deslocamentos (O-C)_{IN} (entrada) e (O-C)_{EG} (saída) são as diferenças de distância radial entre os extremos da corda medida e os limites circulares/elípticos ajustados, com valores positivos/negativos para extremos fora/dentro dos limites (consulte a Seção 4.2). Os erros (O-C) são os erros medidos da corda nas extremidades projetados nas direções radiais; eles são os mesmos para limites circulares/elípticos. As cordas são ordenadas de norte a sul no plano do céu. Referência: Assafin et al. (2023).

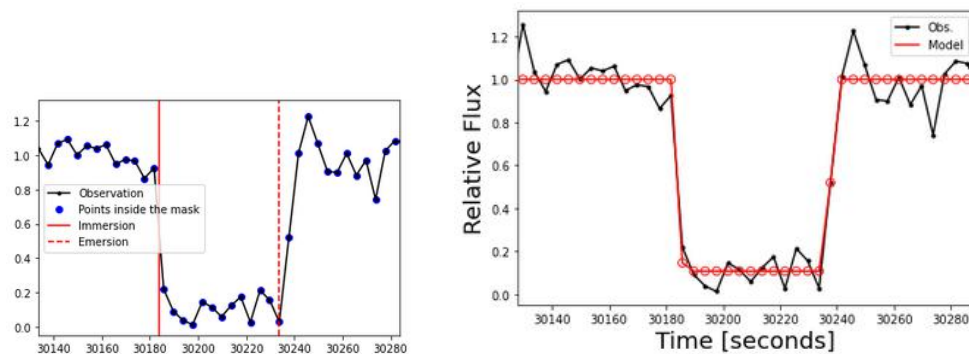


FIGURA 6.4. Curva de luz da ocultação por Umbriel, em que os pontos marcados em azul são utilizados para o cálculo do modelo. Observador Barton Billard.

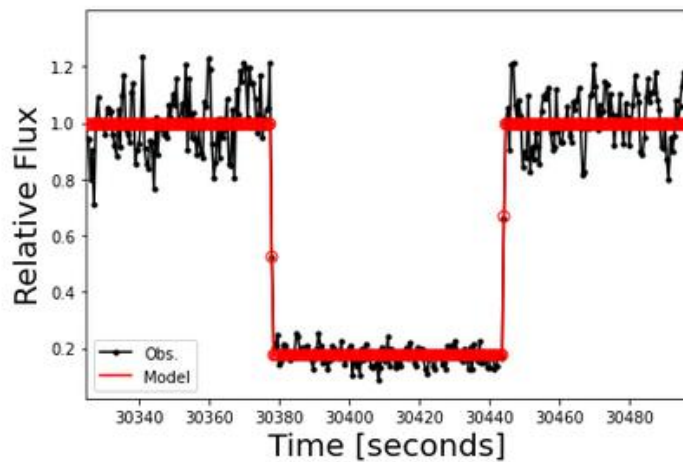


FIGURA 6.5. Curva de luz da ocultação por Umbriel junto com seu modelo já ajustado e seus resultados finais. Observador Jerry Bardecker.

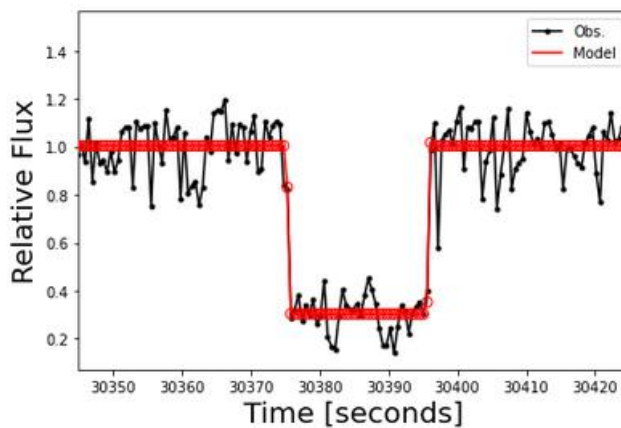


FIGURA 6.6. Curva de luz de Umbriel. Observador Paul Maley.

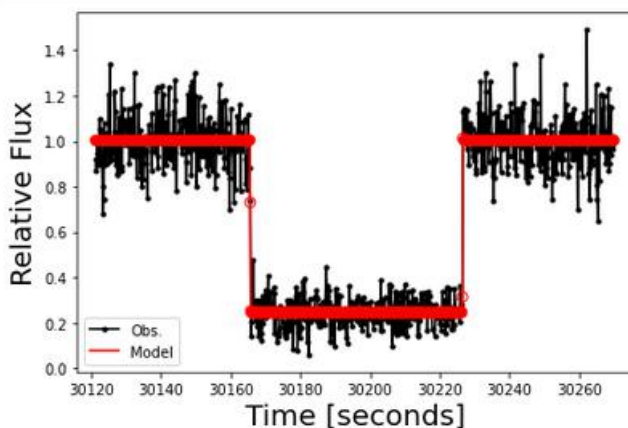


FIGURA 6.7. Curva de luz de Umbriel. Observador George Viscome

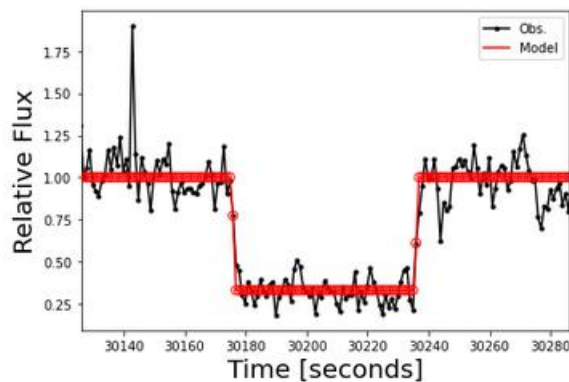


FIGURA 6.8. Curva de luz de Umbriel. Observador David Dunham

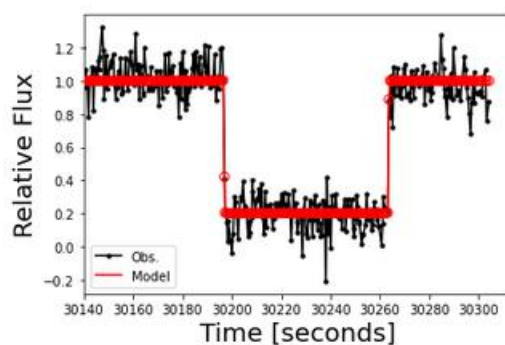


FIGURA 6.9. Curva de luz de Umbriel. Observador Kai Getrost

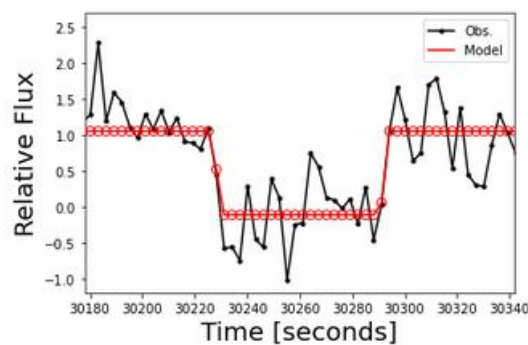


FIGURA 6.10. Curva de luz de Umbriel. Observador Bob Dunford

Inicialmente, adotou-se a abordagem de modelar a forma de Umbriel como um círculo, e em seguida como uma elipse. Para alcançar uma correspondência adequada entre os modelos teóricos e os dados observacionais, os parâmetros que descrevem a forma do satélite, como os semieixos principais, foram ajustados. Dentre outros parâmetros ajustados incluem deslocamentos observados e geocêntricos, raio, semi-eixo aparente, oblicuidade aparente e ângulo de posição. Introduzimos o parâmetro σ_{modelo} para regular a incerteza nos limites do círculo/elipse, considerando a irregularidade do limbo

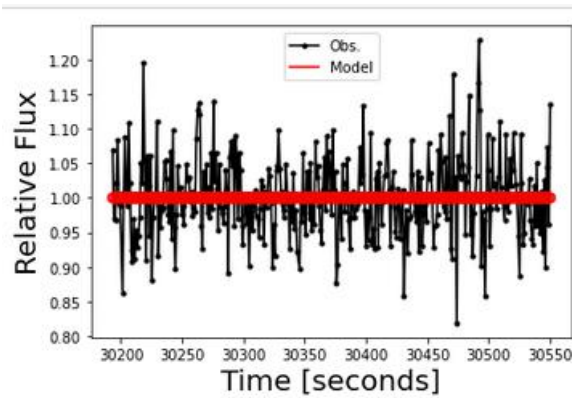


FIGURA 6.11. Curva de luz da ocultação de Umbriel, chamada de 'negativa' pois não observa o evento. Ainda assim, não é o presente caso, essas observações podem ser muito úteis para descobertas interessantes, como a de objetos orbitantes ao corpo ocultador ou a detecção de uma atmosfera.

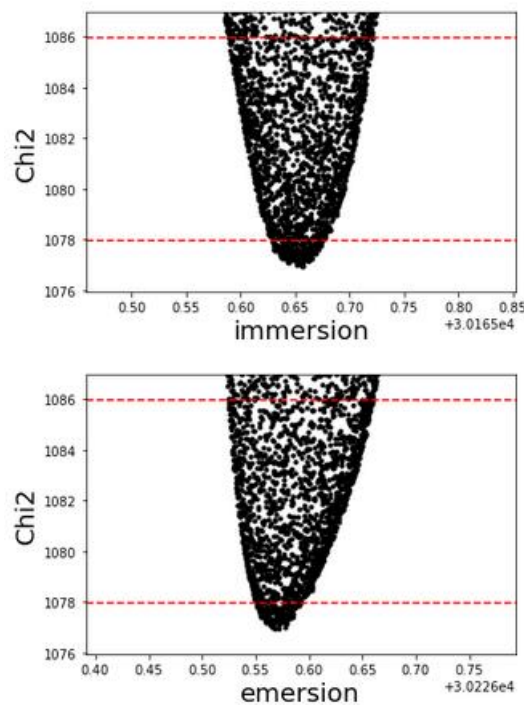


FIGURA 6.12. Cálculo do chi quadrado das medidas de tempo de ingresso e egresso da curva de Viscome. Seu resultado foi de 0.663 qui quadrado mínimo por grau de liberdade.

de Umbriel. O melhor ajuste circular teve $\sigma_{modelo} = 4,2$ km, alcançando o esperado χ^2 , como podemos ver em 4.2. No ajuste elíptico, fixamos o ângulo de posição usando o valor esperado da geometria satélite-Urano. O melhor ajuste elíptico teve $\sigma_{modelo} = 4,3$ km. A Tabela 4.2 mostra os resultados, e a Figura 4.5 exhibe as cordas ajustadas com um limbo circular, visualmente semelhante ao ajuste elíptico. Vale lembrar que tal observação trouxe informações relativas a outra face de Umbriel, diferente daquela observada pela Voyager (Thomas, 1988).

Com as cordas prontas, é possível observar o formato do corpo estudado, visto na figura 6.13.

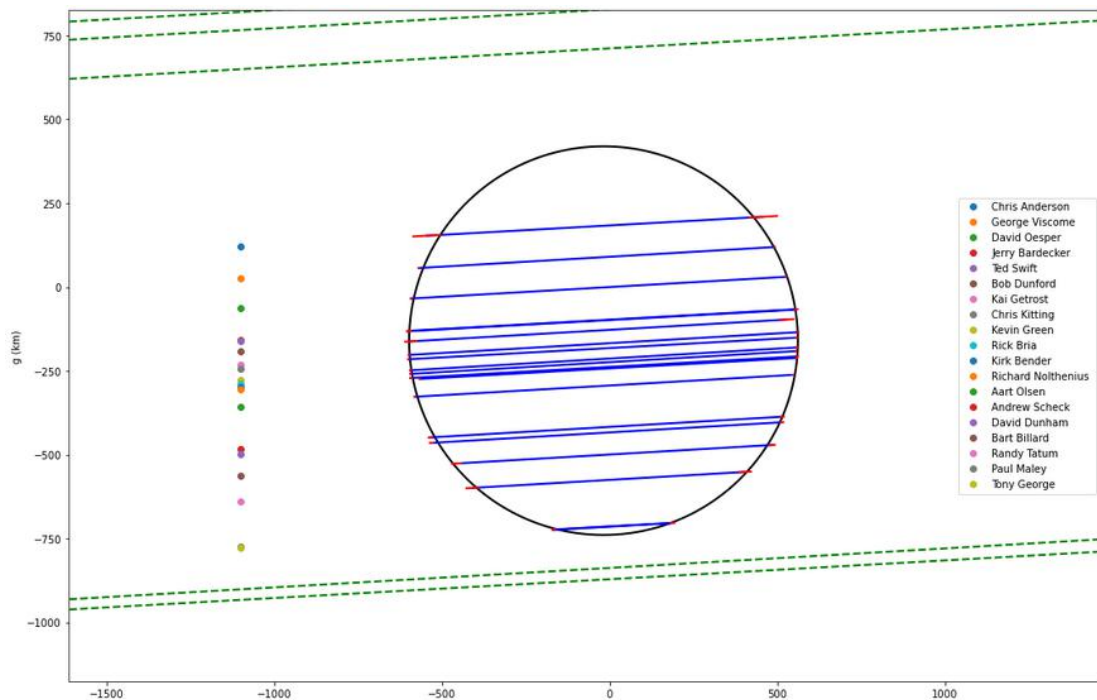


FIGURA 6.13. O conjunto de curvas de luz tratadas, projetadas no plano do céu, resulta na silhueta do corpo estudado, no caso Umbriel. Os valores referentes ao achatamento e ângulo do semieixo maior foram nulos. Já o cálculo de seu raio, em 3-sigma foi de 582.423 ± 0.804 km. O valor de mínimo quadrado por grau de liberdade foi de 18.013 para 19 cordas tratadas. As linhas em verde são referentes às cordas negativas. A figura 4.5 mostra a ilustração final.

Portanto, por meio do PRAIA foram feitas as fotometrias de cada observação, enquanto através do SORA foram obtidos os instantes de entrada e saída de cada corda, projetando-se cada uma no céu, e realizando ajustes de elipse e de círculo para determinar a forma e tamanho. No caso de Umbriel, foram aplicados ajustes que envolviam parâmetros como o polo da elipse e sua excentricidade, embora o resultado confirmasse seu formato circular (parâmetros como excentricidade tendendo a zero, se aproximando muito de um círculo).

A ocultação de Umbriel foi registrada por 24 observadores, sendo 19 observações positivas, e 5 negativas (apenas 2 fotometrias feitas com sucesso). Para o caso de Umbriel, as cordas negativas tratadas não contribuíram para nenhuma informação relevante.

A partir desses dados conseguiu-se obter um raio de 582.4 ± 0.8 km, sendo compatível com a medida da Voyager 584.7 ± 2.8 km, mostrada em (Thomas, 1988), com resultado ainda mais preciso. Vale ressaltar que o presente caso trata-se de outra face de Umbriel, até então nunca medida. A voyager observou a face sul, enquanto agora pudemos amostrar a face norte do satélite.

Capítulo 7

Conclusões e Perspectivas

A Tabela 7.1 resume as características físicas de Umbriel obtidas a partir das observações de ocultação estelar de 21 de setembro de 2020, analisadas nas seções anteriores. Para efeitos de comparação, os resultados da passagem da Voyager II em janeiro de 1986 também são fornecidos.

Umbriel é esperado para ser um elipsoide com semi-eixos menores aproximadamente iguais e semi-eixo maior apontado para Urano. No entanto, não foi possível obter uma solução robusta para o limite elíptico, apesar da precisão quilométrica dos resultados. Isso provavelmente é causado pelas amplitudes positivas/negativas elevadas no nível de 5 km do limbo de Umbriel, já medidas pela Voyager II e discutidas em Assafin et al. (2023). Portanto, adotamos um limite esférico como a solução principal e interpretamos os resultados elípticos como limites superiores para o suposto elipsoide de Umbriel.

O raio da ocultação menor e mais preciso confere a Umbriel uma densidade um pouco maior e mais precisa de $\rho = 1,54 \pm 0,04 \text{ g cm}^{-3}$ do que a determinação anterior de $\rho = 1,39 \pm 0,16 \text{ g cm}^{-3}$ por Taylor (1998). O albedo geométrico é compatível com o valor 0,258 fornecido na Tabela VII de Karkoschka (2001), $p_v = 0.26 \pm 0.01$.

Analisando imagens da Voyager II adquiridas durante sua visita ao sistema em janeiro de 1986, Thomas (1988) não pôde obter tamanhos de eixos para Umbriel, Titania ou Oberon. O ângulo de aspecto do Sol iluminante em relação ao polo sul visível do sistema era aproximadamente 8° , e um raio médio de $584,7 \pm 2,8 \text{ km}$ foi obtido para Umbriel. No momento da ocultação, o ângulo de aspecto do polo norte visível para os observadores da ocultação era cerca de 38° (Tabela 4.1), e o limite circular ajustado fornece um raio um pouco menor e mais preciso de $582,4 \pm 0,8 \text{ km}$.

Limites superiores derivados da ocultação para os verdadeiros semi-eixos de um suposto elipsoide de Umbriel resultam em um raio equivalente de $583,6 \pm 2,2 \text{ km}$. A

TABELA 7.1. Características físicas e astrometria de Umbriel a partir da ocultação estelar de 21 de setembro de 2020. Resultados da Voyager II também estão listados para comparação.

Características físicas de Umbriel a partir da ocultação	
Raio	$R = 582,4 \pm 0,8$ km
Parâmetro de Limbo	$\sigma_{modelo} = 4,2$ km
Densidade (esfera)	$\rho = 1,54 \pm 0,04$ g cm ⁻³
Gravidade superficial	$0,251 \pm 0,006$ m s ⁻²
Velocidade de escape	$0,541 \pm 0,006$ km s ⁻¹
Albedo geométrico (esfera)	$p_V = 0,26 \pm 0,01$
Ângulo de aspecto	$\zeta = 38^\circ 16' 24''.82$ (polo norte)
Atmosfera de CO ₂ isotérmica a $T = 70$ K	pressão de superfície = 13 – 72 nbar (limites superiores de 1-3 σ)
Limites superiores para um possível elipsoide de Umbriel a partir da ocultação	
Semi-eixo maior real	$a = 584,9 \pm 3,8$ km
Semi-eixos menores reais	$b = c = 582,3 \pm 0,6$ km
Achatamento real	$\epsilon = 0,004 \pm 0,008$
Raio equivalente real ⁽¹⁾	$R_{eq} = 583,6 \pm 2,2$ km
Dados de astrometria da ocultação	
Deslocamentos da efeméride ⁽²⁾ (mas)	$\Delta\alpha \cos\delta = -1,7 \pm 0,1$ mas $\Delta\delta = -12,3 \pm 0,2$ mas
Deslocamentos da efeméride ⁽²⁾ (km)	$\Delta\alpha \cos\delta = -23,7 \pm 0,8$ km $\Delta\delta = -169,4 \pm 1,9$ km
Geocêntrico ICRS posição na Epoch	$\alpha = 02^h 30^m 28.^s84556 \pm 0,1$ mas $\delta = 14^\circ 19' 36''.5836 \pm 0,2$ mas
Epoch de referência da ocultação	21 de setembro de 2020, 08:24:36.000 UTC
Observações da Voyager II em 1986	
Raio (Voyager II, 1986)	$R = 584,7 \pm 2,8$ km (Thomas, 1988)
Topografia de Limbo (Voyager II, 1986)	$\pm 5,0$ km (Fig. 3 em Thomas 1988)
Ângulo de aspecto com o Sol ⁽³⁾	$\zeta = 8^\circ$ (polo sul)

Notas. (1) Para um elipsoide com semi-eixo maior real a e achatamento real ϵ com semi-eixos menores $b = c$, o raio equivalente real R_{eq} corresponde ao raio de um círculo com a mesma área da borda da elipse para uma vista de canto do elipsoide, ou seja, $R_{eq} = a\sqrt{1 - \epsilon}$. (2) Deslocamentos do efêmero no sentido "Ocultação menos DE435/URA111". (3) Mais do que a espaçonave, o ângulo de aspecto com o Sol indica a superfície iluminada de Umbriel, que poderia ser realmente analisada nas imagens da Voyager II. Referência: Assafin et al. (2023).

diferença em relação ao raio da Voyager II - obtido quando o limbo completo do equador da lua estava acessível a partir do sul - é de $1,1 \pm 3,6$ km, com uma boa concordância dentro das margens de erro. Usando a solução esférica mais precisa resulta em uma diferença de raio "ocultação menos Voyager II" de $-2,3 \pm 2,9$ km - ainda não uma diferença significativa, com um limite superior de 1σ correspondente de $|R_{occ} - R_{V2}| \leq 5,2$ km.

Se a diferença de raio for devida ao efeito de encolhimento de uma atmosfera de CO₂ tênue a $T = 70$ K, um limite superior de 1σ de 5,2 km corresponde a uma pressão de superfície de menos de 150 nbar. Um método muito mais sensível para detectar

uma atmosfera vem da análise de curvas de luz de alta razão sinal-ruído (Seção 6.4.2 de Assafin et al. (2023)). Usando a curva de Tony George, obtemos estimativas mais precisas para a pressão de superfície de uma atmosfera de CO₂ a $T = 70$ K: $13 - 72$ nbar para limites superiores de $1-3\sigma$.

Um parâmetro de limite (σ_{modelo}) de 4,2 km foi obtido para o ajuste do limbo circular (4,3 km para o limbo elíptico) para um ângulo de aspecto de 38° com o polo norte. Isso está em notável concordância com as variações do limbo de ± 5 km relatadas por Thomas (1988) a partir da análise das melhores imagens da Voyager II, tiradas em um ângulo de aspecto distinto - próximo ao polo sul. Um processamento de imagem aprimorado, incluindo técnicas de fotoclinometria, tem sido recentemente aplicado para melhorar a resolução das imagens da Voyager II (Schenk & Moore, 2020). Numerosas características de relevo individuais (principalmente crateras) espalhadas por todo o hemisfério sul puderam finalmente ter seus diâmetros, alturas e profundidades medidos, confirmando a forte variação do limbo com valores muito consistentes para nosso parâmetro de limite de 4,2 km ajustado. Tudo isso indica que ambos os hemisférios de Umbriel, o sul e o norte, compartilham uma superfície muito irregular com a mesma escala de 4 km em termos de profundidade/altura.

Referências Bibliográficas

- Anders, F., Khalatyan, A., Chiappini, C., et al. 2019, *Astron. Astrophys.*, 628, A94
- Assafin, M. 2023a, Differential aperture photometry and digital coronagraphy with PRAIA, *Planetary & Space Science* (accepted)", doi: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105816>
- Assafin, M. 2023b, Astrometry with PRAIA, *Planetary & Space Science*, 238, 105801
- Assafin, M., Martins, R., Camargo, J., et al. 2011, 85
- Assafin, M., Vieira-Martins, R., Braga-Ribas, F., et al. 2009, *Astron. J.*, 137, 4046
- Assafin, M., Santos-Filho, S., Morgado, B. E., et al. 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 526, 6193, doi: [10.1093/mnras/stad3093](https://doi.org/10.1093/mnras/stad3093)
- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., et al. 2010, *A&A*, 515, A32, doi: [10.1051/0004-6361/200913690](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913690)
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2014, *Nature*, 508, 72, doi: [10.1038/nature13155](https://doi.org/10.1038/nature13155)
- Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., & Morbidelli, A. 2005, *Nature*, 435, 466
- Gomes, R. d. S. 2009, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 104, 39
- Gomes-Júnior, A. R., Morgado, B. E., Benedetti-Rossi, G., et al. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511, 1167, doi: [10.1093/mnras/stac032](https://doi.org/10.1093/mnras/stac032)
- Gomes-Júnior, A. R., Giacchini, B. L., Braga-Ribas, F., et al. 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451, 2295, doi: [10.1093/mnras/stv1081](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1081)
- Gomes-Júnior, A. R., Morgado, B. E., Benedetti-Rossi, G., et al. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511, 1167, doi: [10.1093/mnras/stac032](https://doi.org/10.1093/mnras/stac032)
- Howell, S. B. 1989, *PASP*, 101, 616, doi: [10.1086/132477](https://doi.org/10.1086/132477)
- Jewitt, D., & Luu, J. 1993, *Nature*, 362, 730

- Karkoschka, E. 2001, *Icarus*, 151, 51, doi: 10.1006/icar.2001.6596
- Keane, J. T., Porter, S. B., Beyer, R. A., et al. 2022, *J. Geophys. Res. Planets*, 127
- Kervella, P., & Fouqué, P. 2008, *Astronomy and Astrophysics*, 491, 855–858, doi: 10.1051/0004-6361:200810317
- Kovács, G., Zucker, S., & Mazeh, T. 2002, *A&A*, 391, 369, doi: 10.1051/0004-6361:20020802
- Mighell, K. J. 1999, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 172, *Astronomical Data Analysis Software and Systems VIII*, ed. D. M. Mehringer, R. L. Plante, & D. A. Roberts, 317
- Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., & Gomes, R. 2005, *Nature*, 435, 462, doi: 10.1038/nature03540
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., & Morbidelli, A. 2013, *Astrophys. J.*, 768, 45
- Newberry, M. V. 1991, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 103, 122
- Press, W. H., T. S. A. V. W. T. F. B. P. 1982, *PASP*
- Roques, F., Moncuquet, M., & Sicardy, B. 1987, *AJ*, 93, 1549, doi: 10.1086/114438
- Schenk, P. M., & Moore, J. M. 2020, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378, 20200102, doi: 10.1098/rsta.2020.0102
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. 2011, *Nature*, 478, 493, doi: 10.1038/nature10550
- Sicardy, B., Talbot, J., Meza, E., et al. 2016, *The Astrophysical Journal Letters*, 819, L38, doi: 10.3847/2041-8205/819/2/L38
- Stern, S. A., Bagenal, F., Ennico, K., et al. 2015, *Science*, 350, doi: 10.1126/science.aad1815
- Stetson, P. B. 1987, *PASP*, 99, 191, doi: 10.1086/131977
- Taylor, D. B. 1998, *A&A*, 330, 362
- Thomas, P. 1988, *Icarus*, 73, 427, doi: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90054-1](https://doi.org/10.1016/0019-1035(88)90054-1)
- Tody, D. 1993, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 52, *Astronomical Data Analysis Software and Systems II*, ed. R. J. Hanisch, R. J. V. Brissenden, & J. Barnes, 173

van Belle, G. T. 1999, Publ. Astron. Soc. Pac., 111, 1515

Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., et al. 2009, Icarus, 199, 458, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.09.011>