

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

WELLINGTON GOMES FERRANTE

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR DE OCULTAÇÕES ESTELARES:
APLICAÇÃO AO CASO DO POSSÍVEL PLANETA 9**

CURITIBA

2024

WELLINGTON GOMES FERRANTE

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR DE OCULTAÇÕES ESTELARES:
APLICAÇÃO AO CASO DO POSSÍVEL PLANETA 9**

**Development Of A Stellar Occultation Simulator: application to the case of
the possible Planet 9**

Dissertação de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia do Programa de Pós Graduação em Física e Astronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Braga Ribas

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



WELLINGTON GOMES FERRANTE

DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR DE OCULTAÇÕES ESTELARES: APLICAÇÃO AO CASO DO POSSÍVEL PLANETA 9

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Física.

Data de aprovação: 19 de Dezembro de 2024

Dr. Felipe Braga Ribas, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Alexandre Jose Tuoto Silveira Mello, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Bruno Eduardo Morgado, Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (Ufrj)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 19/12/2024.

Dedico este trabalho à minha esposa e filho,
pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Muitos são aqueles que tenho a agradecer, porém não cabe citar individualmente a todos, então peço desculpas aqueles que não estão citados nessas palavras, mas que com toda certeza contribuíram com minha formação e com a produção deste trabalho. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Braga Ribas, pelo voto de confiança, pelas dicas e por todo apoio dado durante toda minha trajetória. Aos meus colegas de curso, por estarem sempre dispostos a ajudar e colaborar. A Coordenação do PPGFA, pela cooperação. E principalmente a minha família, que cresceu durante a elaboração deste trabalho me apoiou em situações complicadas e me incentivou a continuar seguindo em frente. Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram e motivaram a realização desta pesquisa.

RESUMO

Os objetos transnetunianos são corpos do Sistema Solar que possuem o semi-eixo orbital maior que o de Netuno. O estudo desses corpos pode trazer informações sobre a origem e evolução do Sistema Solar. Por exemplo, notou-se nas propriedades orbitais de alguns destes objetos, dentre os mais distantes conhecidos, uma concentração significativa em valores de argumento do periélio. Isso pode ser explicado com a existência de um grande corpo, denominado Planeta 9, ainda desconhecido. Brown e Batygin (2021) determinaram, por meio de simulações numéricas, possíveis órbitas para o planeta. Buscas e análises em dados observacionais foram realizadas na tentativa de detectá-lo, porém nenhuma logrou sucesso até o momento. Supondo que o Planeta 9 venha a ser descoberto no futuro próximo, tornar-se-á importante determinar suas características físicas, para melhor compreender sua origem e sua influência sobre os TNOs. A ocultação estelar é uma técnica observacional que vem sendo utilizada para determinar características de objetos distantes do Sistema Solar, como os TNOs. Ela permite determinar com grande precisão o tamanho, a forma, além de verificar a presença de satélites, anéis ou de atmosfera ao redor do objeto ocultador. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador de ocultações estelares, o qual gera curvas de luz de ocultação realistas, considerando os parâmetros físicos dos objetos envolvidos, bem como dos instrumentos e das condições atmosféricas e os ruídos associados. Tais curvas de luz foram analisadas com o SORA (GOMES-JÚNIOR *et al.*, 2022), uma biblioteca em Python para redução e análise de ocultações estelares, que nos permitiu verificar a influência das principais variáveis envolvidas na construção de curvas de luz de ocultação pelo planeta. Apresenta-se os resultados de simulação de ocultações estelares pelo possível Planeta 9, para as quais foram utilizadas as propriedades físicas e orbitais propostas na literatura.

Palavras-chave: ocultaes estelares; simulador; curva de luz; planeta 9; objetos transnetunianos.

ABSTRACT

Trans-Neptunian objects are bodies in the Solar System that have semi-major orbital axis greater than that of Neptune. The study of these bodies can provide information about the origin and evolution of the Solar System. For example, a significant concentration in the orbital properties of some of these objects, among the most distant known, was noted. This can be explained by the existence of a large body, called Planet 9, which is still unknown. Brown e Batygin (2021) determined, through numerical simulations, possible orbits for the planet. Searches and analyzes of observational data have been carried out in an attempt to detect it, but none have been successful to date. Assuming that Planet 9 is discovered in the near future, it will become important to determine its physical characteristics, to better understand its origin and its influence on TNOs. Stellar occultation is an observational technique that has been used to determine characteristics of distant objects in the Solar System, such as TNOs. It allows you to determine the size and shape with great precision, in addition to checking the presence of satellites, rings or atmosphere around the occulting object. This work presents the development of a stellar occultation simulator, which generates realistic occultation light curves, considering the physical parameters of the involved objects, as well as the instruments and atmospheric conditions and associated noises. Such simulations were analyzed with SORA (GOMES-Júnior *et al.*, 2022), a Python library for reducing and analyzing stellar occultations, which allowed us to verify the influence of the main variables involved in the construction of occultation light curves by the planet. The results of simulations of stellar occultations by the possible Planet 9 are presented, for which the physical and orbital properties proposed in the literature were used.

Keywords: stellar occultation; simulator; light curve; planet 9; trans-neptunian objects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Agrupamento das órbitas dos TNOs utilizados para prever o Planeta 9 .	15
Figura 2 – Ilustração esquemática da geometria de uma ocultação estelar	22
Figura 3 – Exemplo de curva de luz, ocultação pelo centauro Chariklo, com dois anéis e o corpo principal.	23
Figura 4 – Perfil de Haumea obtido a partir de uma ocultação de múltiplas cordas	25
Figura 5 – Mapa de predição para um TNO, apresentando as principais informações para a ocultação	26
Figura 6 – Perfil do corpo MS4 obtido a partir de uma ocultação de múltiplas cordas	27
Figura 7 – Curva de luz obtida em uma ocultação por Caronte e Plutão, sendo a primeira queda referente a Caronte	28
Figura 8 – Ocultação de Quaoar com anéis de diferentes tamanhos (detalhe em b e c)	29
Figura 9 – Ocultação de Tritão, apresentando as características de atmosfera com queda gradual e pico central)	30
Figura 10 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com anéis e um satélite, situação sem ruído	38
Figura 11 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com anéis e um satélite, apenas considerando a Difração de Fresnel	40
Figura 12 – Curva de Luz obtida por uma ocultação captada pelo satélite CHEOPS .	41
Figura 13 – Perfil de turbulência de Roque de los Muchachos Observatory	44
Figura 14 – Simulação contendo apenas o ruído da variação de amplitude como ruído atmosférico	47
Figura 15 – Simulação contendo apenas o ruído da variação de amplitude como ruído atmosférico	47
Figura 16 – Gráfico de uma ocultação simulada para Leleākūhonua e abaixo a curva de luz original	49
Figura 17 – Gráfico de uma ocultação simulada para Leleākūhonua com seeing 1,3	50
Figura 18 – Tabela de correlação com parâmetros usados para simular as curvas de luz	51

Figura 19 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com anéis e um satélite, situação com ruído	52
Figura 20 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com um satélite, situação com ruído	52
Figura 21 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com anéis e um satélite, situação com ruído	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características previstas para o Planeta 9	20
Tabela 2 – Características previstas para o Planeta 9	45
Tabela 3 – Características dos anéis e satélites simulados para o Planeta 9	50
Tabela 4 – Parâmetros utilizados em simulações para o Planeta 9	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ADU	<i>Analog to Digital Unity</i>
BNP	Buraco Negro Primordial
CCD	<i>Charge Coupled Devide</i>
DES	<i>Dark Energy Survey</i>
ETNO	Objeto Trans-Netuniano Extremo
GPS	Sistema de Posicionamento Global
KBO	Objetos do Cinturão de Kuiper
OSSOS	<i>Outher Solar System Origin Survey</i>
P9	Planeta 9
SORA	Software de Redução e Análise de Ocultações Estelares
S/R	Sinal Ruído
SCIDAR	<i>Scintillation Detection and Ranging</i>
SDO	Objeto do Disco Espalhado
SOS	Simulador de Ocultações Estelares
SSS	<i>Single Star SCIDAR</i>
TNO	Objeto Trans-Netuniano

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

a	Semi eixo maior	
r	Raio do Corpo	[km]
d	Distância do Corpo	[km]
m	Magnitude aparente	
p	Albedo	
F	Fluxo luminoso	
K_m	Constante de magnitude	
E	Energia	
n	Número de fótons	
h	Constante de Plank	
c	Velocidade da luz	
A_r	Área	
t	Tempo	
m_r	Magnitude de referência	
F_r	Fluxo luminoso de referência	
m_{total}	Magnitude total	
F_{total}	Fluxo luminoso total	
d_{focal}	Distância focal	
px	Tamanho do pixel	
bin	Binagem	
ep	Escaça de Placa	
P	Período de translação	
G	Constante da gravitação Universal	

M_1	Massa do corpo 1
M_2	Massa do corpo 2
E_{Fresnel}	Escala de Fresnel
$S(z)$	Integral de Fresnel - Seno
$C(z)$	Integral de Fresnel - Cosseno
z	Instante em relação ao ponto de imersão ou emersão
F_{Fresnel}	Fluxo devido a difração de Fresnel
op	Opacidade do corpo
ss	Resultado da parte seno da Integral de Fresnel
cc	Resultado da parte cosseno da Integral de Fresnel
L_0	Escala de comprimento
l_0	Tamanho de escala interno
C_n^2	Constante de estrutura do índice de refração
h	Altura
A	Coeficiente das camadas próximas à superfície
H_A	Altitude de referência para as camadas próximas à superfície
B	Coeficiente das camadas da Troposfera
H_B	Altitude de referência para as camadas da Troposfera
C	Coeficiente do pico de turbulência da Tropopausa
H_C	Altitude de referência para o pico de turbulência da Tropopausa
D	Coeficiente das camadas isoladas
H_D	Altitude de referência das camadas isoladas
w	Largura das camadas isoladas
FWHM	Largura meia altura da gaussiana de distribuição da luz na CCD, também chamado <i>seeing</i>
r_0	Parâmetro de Fried
k	Número de onda

L	Distância de propagação
D_{ia}	Diâmetro do telescópio
T_X	Taxa de elétrons gerados por pixel por segundo
T	Temperatura
K_b	Constante de Boltzman
n_{px}	Número de pixels
t_{exp}	Tempo de exposição
S/N	Sinal Ruído
N_*	Número de fótons provenientes da estrela capturados no CCD
n_B	Número de pixels utilizados para determinar o fundo de céu
N_S	Número de fótons por pixel no céu de fundo
N_D	Número de fótons gerados por ruído térmico
N_R	Número de elétrons por pixel gerados durante a leitura
G_{CCD}	Ganho utilizado na CCD

Letras Gregas

α	Tamanho angular	[arcsec]
λ	Comprimento de onda	
σ_X^2	Variância do logaritmo da Amplitude	
σ_ϕ^2	Variância da fase da onda	
σ_{DARK}	Desvio padrão do ruído térmico da CCD	
σ_f^2	Erro gerado durante a conversão A/D	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	O PLANETA 9	17
2.1	As hipóteses para formação do P9	18
2.2	Características previstas para o planeta	19
2.3	A detecção do P9	20
3	OCULTAÇÕES ESTELARES	22
3.1	Predição de ocultações	24
3.2	Ocultações por satélites	26
3.3	Ocultações por anéis	27
3.4	Ocultações por corpos com atmosfera	29
4	VARIÁVEIS ASSOCIADAS AO REGISTRO DE UMA OCULTAÇÃO ESTELAR	31
4.1	Equipamentos para a aquisição dos dados	31
4.2	Ruídos gerados na captura	32
4.3	Magnitude e número de fótons dos objetos da ocultação	34
5	OCULTAÇÕES ESTELARES	37
5.1	Efeitos geométricos	37
5.1.1	Difração de Fresnel	39
5.1.2	Tamanho da estrela	39
5.2	Efeitos de ruído e perda de fótons	41
5.2.1	A atmosfera terrestre e seus efeitos sobre a luz	41
5.2.2	A modelagem da atmosfera terrestre	42
5.2.2.1	Efeito da variação da amplitude	46
5.2.2.2	Efeito da variação da fase	46
6	SIMULAÇÕES DE OCULTAÇÕES ESTELARES	48
6.1	Simulação de uma ocultação observada	48
6.2	Simulando ocultações pelo P9	49
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56
	ANEXO A ARTIGO PUBLICADO	62

1 INTRODUÇÃO

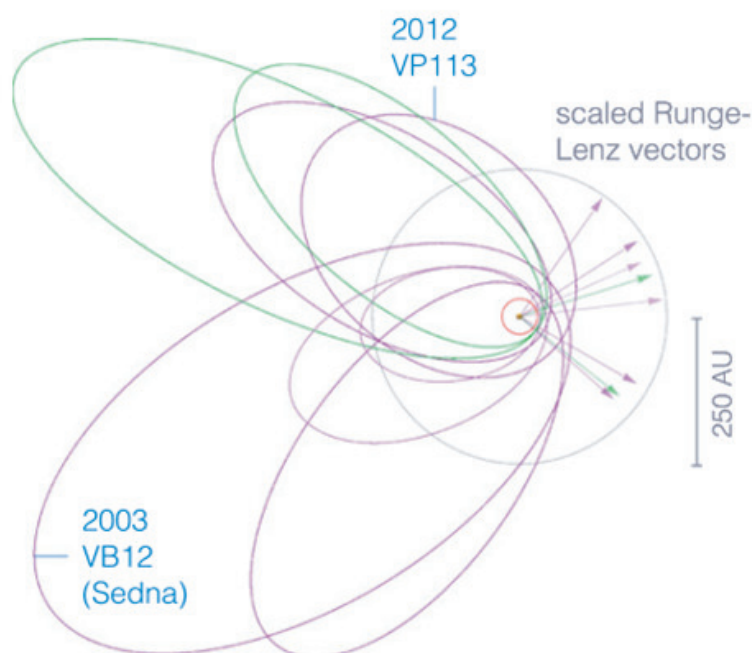
Pequenos corpos do Sistema Solar são relíquias da formação do nosso sistema. O número de objetos conhecidos aumenta constantemente, conforme as técnicas e tecnologias observacionais evoluem (BARUCCI *et al.*, 2008). Em particular, aguarda-se para o futuro próximo a descoberta de milhares de pequenos corpos na região do Sistema Solar Exterior, graças às observações do Observatório Vera Rubin do Legacy Survey of Space and Time (LSST) (PROJECT, 2009). Cada grupo de objetos apresenta informações sobre regiões e épocas diferentes do Sistema Solar, como os Objetos Transnetunianos (TNOs) que trazem mais informações sobre como o sistema se originou. Tais corpos são definidos como aqueles cujas órbitas estão além de Netuno, ou seja, com semi-eixo maior que 30 Unidades Astronômicas (UA). Nessa região, tais corpos tendem a sofrer colisões em menor número e intensidade, se comparados aos corpos mais internos do sistema. Dessa forma possuem uma maior probabilidade de terem mantido informações sobre o Sistema Solar primordial, tornando-se importantes mensageiros para este tipo de estudo (GUILBERT *et al.*, 2009).

Os TNOs são corpos pequenos que estão distantes da Terra, possuindo um longo período orbital, além de possuírem pouco brilho aparente por receberem pouca luz, dificultando sua observação e caracterização (BARUCCI *et al.*, 2008). Existem alguns corpos que se destacam nesse meio, por serem os maiores e por apresentarem algumas características interessantes, como a presença de satélites, anéis (MORGADO *et al.*, 2023) e até mesmo grandes depressões (Rommel, F. L. *et al.*, 2023). A técnica de ocultação estelar, é uma ótima ferramenta para estudo destes corpos ou quaisquer outros no Sistema Solar por não exigir a necessidade de visualização do corpo, apenas da estrela ocultada.

Os TNOs englobam uma grande quantidade de objetos, incluindo planetas anões, formando um grupo de corpos complexos (BARUCCI *et al.*, 2008). Algumas subdivisões são amplamente utilizadas, de acordo com as características orbitais dos corpos, para uma melhor análise e compreensão dos mesmos. Dentre as divisões em classes dinâmicas dos TNOs existem dois grandes grupos, os objetos do Cinturão de Kuiper (KBOs) e os Objetos do Disco Espalhado (SDOs). Os KBOs são corpos com pequena inclinação (próxima da eclíptica), e com distâncias entre 30 e 55 UA, incluindo grupos menores ressoantes com Netuno, como os Plutinos. O planeta anão Plutão se destaca como o membro mais estudado desse subgrupo (GLADMAN; MARSDEN; VANLAERHOVEN, 2008). Já os SDOs são corpos que possuem órbitas mais excêntricas, distantes (com valores de periélio superiores a 50 UA) e inclinadas, além de não serem ressonantes e não cruzarem órbitas planetárias, tendo como principal exemplo o planeta anão (136199) Éris seu maior membro conhecido (SHANKMAN *et al.*, 2016). Descoberto em 2003, (90377) Sedna é um TNO que apresentou algumas características orbitais extremas, como um semi-eixo maior próximo de 500 UA com um periélio de 76 UA, inaugurando uma nova classe de objetos conhecidos com TNOs Extremos (ETNOs), levantando dúvidas sobre sua origem e evolução orbital.

Diante da descoberta de novos TNOs similares a Sedna, detectou-se um agrupamento em relação ao argumento do periélio destes corpos. Este agrupamento pode indicar a presença de um corpo mais massivo nas proximidades, responsável por gerar esse agrupamento (BATYGIN; BROWN, 2016). Algumas características, físicas e orbitais, previstas para esse corpo foram apresentadas por Batygin e Brown (2016) indicando um corpo grande e massivo podendo ser considerado um novo planeta no Sistema Solar, recebendo a denominação de Planeta 9 (P9). A Figura 1 ilustra o agrupamento dos TNOs utilizado para inferência do P9.

Figura 1 – Agrupamento das órbitas dos TNOs utilizados para prever o Planeta 9



Fonte: Batygin e Brown (2016).

De acordo com a primeira previsão o P9 possuiria cerca de 10 massas terrestres, com semieixo maior de cerca de 700 UA e uma excentricidade de 0.6 (BATYGIN; BROWN, 2016). Com o passar dos anos, novas simulações e análises sobre os corpos envolvidos foram realizadas refinando os parâmetros, obtendo limites mais precisos. Resultando em um corpo com massa entre 4,9 e 8,4 massas terrestres, com semi eixo maior (a) entre 300 e 520 UA, inclinação orbital de 11° a 21° e periélio entre 240 e 385 UA (BROWN; BATYGIN, 2021).

Em outros momentos durante a história já foram levantadas hipóteses similares da existência de novos corpos, na tentativa de explicar características orbitais em alguns objetos, sendo os exemplos mais conhecidos a descoberta de Netuno, com base em estudos da órbita de Urano, e a descoberta de Plutão com análises da órbita de Netuno e a proposta fracassada da existência Vulcano para tentar explicar a precessão do periélio de Mercúrio (BATYGIN *et al.*, 2019).

O estudo de corpos distantes é dificultado principalmente pela complexidade em determinar suas órbitas, pois são objetos difíceis de serem detectados por telescópios devido à sua alta magnitude. Frequentemente, esses corpos passam despercebidos e são confundidos com

estrelas, em parte por se moverem a baixas velocidades. No entanto, uma vez detectados, é essencial refinar a determinação de seus parâmetros orbitais e tamanho. Uma das técnicas mais eficazes para determinação de tamanho e forma é a ocultação estelar (PRIALNIK; BARUCCI; YOUNG, 2020).

A ocultação estelar é um fenômeno que ocorre quando a luz de uma estrela é temporariamente bloqueada pela passagem de um corpo celeste, como um asteroide, com duração de alguns segundos. Durante o evento, o observador ao registrar o fluxo da estrela ao longo do tempo. Quando passa pela linha de visada entre a estrela e o observador, o fluxo da estrela é bloqueado, resultando numa redução do fluxo luminoso total. Após um intervalo de tempo, quando o objeto terminar de atravessar a linha de visada, o fluxo de luz retorna ao patamar anterior, indicando o final da ocultação. A partir do registro desta variação de fluxo, é possível determinar os instantes de início e término da ocultação, permitindo a determinação do perfil do objeto, conhecido como corda (MARGOTI, 2024). Estas medidas podem ter precisão da ordem de quilômetros. O evento ainda pode mostrar a existência de possíveis atmosferas, topografia e anéis e satélites ao redor do corpo (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014) (Rommel, F. L. *et al.*, 2023).

Esses eventos de ocultação podem ser preditos com antecedência se a efeméride do corpo for conhecida. A posição do objeto é comparada a um catálogo estelar, na busca de uma coincidência entre a efeméride e a posição de uma estrela, indicando uma possível ocultação. A partir da predição é criada uma campanha de observação, convocando observadores nas regiões pela qual a sombra do corpo irá passar, de modo que possam ser obtidas a maior quantidade de registro de observações em diferentes locais, possibilitando uma definição mais precisa das características do corpo. Para a elaboração das predições utiliza-se, atualmente, o catálogo estelar gerado pela missão Gaia, com precisão menor que 1 milissegundo de arco (mas) para a posição das estrelas (PEREIRA, 2020).

Idealizando uma futura confirmação da existência do Planeta 9, será necessário o estudo mais aprofundado de suas características físicas, que pode ser realizado por meio da técnica de ocultação estelar. Pensando nisso, foi desenvolvido um simulador para verificar e estimar quais seriam os principais parâmetros de uma futura ocultação estelar do P9. Além disso, foram criadas algumas ferramentas adicionais para a simulação de ocultações por anéis e satélites ao redor do corpo.

Neste trabalho são descritas as etapas de uma ocultação estelar e o modo pelo qual elas foram incluídas no simulador. Também são apresentadas algumas simulações realizadas para o P9, uma discussão acerca dos parâmetros mais relevantes para a sua detecção via ocultação estelar, e para possíveis planejamentos de predições e organização das campanhas de observação.

2 O PLANETA 9

A descoberta de objetos do cinturão de Kuiper similares a Sedna, com semi-eixo maior superior a 150 UA (chamados de sednoides), que não apresentam interações gravitacionais relevantes com Netuno, e apresentam um agrupamento orbital, levou a proposição da existência de um corpo responsável por perturbações gravitacionais na região. Com a descoberta de Sedna (BROWN; TRUJILLO; RABINOWITZ, 2004) e suas propriedades orbitais extremas, buscou-se explicações para a origem da sua órbita. Uma das hipóteses levantadas, levando em conta a descoberta de outros sednoides com um agrupamento orbital, sugere a existência de um corpo perturbador externo à sua órbita. Outra hipótese seria um evento passado, que resultou na configuração orbital atual, como, por exemplo, a passagem de estrelas nas proximidades do Sistema Solar durante sua origem (MADIGAN; MCCOURT, 2016).

Ao examinar a distribuição de objetos na região, Gomes, Soares e Brasser (2015) notaram que a existência de um planeta com cerca de 10 massas terrestres seria capaz de explicar o regime orbital e sua distribuição na região. O planeta deveria estar a uma distância aproximada de 1.000 UA. Simultaneamente Trujillo e Sheppard (2014), após analisarem alguns KBOs com semi-eixo maior que 150 UA, e verificarem a existência de um agrupamento em relação ao argumento do periélio, que poderia ser causado por interações, do tipo Kozai, com um planeta massivo tornando-o o responsável pela organização das órbitas no local. Outra possibilidade, é que tais corpos poderiam ter interagido com um objeto no passado, deixando como marca órbitas excêntricas e distantes. Porém, diferentemente de objetos da nuvem externa de Oort ($a > 1.500$ UA) que têm suas órbitas modificadas por objetos externos do Sistema Solar, os sednoides estão muito mais próximos do Sol, necessitando que um objeto externo passasse muito próximo ao Sistema Solar interno.

A maior parte dos objetos nessa região, como 2013 FS28, possuem $a > 150$ UA e não fazem parte do agrupamento em relação ao argumento do periélio, tem suas órbitas explicadas por apresentarem aproximação com Netuno causando modificações orbitais ao longo dos anos (SHEPPARD; TRUJILLO, 2016). Já outros objetos similares a Sedna possuem um mesmo plano orbital, com inclinação de cerca de 22 graus em relação à eclíptica, e possuem um agrupamento em relação a longitude do periélio. Suas órbitas e o agrupamento não podem ser explicados apenas pela existência dos corpos conhecidos, sendo necessária a existência de um corpo mais massivo na região para tornar as órbitas estáveis. Por meio de simulações foram determinados parâmetros orbitais para esse possível corpo, como sua massa e distância do Sol, se mostrando mais massivo e próximo do que era esperado (BROWN; BATYGIN, 2016).

Os estudos iniciais acerca do P9 foram realizados na tentativa de identificar se o agrupamentos dos KBOs são estatisticamente reais ou apenas produto de viés observacional. Brown (2017) e Brown e Batygin (2019) determinaram que existe apenas 0.2% de chance das órbitas serem apenas um viés observacional de uma distribuição uniforme dos objetos, reforçando a necessidade do P9.

Levantamentos observacionais, ou surveys, como DES (*Dark Energy Survey*) e OSSOS (*Outer Solar System Origins*), possuem uma direção preferencial para obtenção dos dados, e ocasionalmente, em meio a observação, são detectados novos corpos do Sistema Solar. Alguns dos objetos detectados por esses surveys fizeram parte dos estudos de Brown (2017) e Brown e Batygin (2019) indicando que o agrupamento possui significância estatística e não representa uma distribuição uniforme, portanto a existência do P9 continua como a hipótese mais viável para explicar o comportamento destes corpos da região mais afastada do Sistema Solar (BROWN; BATYGIN, 2021).

A combinação de parâmetros orbitais dos corpos torna-se a principal evidência para a proposta da existência do P9, mas não é suficiente para ser aceito por toda comunidade, Madigan e McCourt (2016) argumentam que tal agrupamento pode ter sido gerado por encontro com uma estrela próxima no começo do Sistema Solar, ou devido a instabilidades gravitacionais sofridas por pequenos corpos ao longo de 1 a 4 Giga anos, modificando a inclinação e gerando o agrupamento visto atualmente. Shankman *et al.* (2016) demonstram que *surveys* como o OSSOS, apresentam um viés não intuitivo na identificação dos TNOs, gerando agrupamentos orbitais aparentes, e Bannister *et al.* (2018) demonstram que os elementos angulares dos TNOs distantes estão consistentes com uma distribuição uniforme.

2.1 As hipóteses para formação do P9

Supondo a existência do P9, novas questões são levantadas, como sobre a formação do corpo. A primeira hipótese, levantada por Bromley e Kenyon (2016), é a do surgimento do planeta em uma região mais interna do Sistema Solar, e após a aproximação com Júpiter ou Saturno foi levado para sua atual localização, a queda da excentricidade poderia ter sido gerada pelo arrasto dos restos da nebulosa solar ou devido a interação com uma estrela próxima.

Uma segunda hipótese é a de captura do planeta, na qual ele pode ter sido formado em outro sistema estelar, sendo “roubado” pelo Sol, por uma interação próxima (MUSTILL; RAYMOND; DAVIES, 2016), ou se desprendendo do seu sistema de origem por algum mecanismo, passando a vagar pela galáxia até se aproximar do Sistema Solar e ser capturado em uma região muito distante, passando por interações dinâmicas até atingir sua atual configuração (PARKER; LICHTENBERG; QUANZ, 2017).

Outra sugestão é a da formação *in situ*, na qual o planeta foi gerado no atual local e evoluiu até atingir suas características atuais (KENYON; BROMLEY, 2016).

Diferente das demais hipóteses, Scholtz e Unwin (2020) apresenta a possibilidade do P9 não ser um planeta rochoso ou gasoso, e sim um Buraco Negro Primordial (BNP). Tais corpos são hipotéticos e podem possuir a massa similar a de planetas, sua formação seria por um processo diferente dos demais buracos negros, tendo sido formados durante o Big-Bang e eles existiriam espalhados pelo Universo. Durante algum momento um deles poderia ter sido capturado pelo Sol, passando a orbitar na região dos ETNOs gerando o agrupamento observado

(SCHOLTZ; UNWIN, 2020), tal hipótese não apresenta nenhuma divergência em relação às propostas do P9, incluindo as modelagem computacionais de Brown e Batygin (2021), visto que os estudos têm como base a massa do corpo, desse modo o BNP poderia ter a massa calculada e gerar os mesmo efeitos gravitacionais nos ETNOs. A principal diferença seria quanto às características físicas do corpo, já que um BPN possui tamanho muito diferentes dos demais corpos que ocupam a região dos TNOs, que foram utilizados como base para a caracterização feita por Batygin *et al.* (2019).

2.2 Características previstas para o planeta

Desde a proposta da existência do P9, foram realizados simulações numéricas para determinar os parâmetros orbitais do corpo, sendo umas das primeiras mais detalhadas de Brown e Batygin (2016), na qual apresentam alguns valores limite para massa, diâmetro e parâmetros orbitais, indicando que o corpo é o responsável pelo agrupamento orbital dos KBOs. Neste trabalho os autores determinaram limites de 5 a 20 massas terrestres, semi-eixo maior entre 380 e 980 UA e periélio entre 150 e 350 UA. Tais simulações consideram o Sol e os 4 planetas gigantes, iniciando com o corpo proposto em diversas regiões, verificando sua estabilidade e se ao final o agrupamento dos ETNOs se formava.

Toth, I. (2016) estimou a densidade, magnitude e composição do planeta, utilizando os dados existentes até o momento, incluindo a possibilidade de atmosfera no corpo. Em sua pesquisa utilizou densidades variáveis de 1.270 kg/m^3 a 1.680 kg/m^3 , considerando o corpo majoritariamente composto de gelo e rocha com uma camada atmosférica, gerando magnitudes V entre 19,17 e 25,52, além de definir o período de rotação entre 6 h e 13 h. Estimou ainda que, se houver um satélite de grandes proporções ao redor do P9 (de forma similar ao sistema Plutão e Caronte) sua magnitude combinada poderia ser 0,25 maior, em comparação ao planeta isolado.

Malhotra, Kathryn e Wang (2016) analisaram diretamente os KBOs, na tentativa de determinar a órbita do P9, colocando os corpos com agrupamento como objetos ressonantes do P9, sem obter valores finais relevantes, Bailey, Brown e Batygin (2018) mostraram que esse método não é viável para determinar características orbitais para o P9. Millholland e Laughlin (2017) utilizaram métricas simples para comparar simulações e observações, permitindo uma melhora nas simulações. Com base nisso Batygin *et al.* (2019) desenvolveram uma série de métricas para comparar simulações e obter o melhores elementos orbitais para o P9 até a data, além de realizarem uma análise e classificação dos KBOs entre estáveis, meta estáveis e instáveis, facilitando futuros estudos sobre esses corpos.

Por melhor que sejam os modelos observacionais e as métricas, torna-se difícil justificar estatisticamente os resultados, podendo levar a falsas conclusões. Além disso, nenhum dos métodos anteriores tentou levar em conta o viés observacional dos dados, com isso em mente, Brown e Batygin (2021) apresentaram uma primeira avaliação estatística rigorosa dos

elementos orbitais do P9, levando em conta o viés observacional dos corpos, e desenvolvendo um modelo que compare as observações e simulações, possibilitando o cálculo da função densidade de probabilidade para os elementos orbitais e suas correlações, gerando ao final um mapa do céu, com as probabilidades relativas para auxiliar na busca pelo P9.

Na busca pelo P9, houveram tentativas de detecção indireta do planeta. Entre elas pode-se citar a análise de dados orbitais da sonda Cassini (HOLMAN; PAYNE, 2016), estudo da possibilidade do envio de sondas próximas a velocidade da luz (LAWRENCE; ROGOSZINSKI, 2020), detecção da radiação Hawking com uma sonda, no caso de um BNP (ARBHEY; AUFFINGER; SILK, 2021), entre outros. Porém nenhum obteve um dado significativo para auxiliar na detecção do corpo. O estudo mais recente, acerca dos parâmetros orbitais do P9 é de Brown e Batygin (2021) desenvolvido a partir de inúmeras simulações numéricas e análises estatísticas apresentando uma distribuição de probabilidade para diferentes características físicas resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características previstas para o Planeta 9

Característica	Mínimo	Mais provável	Máximo
Massa (Em massas terrestres)	4,9	6,2	27
Semi eixo maior (UA)	300	380	520
Inclinação	11°	16°	21°
Periélio (UA)	240	300	385
Diâmetro (km)*	18.432	19.548	20.665
Magnitude Aparente**	19,17	-	25,52

Fonte: *Brown e Batygin (2016); **Toth, I. (2016).

2.3 A detecção do P9

O principal meio para comprovar a existência do P9 é por meio de um imageamento direto. Alguns trabalhos buscaram imagens e registros de *Surveys*, como do DES e do OSSOS, que já apresentavam o registro e detecção de 316 TNOs como apresentado por Bernardinelli *et al.* (2020). Porém nenhum dos objetos detectados apresentaram características similares às previstas para o P9.

Sheppard e Trujillo (2016) realizaram estudos similares com valores de 330 a 700 segundos de exposição, na busca por Objetos da Nuvem de Oort, novamente sem indicar sinais de um objeto similar ao P9. Rice e Laughlin (2019) propuseram a construção de uma rede de telescópios para detecção de ocultações estelares dos troianos de Júpiter, e com base no monitoramento da órbita desses corpos seria possível a detecção do P9 via efeitos de maré sobre os troianos.

Outra sugestão é a detecção é via lente gravitacional, proposto por Schneider (2017), na qual caso o planeta esteja nas proximidades de uma estrela, a luz seria desviada. A deflexão poderia ser de 0,1 milissegundo de arco. Outra proposta existente no mesmo trabalho é a

utilização de ocultações estelares, detectadas aleatoriamente, na qual o evento terá uma duração de no mínimo 1.300 segundos, e, portanto, poderia ser detectado por surveys. A utilização de ocultações estelares para determinação das características do P9 possui grande potencial, sendo o grande motivador para a elaboração deste trabalho.

3 OCULTAÇÕES ESTELARES

Ocultações estelares ocorrem quando um corpo do Sistema Solar cruza a linha de visada entre uma estrela e um observador, bloqueando temporariamente a luz de uma estrela. Durante o evento, o observador registra a variação do fluxo luminoso da estrela, que diminui no momento da ocultação e retorna à intensidade normal assim que o corpo deixa a linha de visada. A duração da ocultação depende fatores como o tamanho do corpo e sua velocidade relativa em relação à Terra (MARGOTI, 2024). A Figura 2 apresenta uma representação esquemática de uma ocultação estelar e a Figura 3 ilustra uma curva de luz, resultado da plotagem dos fluxos e instantes de uma ocultação estelar.

Figura 2 – Ilustração esquemática da geometria de uma ocultação estelar



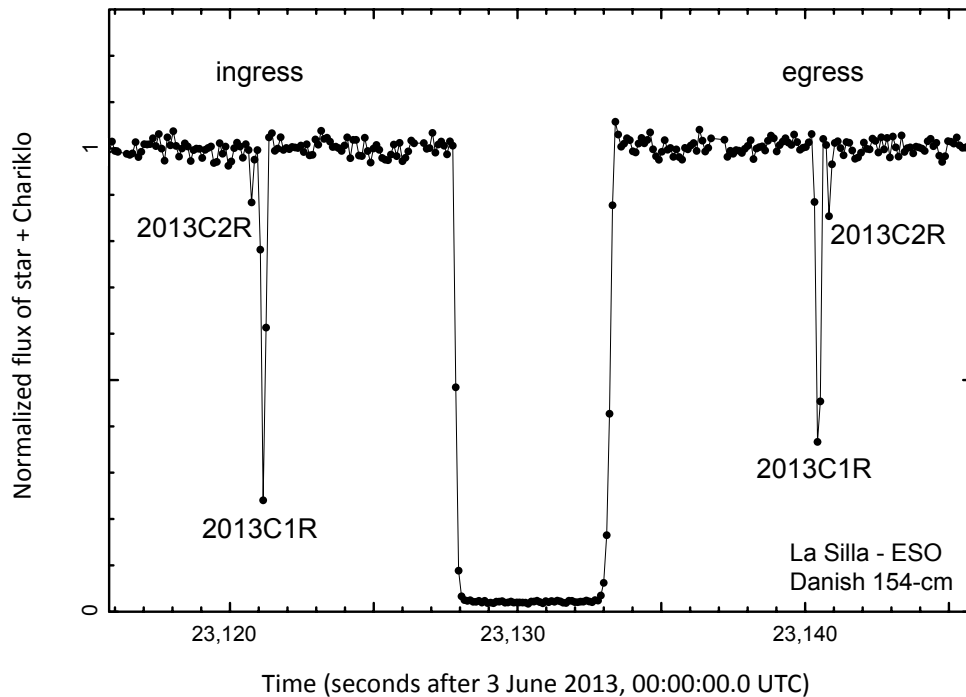
Fonte: Pereira (2020).

Para determinar a velocidade relativa do evento é necessário conhecer a distância na qual o corpo se encontra da Terra, e a partir disso pode-se realizar uma aproximação, a partir da 3ª Lei de Kepler, determinando a velocidade aproximada do corpo no instante em que se encontra a essa distância. Para isso algumas considerações são feitas, como considerar uma órbita circular ou com baixa excentricidade, e que apenas a massa do Sol é relevante para a atração gravitacional, resultando em Equação 1.

$$P^2 = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot (M1 + M2)} \cdot a^3 \quad (1)$$

Onde P é o período orbital do corpo, $M1$ a massa de um dos corpos, $M2$ a massa do segundo corpo e a a distância média entre os corpos.

Figura 3 – Exemplo de curva de luz, ocultação pelo centauro Chariklo, com dois anéis e o corpo principal.



Fonte: Braga-Ribas *et al.* (2014).

Com o valor do período determina-se a velocidade orbital e dependendo a sua posição, em relação à Terra, é realizado um acréscimo ou redução da velocidade da Terra com a do corpo, determinando enfim a velocidade relativa, também denominada velocidade da sombra ou velocidade da ocultação. A velocidade relativa pode ser facilmente calculada quando a órbita do objeto é determinada, o que não é o caso neste estudo, por isso usamos as aproximações citadas acima.

Em uma ocultação as estrelas são praticamente pontuais, em termos angulares, devido sua grande distância. Desse modo, seus raios luminosos chegam paralelos na Terra, assim, ao serem bloqueados pelo corpo durante a ocultação, temos a projeção da sombra do objeto sobre o planeta Terra, a qual terá a forma e o tamanho do corpo preservados (ROMMEL, 2018). Portanto, ao medirmos as dimensões da sombra, estamos indiretamente determinando as dimensões do corpo. Esta técnica permite medidas com precisão da ordem do quilômetro.

Para realizar a predição de ocultações é necessário determinar o tamanho angular do corpo, bem como da estrela, para verificar se haverá sobreposição de ambos no plano do céu, para um dado observador. A determinação do tamanho angular do corpo pode ser realizada utilizando o raio do corpo e sua distância, a partir da Equação 2.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2 \cdot r}{d}\right) \cdot \left(\frac{360}{2 \cdot \pi}\right) \cdot 3600 \cdot 1000 \quad (2)$$

Sendo “ α ” o tamanho angular do corpo (em segundo de arco), “ d ” é a distância do corpo (em km) e “ r ” o raio do corpo (em km). Os outros valores são valores de conversão de unidades. Dessa forma é possível compará-lo com o tamanho angular da estrela.

O tamanho angular da estrela pode ser obtido a partir das relações propostas por Belle (1999), aplicável para estrelas da sequência principal e estrelas gigantes, ou a relação proposta por Kervella *et al.* (2004) para estrelas anãs e subgigantes.

Outro fator importante para uma ocultação é a magnitude do corpo e da estrela, pois é a partir destes valores que se determina o valor da queda de fluxo luminoso que a ocultação produz, e, com isso, determinar quais os equipamentos necessários para detectar e registrar o evento. A magnitude é medida sempre em relação a uma banda específica. Geralmente utiliza-se valores na faixa do espectro visível, mas em situações específicas, pode-se utilizar outras bandas, como o infravermelho, visando obter-se um maior contraste (maior queda de fluxo) durante o evento. Tal queda de fluxo pode ser determinada com base nas magnitudes do objeto e da estrela, de acordo com a Equação 3.

$$\Delta mag = m_o - m_s + [2,5 \cdot \log_{10}(10^{0,4 \cdot (m_s - m_o)} + 1)] \quad (3)$$

Onde Δmag é a queda de magnitude, m_o é a magnitude do objeto ocultador e m_s a magnitude da estrela ocultada.

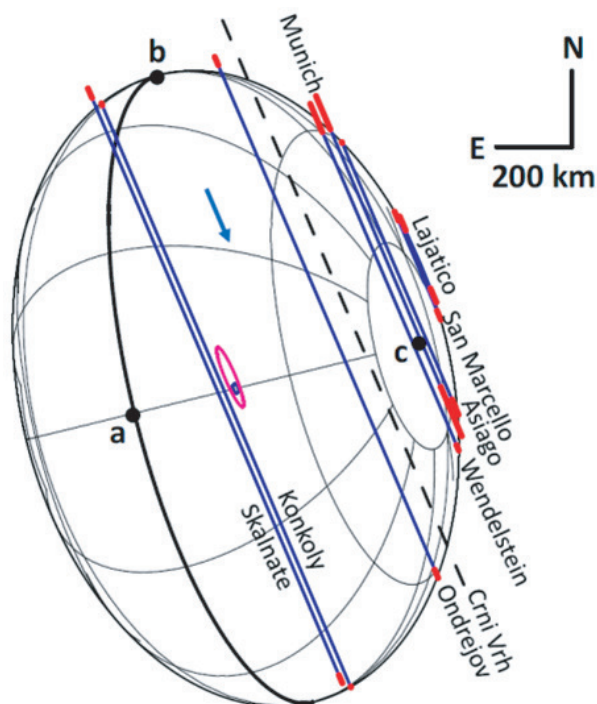
Cada observador ao realizar o registro da ocultação obtém uma medida do perfil do corpo, denominada corda. Com vários observadores distribuídos ao longo da sombra para uma mesma ocultação, se obtém diversas cordas, que ao serem combinadas permitem a obtenção da forma do perfil do objeto, como mostrado na Figura 4.

Mesmo uma detecção única de um evento é importante, pois informa acerca da posição do objeto, com relação às estrelas de fundo, melhorando as efemérides do corpo para novas predições de ocultações ou outros estudos (Rommel, F. L. *et al.*, 2023). Além de permitir o estudo das regiões na proximidade do corpo, permitindo possíveis detecções de satélites, atmosfera ou anéis (Pereira, C. L. *et al.*, 2023).

3.1 Predição de ocultações

Para se observar uma ocultação de um objeto previamente conhecido, é necessário que se tenha uma previsão do local, instante, estrela e o corpo que realizará a ocultação. A predição é feita a partir da comparação da efeméride do corpo e um catálogo estelar, buscando determinar se o corpo irá se aproximar da estrela a uma distância angular que seja inferior ao tamanho angular da Terra à distância do objeto, somada ao tamanho angular do objeto e a incerteza da sua posição e a incerteza na posição da estrela, vistos da Terra. Caso esta

Figura 4 – Perfil de Haumea obtido a partir de uma ocultação de múltiplas cordas



Fonte: Ortiz *et al.* (2017).

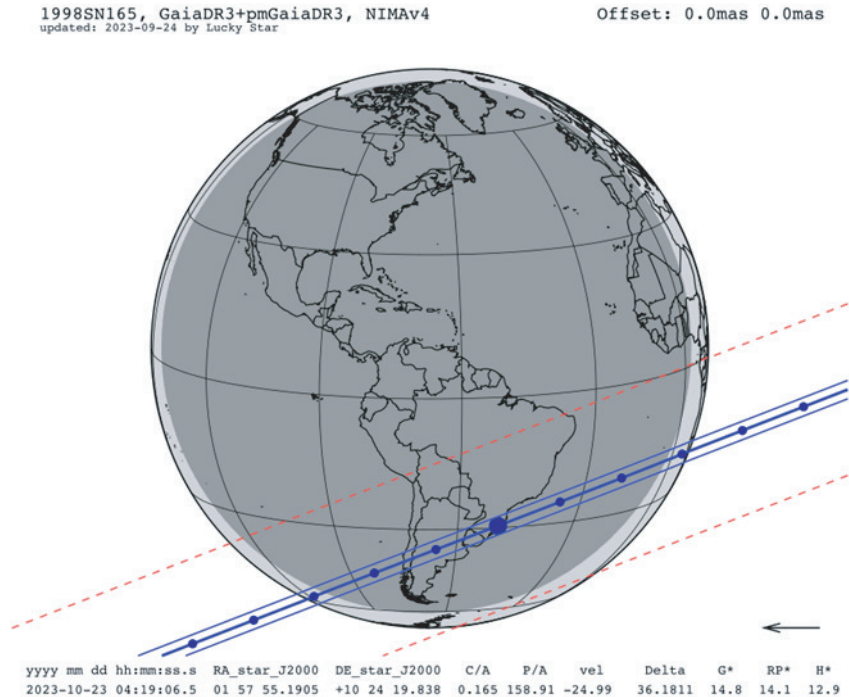
condição seja satisfeita, sabe-se que poderá haver a projeção da sombra na superfície da Terra. A duração do evento é determinada pela razão do diâmetro do corpo pela velocidade relativa à Terra.

Utilizando o centro da Terra é determinado um plano tangente na esfera celeste e nele são calculadas algumas relações geométricas do evento. A maior aproximação CA (do inglês, *Closest Approach*), os instantes de maior aproximação, a velocidade da sombra, entre outros (ASSAFIN *et al.*, 2010). Permitindo determinar a direção de projeção da sombra do objeto sobre o planeta e a determinação do horário que o evento irá ocorrer. Com todas essas informações é possível gerar um mapa de predição do evento, apresentando o local pelo qual a sombra do objeto passará pela Terra com os horários previstos, similar ao da Figura 5, contendo todas as informações pertinentes para a realização de uma observação do evento, permitindo que qualquer observador consiga realizar a observação.

Tais mapas de predição são disponibilizados em sites como do projeto *Lucky Star*¹, no qual observadores de todo o mundo podem conferir quais são as ocultações para os próximos dias, com o mapa de predição e o campo de catálogos estelares, permitindo uma pré-visualização da região na qual ocorre o evento.

¹ <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/>

Figura 5 – Mapa de predição para um TNO, apresentando as principais informações para a ocultação



Fonte: Lucky Star Project.

As predições apresentam uma margem de erro, marcada pela linha tracejada vermelha na Figura 5. Tal erro depende do catálogo estelar e da precisão da efeméride do objeto ocultador.

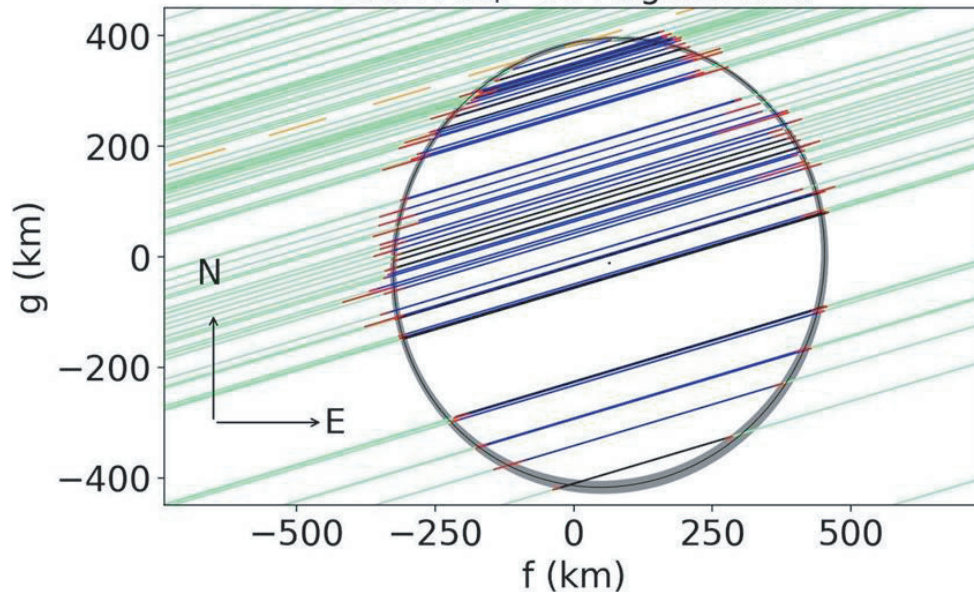
Cada observador da ocultação irá realizar um registro fotométrico do evento obtendo uma curva de luz. Quando posicionada no plano do céu, em conjunto com os dados dos demais observadores, permite a determinação do perfil do corpo, como na Figura 6. Quanto maior o número de observadores, maior será a precisão na determinação do tamanho e forma do corpo, permitindo, inclusive, a possibilidade de detecção de topografia em objetos distantes, como foi o caso da ocultação de 2020 pelo TNO 2002 MS4, que se encontra a 35 UA do Sol (Rommel, F. L. *et al.*, 2023). Essa curva de luz trará as informações do corpo, vista pelo observador, podendo apresentar anéis, satélites e até a atmosfera do corpo.

Para a realização de qualquer campanha de observação são convidados diversos observadores e observatórios (via *e-mail*, ou outras formas de comunicação) na busca por voluntários, podendo resultar em mais de 100 telescópios envolvidos para detecção de um mesmo evento de ocultação, como foi o caso do 2002 MS4.

3.2 Ocultações por satélites

O estudo via ocultação estelar não se resume ao estudo do corpo principal e suas características físicas, podem ser feitos estudos com o intuito de determinar e analisar os arredores

Figura 6 – Perfil do corpo MS4 obtido a partir de uma ocultação de múltiplas cordas
2002 MS₄ - 08 August 2020



Fonte: Rommel, F. L. *et al.* (2023).

do corpo. Estas observações podem gerar descobertas de anéis, satélites, atividade cometária ou atmosfera (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014), (ORTIZ *et al.*, 2017), (Rommel, F. L. *et al.*, 2023), (MORGADO *et al.*, 2023), (OLIVEIRA *et al.*, 2022), (BUS *et al.*, 1996). Desse modo, os registros de ocultações estelares devem ser iniciados e terminados vários minutos antes e depois do tempo previsto pela predição. Além de permitir a busca ou caracterização de objetos nos arredores, evita possíveis erros que possam existir na predição da ocultação como na efeméride do corpo.

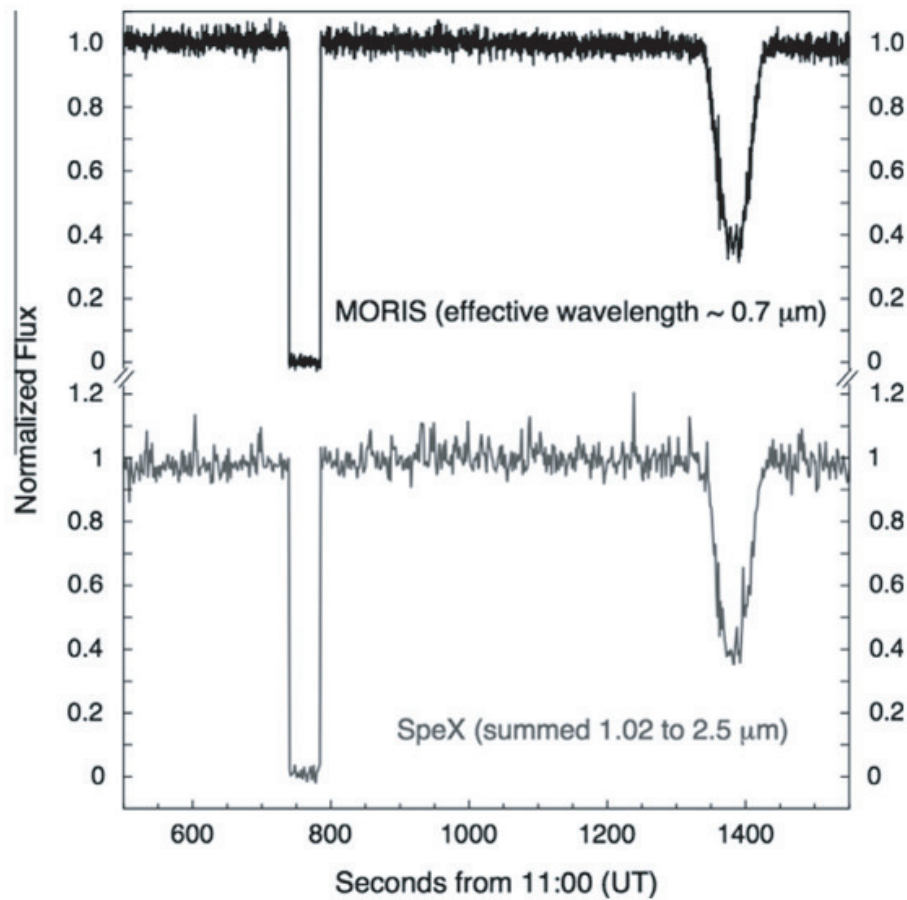
Em 2011 foi observada a ocultação por Plutão e Caronte, no qual os dois corpos ocultaram a estrela, sendo que o Plutão apresentou a ocultação gradual por conta da atmosfera do corpo, enquanto Caronte apresentou uma queda abrupta. A Figura 7 apresenta a curva de luz obtida da ocultação registrada (GULBIS *et al.*, 2015).

3.3 Ocultações por anéis

Anéis são estruturas compostas por pequenas partículas confinadas a distâncias determinadas ao redor de um corpo maior. Certamente os mais conhecidos são os anéis de Saturno, mas sabe-se que os demais planetas gigantes também possuem. Em 2013, a partir de uma ocultação estelar, descobriu-se que pequenos corpos do sistema solar também pode possuir anéis, como exemplo o centauro Chariklo (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014) e em outros TNOs, como Haumea (ORTIZ *et al.*, 2017) e Quaoar (MORGADO *et al.*, 2023).

A detecção de anéis por meio de ocultações estelares apresentam-se de modo diferente de uma ocultação por um objeto opaco, uma vez que por serem estruturas semitransparentes permitem a passagem parcial da luz da estrela. Sendo assim, em uma curva de luz,

Figura 7 – Curva de luz obtida em uma ocultação por Caronte e Plutão, sendo a primeira queda referente a Caronte



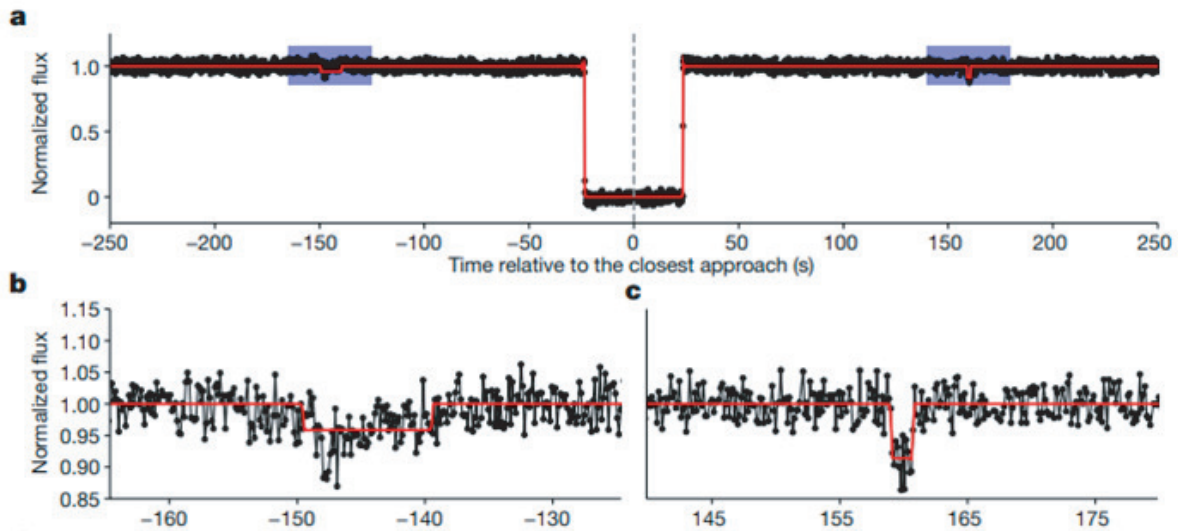
Fonte: Gulbis *et al.* (2015).

eles apresentam quedas parciais da luminosidade. A profundidade da queda irá depender da profundidade óptica do conjunto de partículas na região, sendo maior a queda para maiores profundidades ópticas (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014). A Figura 8 apresenta a detecção dos anéis de Quaoar, na qual há queda parcial de fluxo antes e após a ocultação pelo corpo principal. Como as quedas possuem durações e profundidades diferentes, os autores sugerem tratar-se de um anel não homogêneo, com uma região menos densa e mais espalhada (detalhe b) e outra mais densa (detalhe c) (MORGADO *et al.*, 2023).

Algumas situações podem apresentar também uma queda de fluxo parcial e não representarem um anel ao redor do corpo, pode ser o caso de atividade cometária (BUS *et al.*, 1996).

Todos os planetas gigantes possuem anéis ao seu redor, portanto é razoável supor a existência de anel ao redor do P9. Além do mais, desde a descoberta do primeiro sistema de anéis ao redor de pequenos corpos do Sistema Solar (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014), outros anéis no Sistema Solar foram detectados, como ao redor de Haumea (ORTIZ *et al.*, 2017) e Quaoar (Pereira, C. L. *et al.*, 2023), e possivelmente Chiron (Ortiz, J. L. *et al.*, 2023). Tais estudos

Figura 8 – Ocultação de Quaoar com anéis de diferentes tamanhos (detalhe em b e c)



Fonte: Morgado *et al.* (2023).

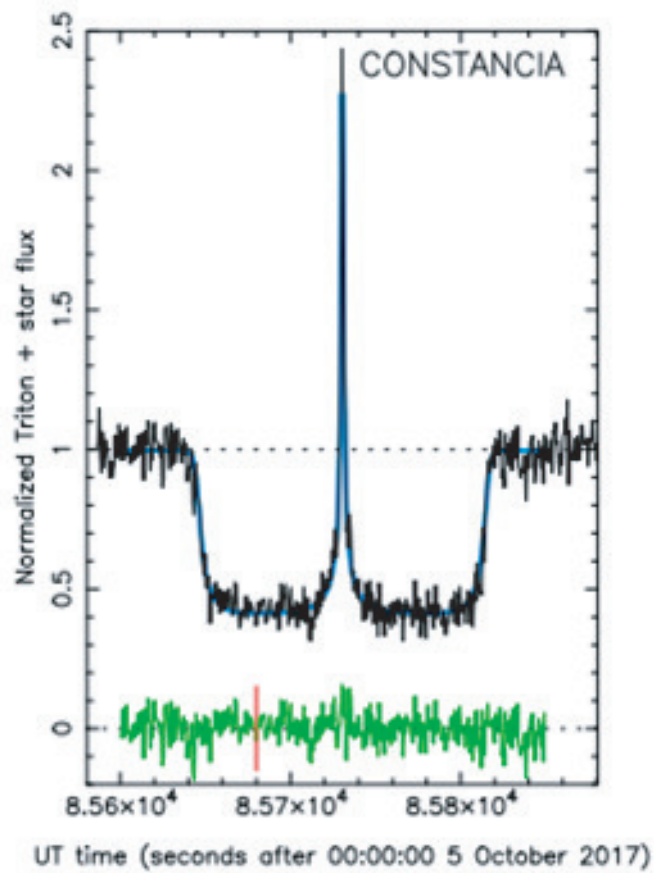
trouxeram novas questões sobre a formação, evolução, estabilidade e a frequência de anéis ao redor dos corpos.

3.4 Ocultações por corpos com atmosfera

Uma ocultação estelar por uma atmosfera, pode apresentar na sua curva de luz uma característica evidente, a redução gradual do fluxo de luz nas proximidades do corpo, ao iniciar a ocultação, e um aumento gradual do fluxo, ao finalizar a ocultação. Tal efeito indica um aumento da densidade da atmosfera nas proximidades do corpo, o qual só não será evidente caso a atmosfera tenha uma pressão muito baixa ($P < 100$ nanobar) (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Observações de ocultações por atmosferas permitem obter características como pressão, temperatura e composição das mesmas. Em casos específicos ventos e brumas podem ser detectados (YOUNG; BRAGA-RIBAS; JOHNSON, 2020).

Um dos exemplos de ocultação com atmosfera é a ocultação por Tritão, satélite natural de Netuno, na qual, em 2017, ocorreu o registro com todas as características esperadas para um corpo com atmosfera, iniciando com a queda gradual do fluxo, e ao atingir o centro do corpo, um flash central, com um aumento repentino do fluxo, finalizando a ocultação obtém-se o aumento gradual do fluxo Oliveira *et al.* (2022). A Figura 9 apresenta o registro em que houve o flash central de Tritão.

Figura 9 – Ocultação de Tritão, apresentando as características de atmosfera com queda gradual e pico central)



Fonte: Oliveira *et al.* (2022).

4 VARIÁVEIS ASSOCIADAS AO REGISTRO DE UMA OCULTAÇÃO ESTELAR

O registro da variação do fluxo luminoso da estrela, ao longo de um determinado intervalo de tempo, é a principal informação para uma ocultação estelar. Esse registro permite determinar a duração da passagem do objeto na frente da estrela, informação que pode ser utilizada posteriormente para estimar o tamanho do corpo. Cada imagem será analisada pelo método de fotometria diferencial de abertura, quando são definidas regiões do CCD (*charged-coupled device*), geralmente circulares ao redor do alvo e estrelas calibradoras, para se contabilizar as contagens correspondentes ao fluxo do objeto medido. O fluxo do alvo no tempo é então comparado com o fluxo das estrelas calibradoras, a fim de corrigir efeitos causados por variação do brilho do céu e evidenciar o fenômeno da ocultação. Estes dados podem ser usados para gerar uma curva de luz de ocultação, da qual são obtidos os instantes do evento e então calculada a dimensão objeto, chamada de corda. Esta poderá ser combinada com outras cordas, observadas de diferentes locais, permitindo a determinação do tamanho e perfil do corpo (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014).

Tradicionalmente, para realizar o registro de uma ocultação estelar, utiliza-se um telescópio (de tamanho adequado para visualização da estrela a ser ocultada no evento) e uma câmera rápida capaz de registrar os instantes de tempo.

4.1 Equipamentos para a aquisição dos dados

O principal equipamento a ser utilizado para a observação de ocultações estelares é o telescópio, que apresenta algumas características importantes para a captação de fótons, sendo a primeira delas a sua abertura, pois quanto maior a abertura maior a quantidade de fótons que poderá ser detectado. Assim é realizado o cálculo da área do telescópio para determinar a quantidade de fótons incidentes conforme a magnitude da estrela e do objeto ocultador (Equação 10), nessa situação será considerado como uma área circular sem obstáculos (espelho secundário e suportes).

Outro ponto importante é a distância focal do telescópio, para que em conjunto com o tamanho da CCD a escala de placa seja adequada para comportar a formação da imagem da estrela em alguns pixels, otimizando a captação dos fótons.

A escala de placa determina o tamanho, em segundo de arco por pixel, que cada pixel terá no plano do céu. Seu cálculo leva em conta a distância focal do telescópio ($dfocal$), o tamanho do pixel (px) da câmera CCD e a binagem (bin) utilizada. Binagem é uma ajuste possível nas câmeras, no qual passam a identificar uma matriz de pixels (2x2 por exemplo) como um único pixel, aumentando a escala de placa e reduzindo o tempo de leitura, visto que 4 pixels serão lidos como um único só, permitindo a detecção de objetos mais fracos. A Equação 4 permite determinar a escala de placa (ep), sendo o valor de 206.265 referente a conversão de radianos

em segundo de arco, o tamanho do pixel(px) é dado em micrômetros e a distância focal ($dfocal$) é dada em mm.

$$ep = 206265 \cdot \frac{px \cdot bin}{1000 \cdot dfocal} \quad (4)$$

Para que seja possível combinar os dados de diversas ocultações, e permitir a determinação do perfil do corpo, é necessário que se obtenha, em conjunto com as imagens da ocultação, o tempo absoluto do evento. Este pode ser obtido por meio da utilização de um dispositivo GPS (*global position system*) ou obtenção do tempo via internet que deve, preferencialmente, estar registrado em cada frame ou imagem captada, permitindo a análise individual destas imagens sem que se perca informação da ocultação.

O uso de câmeras com alta cadência de imagens para o registro de ocultações estelares é um dos principais fatores na precisão dos instantes, dessa forma é recomendado que os observadores utilizem câmeras especiais com alta velocidade de captura e processamento, pois além da captura ser rápida é importante que o descarregamento da imagem do CCD também seja rápido, evitando a perda de informações da ocultação durante esse processo. Este tempo de processamento é o momento em que a câmera está descarregando a contagem de fótons da CCD, passando a não contabilizar os fótons durante o processo, esse tempo é denominado tempo de leitura (do inglês, *readout time*) e, caso seja muito longo, pode representar importante perda de informação acerca do início ou fim do evento, ou mesmo de possíveis estruturas secundárias.

Uma das câmeras utilizadas para observação desse tipo de evento é a QHY174GPS¹, que permite ajuste nos tempos de exposição de 5 μ s até 900 s e ajuste da binagem de 1x1 ou 2x2.

4.2 Ruídos gerados na captura

Durante o registro de uma imagem, como descrito acima, uma fração dos fótons que chega no telescópio é perdida, seja por serem espalhados ou absorvidos pela própria ótica. Essa perda por absorção é da ordem de 0,5% para cada mês que o telescópio fique exposto ao ar, por conta da poeira que se acumula nos espelhos (BELY, 2003).

A razão entre os fótons detectados para a conversão em elétrons é denominada Eficiência Quântica, a maioria das câmeras utilizadas na astronomia tem valores que variam de 80 a quase 100% de eficiência quântica. A eficiência depende do comprimento de onda registrado e da temperatura de operação (HOWELL, 2006).

Os elétrons adicionais gerados como ruído tendem a ser originados por agitações térmicas na CCD. Tal efeito ocorre por conta de alguns elétrons que são removidos da camada de valência e acabam coletados por um pixel, gerando um sinal que não pode ser diferenciado

¹ <https://www.qhyccd.com/qhy174gps-imx174-scientific-cooled-camera/>

dos fótons astronômicos (HOWELL, 2006). A taxa de geração desse ruído pode ser modelada em função da temperatura que a CCD se encontra. Para minimizar esse efeito observadores utilizam métodos de calibração de imagens, como o “*dark frame*”. O procedimento consiste em obter uma imagem com o mesmo tempo de exposição da imagem de ciência porém com a câmera fechada (impedindo a entrada de fótons). Dessa forma obtém-se uma imagem “*dark*” que representa a tendência dos sinais espúrios gerados pela câmera. No entanto, esse método remove apenas o componente sistemático do ruído térmico, não eliminando a dispersão estatística associada ao processo aleatório de geração de elétrons. A Equação 5 apresenta um modelo da taxa de elétrons gerados por pixel a cada segundo no CCD (T_x).

$$T_x = 2,55 \cdot 10^{15} \cdot K_{ccd} \cdot T^{1/5} \cdot \exp\left(-\frac{1,1557 - \frac{7,021 \cdot 10^{-4} \cdot T^2}{1108 + T}}{2 \cdot K_b \cdot T}\right) \quad (5)$$

Sendo “ K_{ccd} ” uma constante da CCD, relacionada ao tamanho dos pixels e a corrente do “*dark*”, “ T ” a temperatura (em Kelvin) e “ K_b ” a constante de Boltzmann ($8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$) (MCLEAN, 2008). O desvio padrão deste ruído (σ_{dark}) é calculado com base na Taxa (T_x), no número de pixel (n_{px}) utilizados na CCD e no tempo de exposição (t_{exp}), resultando na Equação 6 (BOLTE, 2006).

$$\sigma_{dark} = \sqrt{T_x \cdot n_{px} \cdot t_{exp}} \quad (6)$$

Ao final os fótons contabilizados pela CCD são transformados em elétrons que por sua vez são convertidos em um sinal de saída. Nesse processo cada unidade digital de sinal (ADU, do inglês *Analog-to-Digital Unit*) representa uma determinada quantidade de elétrons. As câmeras CCDs permitem a utilização de ganho, definindo quantos elétrons são necessários para gerar um único valor de ADU, tal ajuste é útil para detecção de objetos de baixa magnitude, regulando o sinal de forma mais eficiente. O valor do ganho é dado em elétrons / ADU.

O limite de leitura da CCD é proporcional ao número de bits da câmera com valor máximo de $2^n - 1$, onde “ n ” número de bits. A conversão de elétrons em ADU apresenta um comportamento linear, dentro da faixa operacional da câmera, perdendo sua linearidade a medida que os valores se aproximam do limite máximo de contagem (HOWELL, 2006).

O sinal é contabilizado em cada pixel, nesse processo outro tipo de ruído surge, o ruído de leitura, possuindo uma relação direta com o ganho e seu valor é fornecido pelo fabricante do CCD. O ruído adiciona alguns elétrons na detecção de cada pixel a cada contagem.

O céu do local da observação também é um dos fatores que contabiliza fótons indesejados na CCD, pois a atmosfera pode espalhar a luz de fontes artificiais próximas, como iluminação urbana. Esse efeito gera um ruído denominado fundo de céu.

Das imagens é possível determinar a relação de Sinal/Ruído (S/R), como expresso na Equação 7 (HOWELL, 2006).

$$\frac{S}{R} = \frac{N_*}{\sqrt{N_* \cdot n_{px} \cdot \left(1 + \frac{n_{px}}{n_B}\right) \cdot (N_s + N_D + N_R^2 + G^2 \cdot \sigma_f^2)}} \quad (7)$$

Considerando o número de fótons coletados nos pixels em que a estrela é registrada (N_*), o número de pixel utilizados (n_{px}), o número de pixel utilizados para determinar o fundo de céu (n_B). Tais termos serão multiplicados pela soma do número de fótons por pixel no céu de fundo (N_s), com o número de elétrons gerados pelo ruído térmico (N_D), com o quadrado do número total de elétrons por pixel gerados na leitura (N_R^2) e multiplicados pelo quadrado do Ganho (G^2) pelo erro de um sigma introduzido pelo conversor A/D (σ_f^2) da CCD, sendo majoritariamente o erro de quantização, mas incluindo também outros erros adicionais devido a imperfeições no conversor (HOWELL, 2006).

4.3 Magnitude e número de fótons dos objetos da ocultação

A estrela é parte fundamental da ocultação estelar, e é com base no seu brilho aparente que são realizadas as decisões sobre quais equipamentos e configurações utilizar. Dessa forma, o brilho, ou magnitude da estrela pode ser relacionado ao seu fluxo a partir da Equação 8.

$$m = -2,5 \cdot \log_{10}(F) + K_m \quad (8)$$

Onde m é a magnitude, F é o Fluxo e " K_m " é uma constante que apresenta o valor do fluxo de uma estrela de magnitude zero na banda (ou faixa espectral) escolhida. Calculando o fluxo é possível determinar a quantidade de fótons que chegam, por cm^2 , na Terra. Como fluxo luminoso é a energia por unidade de área por tempo para cada comprimento de onda, podemos determinar a quantidade de fótons a partir da relação da Energia (E) de " n " fótons, conforme a Equação 9, sendo " h " a constante de Plank, " c " a velocidade da luz e λ o comprimento de onda.

$$E = n \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (9)$$

Substituindo o valor de " E " dentro de " F " da Equação 8, e reorganizando os termos obtém-se o número de fótons que se dividirmos pela área (A) pelo tempo(t), obtemos a Equação 10.

$$\frac{n}{A \cdot t} = \frac{\lambda^2 \cdot 10^{\frac{K_m - m}{2,5}}}{h \cdot c} \quad (10)$$

Esta equação não aplica-se apenas às estrelas, podendo ser aplicada aos corpos e satélites ocultadores. Porém, no caso de satélites, por estar aparentemente muito próximo ao corpo principal, a magnitude aparente será a soma das magnitudes do satélite e do planeta. Partindo da relação de diferença entre uma magnitude m e outra m_r , conforme a Equação 11.

$$m - m_r = -2,5 \cdot \log_{10}\left(\frac{F}{F_r}\right) \quad (11)$$

Reordenando os termos obtém-se a razão entre os fluxos F e F_r , conforme a Equação 12.

$$\frac{F}{F_r} = 10^{-0,4 \cdot (m - m_r)} \quad (12)$$

Aplicando a Equação 12 em dois corpos com fluxos diferentes (corpo principal e satélite), cada um apresentando um fluxo " F_1 " e " F_2 " e magnitudes " m_1 " e " m_2 " respectivamente, pode-se obter o fluxo total dos corpos " F_{total} ".

$$\frac{F_1}{F_r} = 10^{-0,4 \cdot (m_1 - m_r)} \quad (13)$$

$$\frac{F_2}{F_r} = 10^{-0,4 \cdot (m_2 - m_r)} \quad (14)$$

$$\frac{F_{total}}{F_r} = 10^{-0,4 \cdot (m_{total} - m_r)} \quad (15)$$

O fluxo total é a soma dos fluxos individuais dos corpos, " $F_{total} = F_1 + F_2$ ", assim resultando na Equação 16.

$$\frac{F_{total}}{F_r} = \frac{F_1 + F_2}{F_r} = \frac{F_1}{F_r} + \frac{F_2}{F_r} \quad (16)$$

Cancelando os termos " F_r " e rearranjando a equação resulta na Equação 17, que apresenta a magnitude total dos corpos " m_{total} ".

$$m_{total} = -2,5 \cdot \log_{10}(10^{-0,4 \cdot m_1} + 10^{-0,4 \cdot m_2}) \quad (17)$$

A magnitude aparente (m) do corpo em oposição, isto é, com ângulo de fase zero graus ($\varphi = 0$), pode ser determinada com base na quantidade de luz refletida pelo corpo, denominada albedo (p), do raio do corpo (r), a distância do corpo ao observador (d), em unidades astronômicas, e a magnitude absoluta do corpo (H), que no caso de corpos no sistema solar é definida como a magnitude do corpo estando a 1 UA do Sol e do observador, com um ângulo de fase igual a zero. A Equação 18 determina a magnitude absoluta (STUART; BINZEL, 2004).

$$H = 15,618 + 5 \cdot \log_{10}(2r) - 2,5 \cdot \log_{10}(p) \quad (18)$$

Com a magnitude absoluta do corpo e sua distância (d) é possível determinar a magnitude aparente a partir da Equação 19 (SHEPARD, 2017), sendo d_{sol} a distância do objeto até o Sol.

$$m = H + 5 \cdot \log_{10}(d \cdot dsol) \quad (19)$$

Uma outra opção é a determinação direta da magnitude aparente, com base também no ângulo de fase, conforme a Equação 20 (PRAVEC; HARRIS, 2007).

$$m = 5 \cdot \log_{10}\left(\frac{1329}{2 \cdot r \cdot \sqrt{p}}\right) + 5 \cdot \log_{10}(d \cdot dsol) - 2,5 \cdot \log_{10}[f(\varphi)] \quad (20)$$

5 OCULTAÇÕES ESTELARES

Visando uma possível confirmação da existência do Planeta 9, uma melhor caracterização de seus parâmetros físicos torna-se necessária e para tal a técnica de ocultação estelar pode ser utilizada, assim para prever quais parâmetros e equipamentos podem ser utilizados para uma observação foi desenvolvido um simulador de ocultações estelares, permitindo analisar os diferentes parâmetros previstos para o P9.

Esse capítulo apresenta as etapas de desenvolvimento do simulador de ocultações estelares (SOS, do inglês *Stellar Occultation Simulator*). Descrevendo a modelagem da ocultação estelar, como os anéis e satélites foram incluídos, como é realizada a contagem de fótons partindo da estrela, passando pela atmosfera terrestre, que adiciona um ruído, até atingir a CCD e por fim sua conversão para sinal digital.

O simulador, desenvolvido em linguagem *Python*, trabalha com classes de objetos, a fim facilitar a utilização e a inclusão dos dados por parte do usuário. São 3 classes principais, Objeto, Estrela e Equipamentos.

Na classe Objeto devem ser inseridas as informações acerca do corpo ocultador (diâmetro, distância, magnitude e velocidade) bem como, se desejável, informações sobre um anel ao redor do corpo (espessura, profundidade óptica e diâmetro) e/ou satélite (diâmetro, magnitude, distância e se estaria localizado antes ou depois do corpo principal).

Na classe Estrela o usuário deve indicar o comprimento de onda da observação, e a estrela que deseja simular, por meio da ascensão reta e declinação, ou inserir manualmente os valores da magnitude e tamanho angular.

Já na classe Equipamentos devem ser incluídos todas as informações acerca do telescópio (abertura e distância focal) e câmera (tamanho de pixel, eficiência quântica, binagem, tamanho de pixel, ganho e temperatura) bem como os tempos de exposição e tempo de leitura utilizados.

A partir dessas informações o usuário ainda deve inserir outros dados relevantes para a simulação ocorrer, como o tempo de evento, o instante esperado para o centro do evento, a altitude da observação e o *seeing* do local de observação. Caso o usuário prefira, ele pode escolher utilizar um valor de desvio padrão como o ruído, em vez de fatores que dependem da temperatura, *seeing* e altitude. Dessa forma, será realizada a simulação da ocultação retornando a curva de luz e uma tabela com os valores simulados para cada instante da ocultação.

5.1 Efeitos geométricos

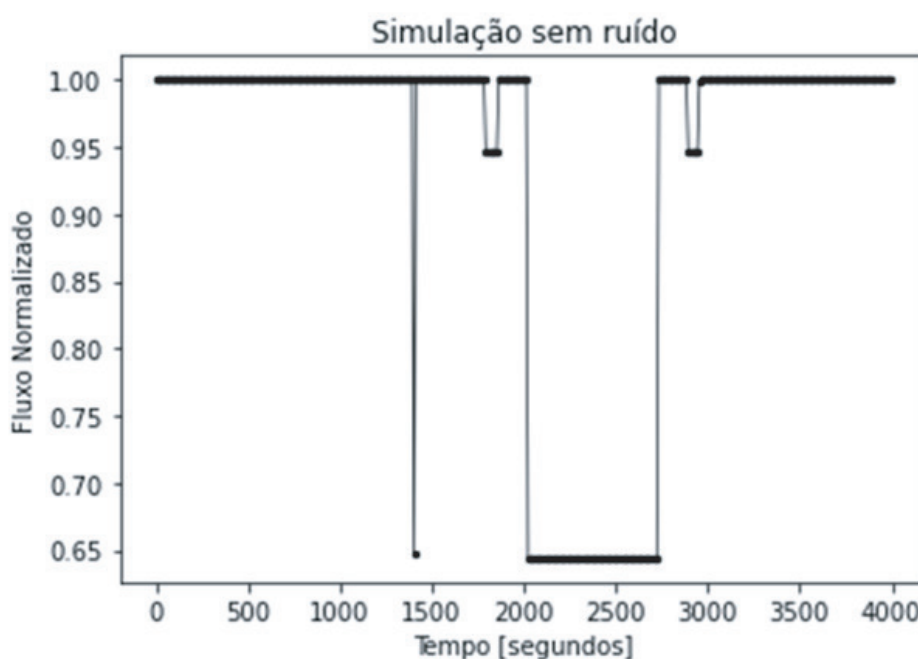
Como descrito, uma ocultação estelar é a passagem de um objeto na frente de uma estrela, quase pontual. A duração da passagem depende da velocidade aparente do objeto e do tamanho do mesmo, ou, mais especificamente, da dimensão do perfil do objeto vista pelo observador (corda).

Assim, a simulação de ocultação estelar, utiliza o tamanho angular do corpo, combinado com sua velocidade e determina a duração do evento. Considerando um valor do tempo de exposição, usa-se um centésimo ($1/100$) do tempo de exposição para contagem de fótons (Equação 10). A cada centésimo da exposição verifica-se se o corpo está sobre a estrela ou não, contabilizando-se o número de fótons na situação do momento. Se a ocultação se inicia, somente o fluxo do objeto é considerado nos instantes restantes até completar a exposição. Em seguida, durante o tempo morto os fótons são ignorados reiniciando a contagem no tempo de exposição subsequente, os valores obtidos são registrados em uma tabela contendo o instante de tempo do começo da exposição e a quantidade de elétrons convertidos, incluindo os gerados pelos ruídos, que serão discutidos adiante.

Em ocultações com satélites e anéis, o mesmo princípio é aplicado, contabilizando os fótons em frações do tempo de exposição. Nessas situações é necessário que o usuário insira, em conjunto com os dados do corpo, os dados do satélite e dos anéis.

O registro dos valores de fótons e tempos (a cada exposição completa) são adicionados a uma tabela, que ao final pode se tornar um arquivo de saída, caso o usuário escolha. Caso contrário a saída será uma curva de luz, como na Figura 10.

Figura 10 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com anéis e um satélite, situação sem ruído



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 10, apresenta-se uma curva de luz simples, contendo anéis e satélites, porém nenhum tipo de ruído foi adicionado, tornando a curva de luz idealizada. Para tornar a simulação mais realista foram adicionados diferentes tipos de ruídos, mostrados nos subcapítulos seguintes.

5.1.1 Difração de Fresnel

A difração de Fresnel é um efeito gerado pela geometria, no qual as ondas da luz interagem com a borda de um objeto, no caso da ocultação estelar o objeto ocultador. A luz proveniente da estrela durante o momento da ocultação não é bloqueada abruptamente, mas devido à interação da borda do objeto ocultador (sem atmosfera) com a frente de onda, ocorre o desvio da direção de propagação da luz formando um padrão característico. A maior escala de tais padrões, chamada de escala de Fresnel ($E_{Fresnel}$), pode ser determinada utilizando a seguinte equação (ROQUES; MONCUQUET; SICARDY, 1987)

$$E_{Fresnel} = \sqrt{\lambda \cdot \frac{D}{2}} \quad (21)$$

Onde D é a distância do objeto ocultador e λ é o comprimento de onda. O principal efeito gerado pela difração de Fresnel é a suavização do perfil de ocultação, deixando de gerar uma queda abrupta do objeto e passando a ser um comportamento mais suavizado.

Essa suavização da curva é calculada a partir da Equação 22, gerando valores de fluxo para cada instante da ocultação com a integral com seno $S(z)$ e a integral com a parte cosseno $C(z)$. Nela é inserido o valor de z que corresponde ao instante em relação ao ponto de imersão ou ao de emersão do corpo dividido pelo valor da escala de Fresnel.

$$S(z) = \int_0^z \sin(\pi \cdot t^2/2) \text{ e } C(z) = \int_0^z \cos(\pi \cdot t^2/2) \quad (22)$$

Tais valores, determinados com as integrais, são posteriormente aplicados sobre uma segunda equação, que relaciona os resultados da integral contendo seno (ss) e da integral contendo cosseno (cc) com a opacidade (op) do corpo, obtendo ao final o fluxo total da difração ($F_{Fresnel}$) de acordo com Equação 23.

$$F_{Fresnel} = [1 + (cc + ss) \cdot op/2]^2 \cdot [(cc - ss) \cdot op/2]^2 \quad (23)$$

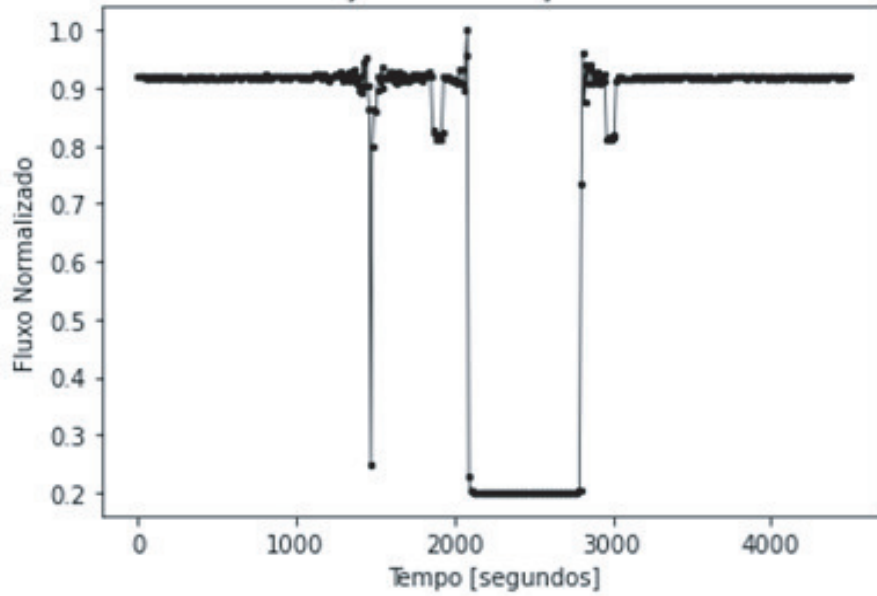
A Figura 11 apresenta uma simulação em que apenas a difração de Fresnel foi aplicada sobre a ocultação, sendo a principal característica a variação nas proximidades da ocultação. A difração também leva em conta a transparência do corpo, sendo maior seu efeito quanto mais opaco o objeto. Dessa forma nos anéis a difração pode ser atenuada.

Assumindo a difração ocorrendo tanto pelo corpo principal, como pelo satélite e pelos anéis.

5.1.2 Tamanho da estrela

Outro efeito que influencia a forma da curva de luz é o tamanho da estrela, que por apresentar um tamanho angular finito não deve ser tratado como fontes pontuais. Desse modo

Figura 11 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com anéis e um satélite, apenas considerando a Difração de Fresnel



Fonte: Autoria própria (2024).

sua intensidade é distribuída pelo tamanho angular da estrela, o que acaba por suavizar ainda mais a queda abrupta de uma ocultação.

O tamanho angular da estrela (θ) é definido como o diâmetro aparente da estrela no céu, e é dado em milissegundo de arco (mas). Sendo portanto determinado pela Equação 24, sendo o tamanho angular da estrela, R seu diâmetro e D sua distância do observador.

$$\theta = \frac{2 \cdot R}{D} \quad (24)$$

A maior parte das estrelas não possui uma medida precisa do seu tamanho angular, dessa forma (BELLE, 1999) e (KERVELLA *et al.*, 2004) propuseram equações diferentes para determinação do tamanho das estrelas conforme sua classe espectral, sendo a primeira para estrelas da sequência principal e estrelas gigantes Equação 25 e a segunda para estrelas anãs e subgigantes Equação 26.

$$\theta_V = 10^{0,500+0,264 \cdot (V-K)} \text{ e } \theta_B = 10^{0,500+0,290 \cdot (B-K)} \quad (25)$$

$$\theta_V = 10^{0,0755 \cdot (V-K)+0,5170-0,2 \cdot K} \text{ e } \theta_B = 10^{0,0535 \cdot (B-K)+0,5159-0,2 \cdot K} \quad (26)$$

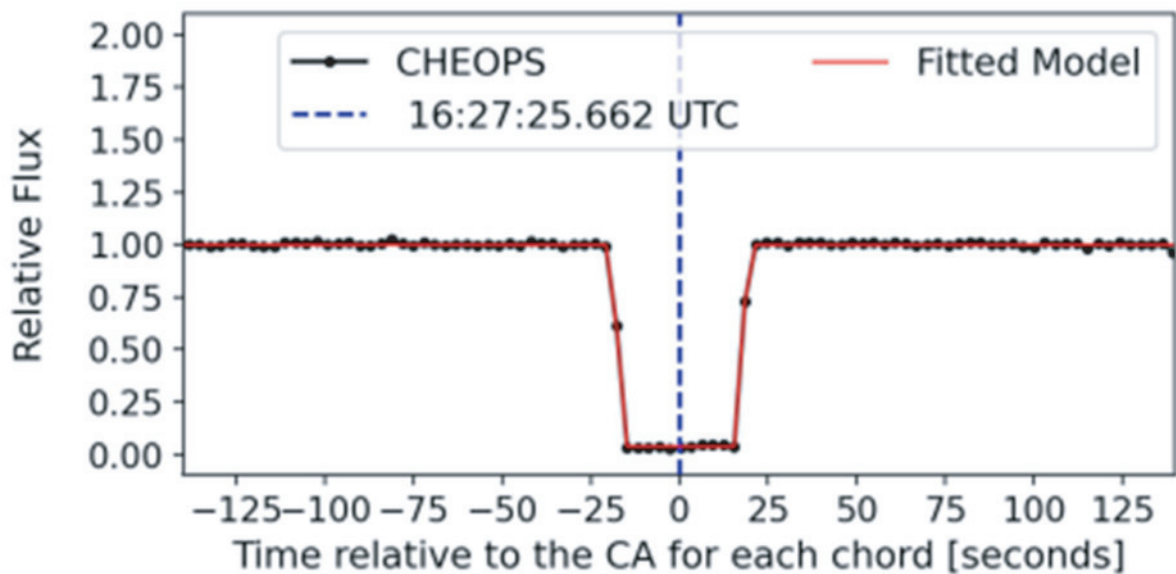
Sendo a relação de Van Belle válida apenas para valores de $V - K$ de -0,5 a 0,5 e de $B - K$ de 3 a 6.

5.2 Efeitos de ruído e perda de fótons

Diversas são as situações que geram acréscimo ou perda de fótons durante uma observação, sendo todos contabilizados como um único ruído. Neste subcapítulo é discutido de que forma os ruídos são gerados em situações reais e como foram considerados no simulador.

Ao chegar na atmosfera da Terra os fótons já sofreram interação com partículas de gás e poeira presentes no meio interestelar e/ou no Sistema Solar. Uma ocultação registrada pelo telescópio espacial CHEOPS (*Characterising Exoplanets Satellite*), apresenta parte do ruído proveniente do espaço, sendo a maior parte é devido ao ruído térmico, que será discutido adiante. A Figura 12 apresenta a ocultação registrada pelo Cheops (MORGADO *et al.*, 2022). O ruído causado pelo meio interestelar não foi considerado no simulador, por ser um ruído de baixa variância, não influenciando uma ocultação vista da superfície da Terra.

Figura 12 – Curva de Luz obtida por uma ocultação captada pelo satélite CHEOPS



Fonte: Morgado *et al.* (2022).

A maior parte do ruído existente em uma observação provém da atmosfera terrestre. A luz, ao entrar na atmosfera da Terra se depara com grande quantidade de partículas de formas e tamanhos diferentes, e assim acaba por sofrer desvios em sua direção de propagação, variações de fase, amplitude e intensidade. Cada uma dessas alterações gera um tipo diferente de ruído, os quais são descritos a seguir.

5.2.1 A atmosfera terrestre e seus efeitos sobre a luz

A atmosfera terrestre é composta por uma mistura de diferentes gases, sendo cerca de 78% gás Nitrogênio, 21% de gás Oxigênio e 1% de Argônio e outros gases, como vapor de água, ozônio e dióxido de carbono, os quais têm seus quantidades variáveis (SAHA, 2007). A

atmosfera apresenta propriedades físicas distintas, como pressão, temperatura, velocidade de vento, transparência (em função do comprimento de onda) e densidades diferentes em cada local. Estas discrepâncias acabam gerando áreas com diferentes índices de refração, fazendo com que os fótons incidentes mudem de direção, gerando efeitos de difração e interferência, causando o ruído atmosférico.

As variações do índice de refração são da ordem de 10^{-8} do valor nominal para o ar e essas mudanças são geradas pequenas variações na temperatura menores que 1°C (EDLÉN, 1966), causando variações na densidade do gás na região, alterando seu índice de refração e produzindo alterações na velocidade do vento, causando o movimento turbulento que vemos da superfície (TYSON, 2011). As mudanças no caminho dos fótons acabam se tornando flutuações de intensidade, espalhamento e deslocamento do feixe, gerando o ruído nas câmeras e as “tremulações” nos objetos celestes.

Parte dos fótons provenientes dos objetos celestes acabam sendo absorvidos, principalmente, pelas moléculas de água, gás carbônico, gás oxigênio e ozônio, e quando os fótons atingem essas moléculas transmitem sua energia e geram uma pequena variação de temperatura, ou levam a uma emissão de fóton pela molécula. Se o comprimento de onda do fóton for muito maior que as moléculas, acaba gerando o espalhamento, alterando sua direção sem ser absorvido (BELY, 2003).

Esses efeitos se acumulam gerando variação da luz que atinge o telescópio, tanto em intensidade quanto em posição, esse efeito é chamado turbulência atmosférica. Ela é gerada em camadas finas da atmosfera, com apenas alguns metros de profundidade (BELY, 2003). Os efeitos principais que ocorrem na observação das estrelas são dois. A cintilação da estrela, na qual a variação da intensidade do brilho ocorre devido principalmente a interferências aleatórias nas frentes de onda enquanto atravessam a atmosfera terrestre. O segundo efeito é o espalhamento aparente da estrela, tornando-a um disco e não um ponto (TYSON, 2011).

5.2.2 A modelagem da atmosfera terrestre

Modelar a atmosfera é um desafio complexo, inúmeras são as variáveis e suas relações, porém, como o objetivo do simulador é conter apenas a parte que gera ruído numa observação o modelo deve ser de turbulência atmosférica. Um dos modelos mais utilizados, o modelo de Kolmogorov, o qual utiliza a velocidade do movimento de um fluido para explicar a turbulência atmosférica. Nele a atmosfera é considerada um fluido, com comportamento turbulento.

A turbulência é gerada pela adição de energia cinética por variações de temperatura, pressão, velocidade, etc. Essa energia é adicionada em grandes estruturas turbulentas da atmosfera, de tamanho L_0 (denominado escala de comprimento), e acaba sendo transmitida para estruturas cada vez menores. Ao atingirem a menor estrutura turbulenta, com tamanho de escala interna l_0 , esta acaba por dissipar a energia na forma de calor. Nas maiores escalas, L_0 , (que podem variar de 2 m a 2 km) a turbulência é anisotrópica, e em escalas pequenas, l_0 ,

(variando de milímetros a centímetros) ela passa a ser isotrópica, possuindo as mesmas propriedades em todas as direções (SAHA, 2007).

A variação do índice de refração da atmosfera é uma das principais informações para determinar as variações que a luz sofre, porém ela não é simples de ser determinada, e depende diretamente da pressão e temperatura em cada região da atmosfera, sendo impossível determinar com precisão seus valores para todas as camadas em todas as regiões e altitudes da atmosfera. Um meio de evitar essa problemática é utilizar uma medida da intensidade da turbulência, ou seja, a “força” das variações do índice de refração, que é a constante de estrutura do índice de refração C_n^2 (TYSON, 2011). Seu valor varia com a altitude (h), condições locais da observação e tempo, variando em torno de um valor médio. Sendo possível, assim, determinar valores, com base em modelos obtidos experimentalmente. Um modelo para determinar o valor de C_n^2 em função da altitude é dado pela equação Equação 27.

$$C_n^2(h) = A \cdot \exp\left(\frac{-h}{H_A}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-h}{H_B}\right) + c \cdot h^{10} \cdot \exp\left(\frac{-h}{H_C}\right) + D \cdot \exp\left[-\frac{(h - H_D)^2}{2 \cdot w^2}\right] \quad (27)$$

Esse modelo (Equação 27) recebe o nome de Hufnagel-Valley, no qual cada termo (A , B , C e D) são modelagens diferentes para cada camada da atmosfera que ao serem combinadas resultam em um perfil mais próximo da realidade. O termo “ A ” é o coeficiente para as camadas próximas da superfície, com “ H_A ” sendo a altura na qual o coeficiente decai com $1/e$, sendo “ e ” o número de Euler. “ B ” e “ H_B ” tratam da turbulência da troposfera até cerca de 10 km de altitude, enquanto “ C ” e “ H_C ” definem o pico da turbulência existente na tropopausa e por fim “ D ” e “ H_D ” se relacionam a camadas isoladas específicas e “ w ” define a largura dessas camadas (HARDY, 1998). Considerando que a tropopausa se estende até cerca de 20 km de altitude, para determinação do C_n^2 é realizada a integração da altitude do observador até a tropopausa, uma vez que a densidade do gás nas camadas superiores é tão baixa que não geram variações relevantes na frente de onda. Todas essas variáveis dependem diretamente do comprimento de onda que se utiliza, tornando-se um processo cada vez mais complexo para ser modelado.

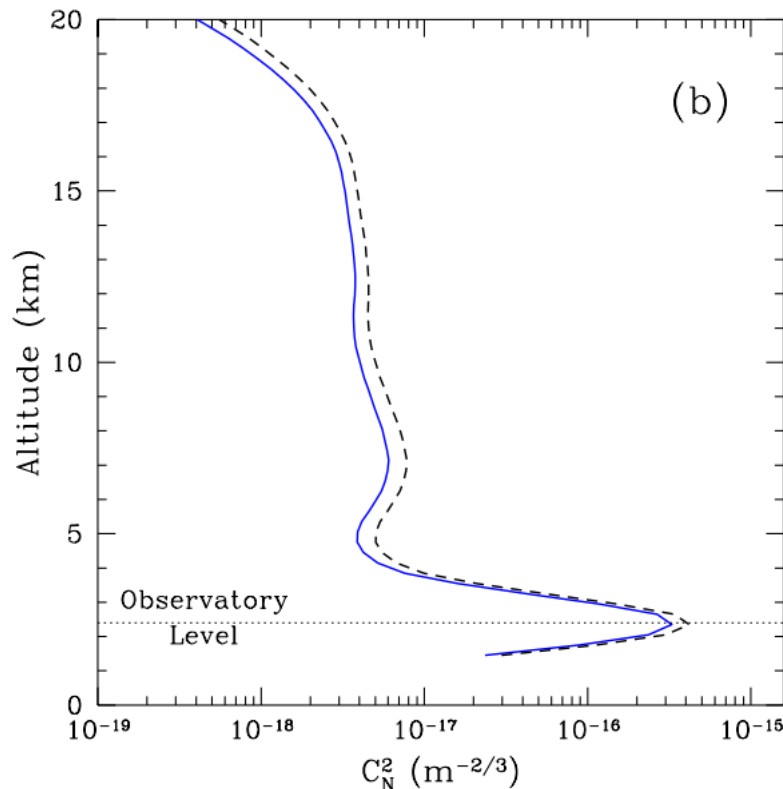
Estes termos e coeficientes foram determinados de maneira empírica e tabelados por Hardy (1998) para comprimento de onda de $0.5 \mu\text{m}$, permitindo a modelagem do perfil de C_n^2 (Tabela 2). Resultados similares foram apresentados por outros autores como (SAHA, 2007) e (TYSON, 2011).

Os principais sitios de observação do mundo já possuem estudos detalhados sobre o perfil de turbulência atmosférica, permitindo que os observadores já utilizem valores mais precisos de C_n^2 para ajustes observacionais. Existem diferentes métodos para determinar este perfil, como o SCIDAR (*Scintillation Detection and Ranging*) que analisa a distribuição da intensidade da luz no telescópio ao observar uma estrela dupla, fornecendo informações sobre a distribuição de turbulência em diferentes altitudes (GARCÍA-LORENZO; J., 2011). No entanto, em

condições onde a observação de estrelas duplas não é viável, pode-se empregar uma técnica similar, o SSS (*Single Star Scidar*) (LIU *et al.*, 2015), que utiliza funções de autocorrelação e correlação cruzada espaço-temporal de imagens de exposição inferior a 1 ms de uma única estrela para recuperar o perfil vertical da intensidade da turbulência.

A partir dessas técnicas, é possível obter múltiplos perfis de turbulência para um determinado sítio de observação. A caracterização final geralmente é feita através da mediana desses perfis, resultando em uma curva que representa o comportamento médio do sítio. A Figura 13 ilustra um exemplo desse perfil, obtido para o observatório de Roque de los Muchachos. A linha sólida corresponde a mediana dos perfis obtidos, e a pontilhada a mediana dos perfis individuais não calibrados.

Figura 13 – Perfil de turbulência de Roque de los Muchachos Observatory



Fonte: (GARCÍA-LORENZO; J., 2011).

Os perfis de turbulência dos sítios podem ser utilizadas no SOS, desde que os valores de C_n^2 sejam conhecidos. Alternativamente é possível simular a turbulência atmosférica por outros métodos, como o uso do SOAPY (ANDREW, 2016), um simulador em Python voltado à óptica adaptativa, que permite a modelagem da atmosfera com base nos parâmetros observacionais. No entanto, esse tipo de simulação não fornece diretamente os valores de C_n^2 , mas sim a evolução da frente de onda ao longo da propagação na atmosfera. Com o simulador apresentado nesse trabalho, é possível estimar diretamente a turbulência atmosférica para os mais diferentes sítios de observação, incluindo aqueles que não possuem uma caracterização da atmosfera detalhada.

Tabela 2 – Características previstas para o Planeta 9

MODELO	A ($\times 10^{-15}$)	H_A (m)	B ($\times 10^{-17}$)	H_B (m)	C ($\times 10^{-53}$)	H_C (m)	D ($\times 10^{-16}$)	H_D (m)	r_0 (m)	FWHM (segundo de arco)
H	0	-	27	1500	5.94	1000	0	-	0.11	1.15
HV 5-7	17	100	27	1500	3.59	1000	0	-	0.05	2.5
HV 10-10	4.5	100	9	1500	2.00	1000	0	-	0.10	1.26
HV 15-12	2.0	100	7	1500	1.54	1000	0	-	0.15	0.84
Mauna Kea (1)	0	-	1	3000	1.63	1000	0	-	0.34	0.36
Mauna Kea (2)	0	-	1	3000	1.63	1000	1	6500	0.24	0.53

Mauna Kea (1) modela a turbulência de fundo (excelente *seeing*).

Mauna Kea (2) inclui a camada dominante de turbulência (*seeing* mediano).

Fonte: Hardy (1998) adaptado.

Dentre os parâmetros apresentados na tabela, ainda é necessário descrever as duas variáveis “ r_0 ” e “FWHM”, pois a partir delas será possível determinar qual modelo de turbulência será utilizado para uma dada circunstância observacional. O “FWHM” (do inglês, *Full Width at Half Maximum*) representa o “*seeing*”, ou seja, o efeito de distorção sofrido pela luz nas diferentes camadas da atmosfera, espalhando um objeto pontual e formando um objeto espalhado (SAINT-JACQUES, 1998). O “ r_0 ” é o parâmetro de Fried ou comprimento de coerência, definido como o raio máximo de um coletor circular, que produziria uma imagem com o mesmo limite de difração de uma imagem de uma fonte pontual, que a atmosfera produziria com um espelho de tamanho infinito (SAHA, 2007) ou, de forma mais simples, o raio máximo que um instrumento poderia ter antes que as distorções atmosféricas limitem seriamente seu desempenho (TYSON, 2011).

Como o “*seeing*” é um valor típico e simples de se obter em observações astronômicas, tornou-se a referência para o modelo de turbulência a ser utilizado. Ao adicionar o valor do *seeing* o programa busca o valor mais próximo na tabela e utiliza os valores das variáveis para calcular o C_n^2 , integrando para valores de altitude de 0 a infinito. Uma vez determinado o C_n^2 , são realizados outros cálculos para determinar as variações que os fótons sofrem na atmosfera.

Os efeitos de turbulência são dois principais, a variação do brilho do astro, gerando aumento e redução da luminosidade, e o espalhamento da imagem, formando um disco ao invés de uma imagem pontual. Dentre esses efeitos, o mais relevante, para determinar o ruído ao longo do tempo, é a variação da intensidade luminosa do astro. O efeito de espalhamento é mitigado em uma observação de ocultação estelar, uma vez que utiliza-se a técnica de fotometria de abertura. Como descrito, na fotometria de abertura contabiliza-se todo o fluxo da estrela numa área, mesmo que esteja espalhado. Este efeito pode ser relevante para objetos fracos, pois o fluxo do objeto pode acabar em meio ao ruído de fundo.

A variação da intensidade luminosa ocorre em duas condições, a primeira com alteração da amplitude da onda incidente, modificando o fluxo. A segunda é a variação da fase da onda, gerando situações de interferência das ondas incidentes, tanto destrutiva quanto construtiva, combinando as interferências se obtêm um sinal variável da luz. Cada situação possui

um tratamento estatístico para a modelagem no simulador, não sendo possível determinar os parâmetros a cada instante. Nos próximos subcapítulos apresentam-se individualmente cada efeito e sua modelagem para o simulador.

5.2.2.1 Efeito da variação da amplitude

Supondo que a frente de onda que atinge a atmosfera da Terra seja plana, células de turbulência muito maiores que o tamanho de escala l_0 , promovem alterações na amplitude dessas frentes de onda (TYSON, 2011). Estas alterações podem ser descritas como uma variância no logaritmo da amplitude (σ_X^2), descrita pela Equação 28.

$$\sigma_X^2 = 0,307 \cdot K^{7/6} \cdot L^{11/6} \cdot C_n^2 \quad (28)$$

Onde “ L ” a distância de propagação, que podemos considerar apenas como a camada da troposfera, ou seja, em torno de 20 km e k é o número de onda dado por $k = 2 \cdot \pi / \lambda$. Tal equação só é válida para variância do log da amplitude menor que 0.3.

Para realizar a contagem de fótons, com a Equação 10, primeiro determina-se a amplitude da onda incidente, depois aplica-se o logaritmo natural sobre ela. Utilizando a Equação 28, para calcular a variância e em seguida determinar a intensidade da onda aplicando uma distribuição normal com o valor do fluxo calculado e a variância determinada.

Muitos sistemas de óptica adaptativa não consideram essa variação, por conta da sua baixa variância, ocasionando um pequeno erro no sistema. Porém em situações que exigem maior precisão, como a detecção de exoplanetas ou objetos semi transparentes como anéis, o valor torna-se relevante (SAHA, 2007). A Figura 14 ilustra uma simulação apenas com a variação da amplitude em condições de grande turbulência ($seeing = 2,5$, na Tabela 2).

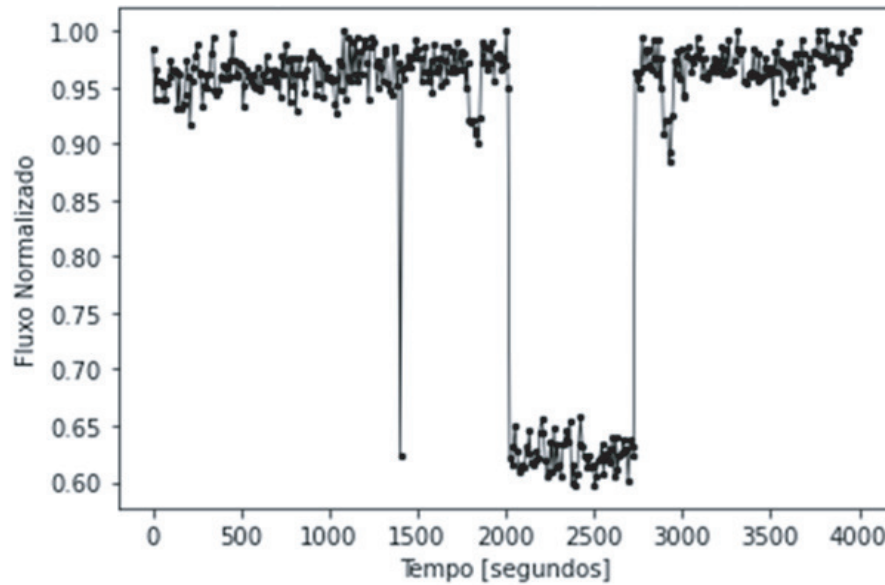
5.2.2.2 Efeito da variação da fase

Os feixes de luz paralelos, provenientes da estrela ou do corpo, atingem a atmosfera da Terra apresentando uma diferença de fase dada pela distância entre os feixes e a diferença do índice de refração (TYSON, 2011). E ao atravessarem mais camadas essas diferenças podem acabar se acentuando, com um tratamento estatístico, e algumas considerações, se obtém a Equação 29, determinando a variância da fase (σ_ϕ^2) de onda sobre uma abertura (D) circular (SAINT-JACQUES, 1998).

$$\sigma_\phi^2 = 1,03 \cdot \left(\frac{D}{r_0}\right)^{5/3} \quad (29)$$

Para cada fóton calcula-se a sua fase, após um intervalo de tempo (uma exposição), tem-se a intensidade final considerando a interferência das ondas. Sendo que uma mudança

Figura 14 – Simulação contendo apenas o ruído da variação de amplitude como ruído atmosférico

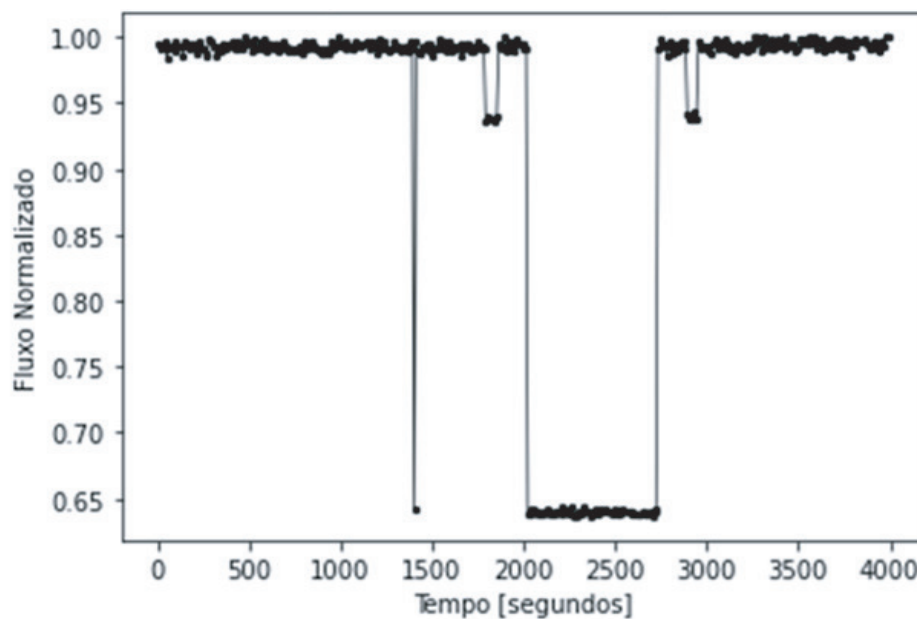


Fonte: Autoria própria (2024).

de fase em π radianos provoca uma interferência totalmente destrutiva, caso a mudança seja um múltiplo de 2π a interferência será totalmente construtiva, e valores intermediários levarão à interferência parcial.

Essa interferência não é tão relevante como a amplitude, porém ainda é responsável por parte do ruído atmosférico gerado em observações. A Figura 15 ilustra uma simulação utilizando a variação de fase como ruído atmosférico, na situação com o maior *seeing* tabelado.

Figura 15 – Simulação contendo apenas o ruído da variação de amplitude como ruído atmosférico



Fonte: Autoria própria (2024).

Os demais ruídos simulados, como o *dark*, foram aplicados nos fótons que atingem a CCD em uma distribuição de Poisson.

6 SIMULAÇÕES DE OCULTAÇÕES ESTELARES

A partir da construção do simulador de ocultações estelares (SOS), considerando as variáveis e ruídos acima descritos, escolheu-se simular um evento efetivamente observado, bem como situações limites para casos simulados do P9.

6.1 Simulação de uma ocultação observada

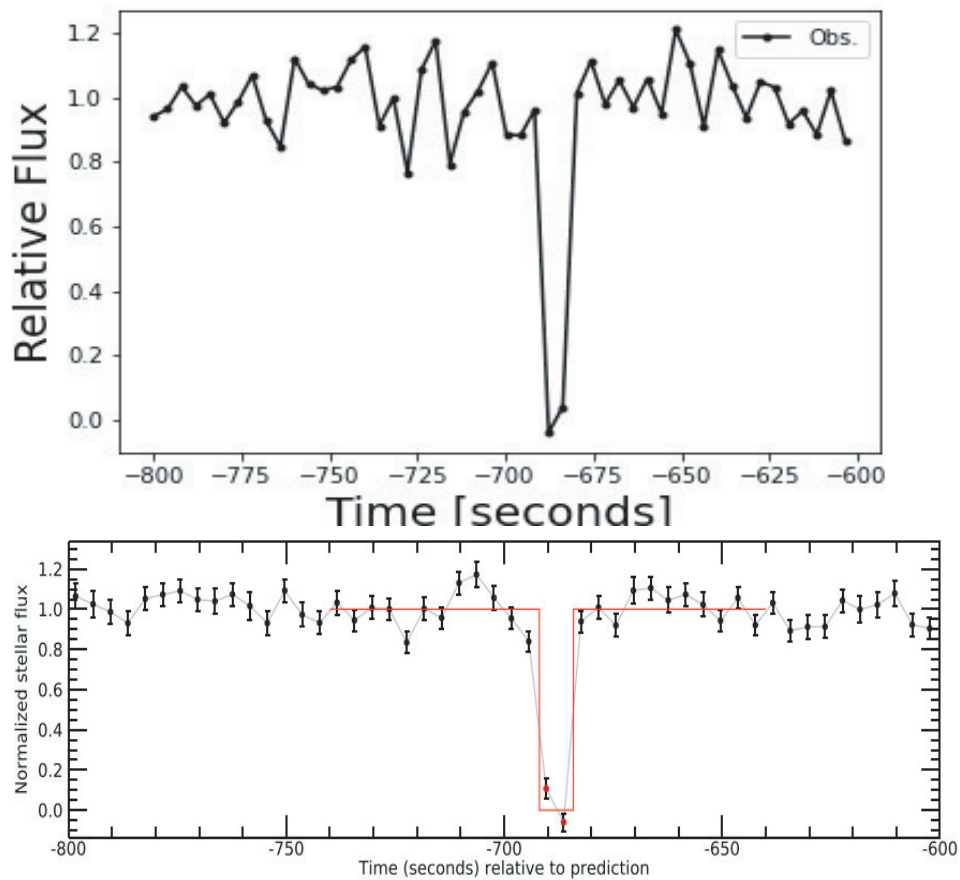
Em 2018 uma ocultação pelo objeto transnetuniano (541132) Leleākūhonua foi detectada, apesar da sua recente descoberta. Trata-se de um objeto distante, localizado a 78,5 UA, com uma baixa magnitude $V = 24,6$, e, à época, com grande incerteza sobre a sua órbita, e poucas informações sobre as propriedades físicas do alvo. Por este contexto, este evento foi escolhido por se assemelhar em algumas características ao que se espera quando o P9 for descoberto, servindo como um teste realista de validação do simulador. A ocultação é apresentada na Figura 16, sendo o gráfico inferior resultado da ocultação real e o superior resultado do simulador.

A ocultação real pelo objeto foi detectada por um único observador, as informações apresentadas em (BUIE *et al.*, 2020) foram utilizadas para gerar a simulação considerando os parâmetros geométricos. Um ruído com desvio padrão de 0,25 em fluxo foi adicionado para gerar uma curva de luz mais próxima da real possível. Os resultados apresentados em Gomes-Ferrante & Braga-Ribas (2023) (Anexo A), se mostraram similares aos reais, mostrando-se uma ferramenta eficiente para simulações de ocultações.

Usando os parâmetros geométricos e instrumentais do evento, fornecidos em (BUIE *et al.*, 2020), foi simulado a curva de luz assumindo diferentes valores de *seeing*. Os parâmetros apresentados no artigo usados para a simulação foram: velocidade da ocultação 24 km/s, telescópio com abertura de 30 cm e $f/6,3$, resultando numa escala de placa de 0,7"/pixel, com binagem de 2x2, tempo de exposição de 4 segundos, sem tempo de morto, ganho de 0,116 e⁻/ADU e ruído de leitura de 2,5 e⁻. O objeto localizado a 78,7 UA, com magnitude de 24,6 e a estrela com magnitude G 14,5. Para o ruído de céu no trabalho original não estão presentes informações acerca das condições atmosféricas em detalhes, nem mesmo o *seeing* do local, dessa forma foram testados diferentes valores para se determinar o mais próximo da curva de luz original, obtendo como resultado o valor do *seeing* de 1,3 como o mais comparável à ocultação real, como pode ser visto na Figura 17.

Dessa forma, pensando na possível descoberta do P9, foram geradas simulações que relacionam as características previstas por (BROWN; BATYGIN, 2016), (BROWN; BATYGIN, 2021) e (Toth, I., 2016) já apresentadas na Tabela 1.

Figura 16 – Gráfico de uma ocultação simulada para Leleākūhonua e abaixo a curva de luz original



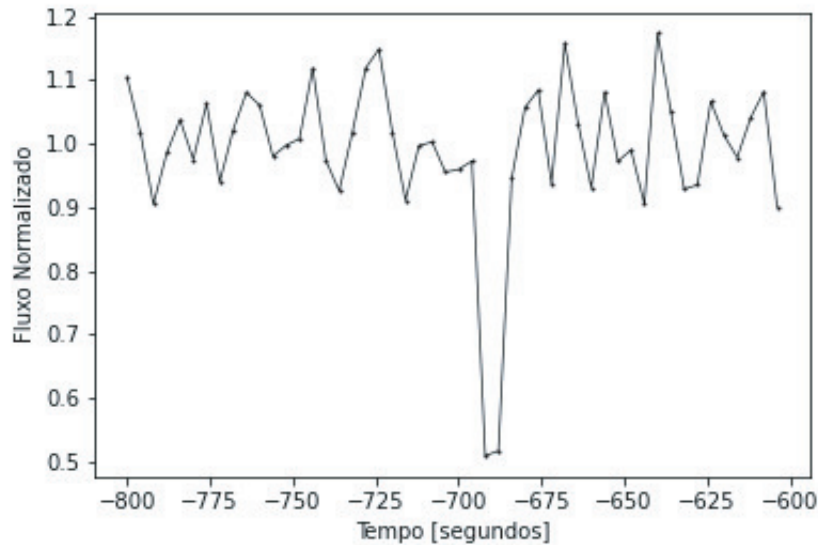
Fonte: Autoria própria (2023).

6.2 Simulando ocultações pelo P9

Simulações foram geradas combinando as características previstas, permitindo uma visão geral sobre o que podemos esperar de uma ocultação estelar pelo P9. Para uma melhor visualização e definição dos parâmetros mais relevantes, primeiro foi elaborada uma tabela de correlação como indicativo de quais parâmetros apresentam maior relevância para detecção do evento, apresentada na Figura 18, criada usando a biblioteca Python Seaborn (WASKOM, 2021) com o Método de Spearman (SPEARMAN, 1904), no qual quanto mais próximo de 1 maior a correlação direta com as variáveis enquanto valores próximo de -1 indicam uma correlação inversa.

Foram também realizadas simulações de situações “especiais” do P9, na qual ele possui satélites e anéis. Os satélites utilizados na simulação possuem uma órbita e um tamanho similar aos satélites Miranda e Tritão. Já os anéis simulados são similares aos anéis densos de Urano e Netuno. Os dados dos anéis e dos satélites estão apresentados na Tabela 3, foram utilizados valores aproximados, apenas para comparação.

Figura 17 – Gráfico de uma ocultação simulada para Leleākūhonua com seeing 1,3



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 3 – Características dos anéis e satélites simulados para o Planeta 9

Característica	Miranda	Tritão	Anel Urano	Anel Netuno
Distância do P9 (km)	250.000	60.000	51.000	53.200
Espessura/Diâmetro (km)	500	2.700	20	113
Magnitude Absoluta / Profundidade Ótica	3,49	-1,25	0,5	0,006

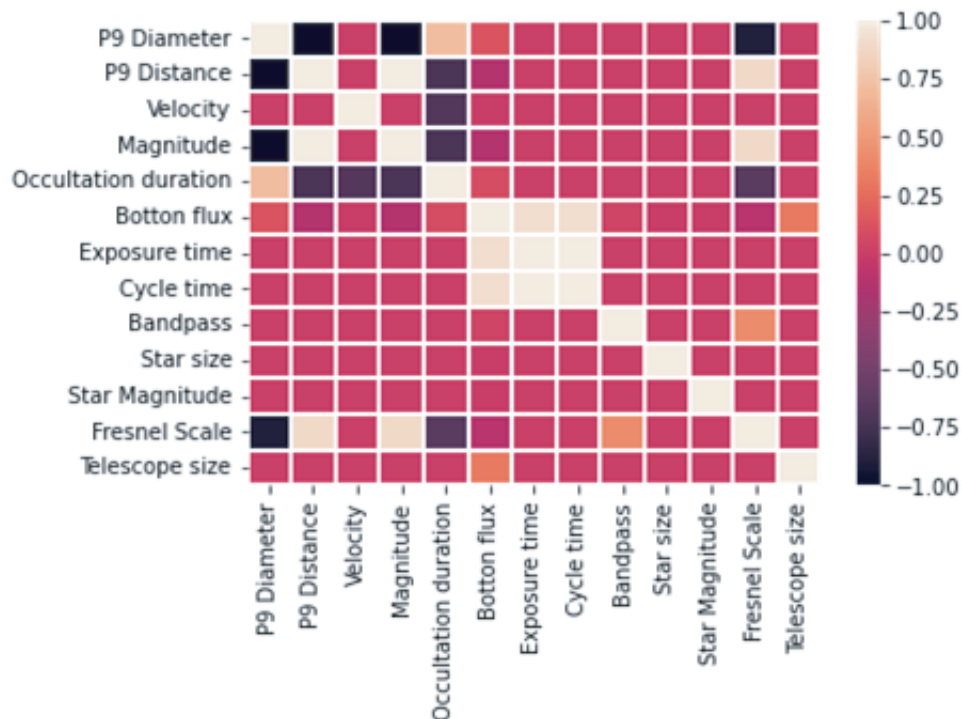
Uma vez que todos planetas gigantes possuem, bem como alguns TNOs (Haumea e Quaoar), é possível que o P9 também possua. Assim simulou-se a ocultação por possíveis anéis ao redor do P9. Da mesma maneira, simulou-se ocultações por possíveis satélites ¹. As ocultações simuladas cruzam o plano do anel e no equador do corpo e do satélite, fazendo com que se obtenha a maior corda do corpo, com a presença dos anéis nos dois lados do corpo e o satélite estando à distância equivalente ao seu semi-eixo orbital, resultando em uma detecção otimizada.

Diversas simulações foram realizadas, porém, considerando a relevância para a comunidade científica numa possível observação futura do corpo, apresentamos apenas as principais situações limites para a detecção do P9 e dos objetos nos seus arredores.

A primeira trata dos limites para detecção do corpo, a Figura 19 apresenta uma curva de luz para o P9, com 18.432 km de diâmetro, um satélite similar a Tritão, com 2.700 km, sendo ocultado por uma estrela de magnitude V 19. Nessa simulação buscou-se atingir o limite temporal para uma detecção clara do P9 e seu satélite, utilizando um telescópio de pequeno porte (0,5 m de diâmetro). Nessa situação foi possível detectar os corpos com um limite máximo

¹ A existência de um satélite pode trazer benefícios para detecção do corpo, pois a magnitude do conjunto Planeta – satélite, pode ser menor, se a superfície do satélite for coberta de gelo, o que é esperado para um corpo tão distante, facilitando sua detecção (CHAN, 2023).

Figura 18 – Tabela de correlação com parâmetros usados para simular as curvas de luz



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 4 – Parâmetros utilizados em simulações para o Planeta 9

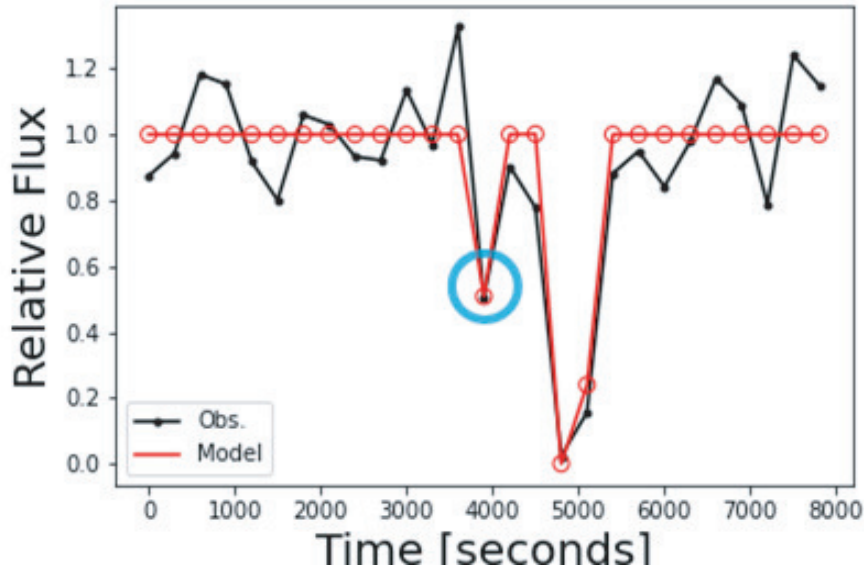
Diâmetros P9 (km)	18.432	19.548	20.665			
Distâncias P9 (UA)	240	300	520			
Magnitude aparente	19	21	25			
Diâmetro satélite	500	2.700				
Distância satélite-P9 (km)	60.000	250.000				
Magnitude da estrela	12	19	21			
Tamanho visual da estrela (km)	0,98	7,84				
Banda (μm)	5.000	5.500	6.000	6.500	7.000	7.500
Tempo de exposição (s)	0,1	1	10	50	100	300
Abertura telescópio (m)	0,5	1	1,5	2		
Distância focal (m)	0,5	1	2	4		
Diâmetro anel (km)	37.800	40.900	42.000	51.000	53.200	
Largura anel (km)	2	20	100	2.000	3.500	
Profundidade ótica	10^{-4}	0,1	0,5	1		
seeing	2,5	1,26	1,15	0,84	0,53	0,36
Binagem	1	2				
Escala de placa	1	1,5	2			

de 300 segundos de exposição, com o satélite sendo detectado pela queda próxima a 4.000 segundos e o corpo principal nos segundos próximos a 5.000. A queda de luz do satélite é destacada por um círculo azul, enquanto a queda do corpo é a subsequente.

A linha e círculos vermelhos apresentados na Figura 19, representam o ajuste do modelo de ocultação gerado usando o SORA (Software de Redução e Análise de Ocultações Estelares) (GOMES-JÚNIOR *et al.*, 2022) o qual considera os parâmetros geométricos de uma ocultação

por um objeto opaco, convoluído com tempo de exposição, o diâmetro aparente da estrela e a difração de Fresnel, fornecendo os instantes de início e final do evento.

Figura 19 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com anéis e um satélite, situação com ruído

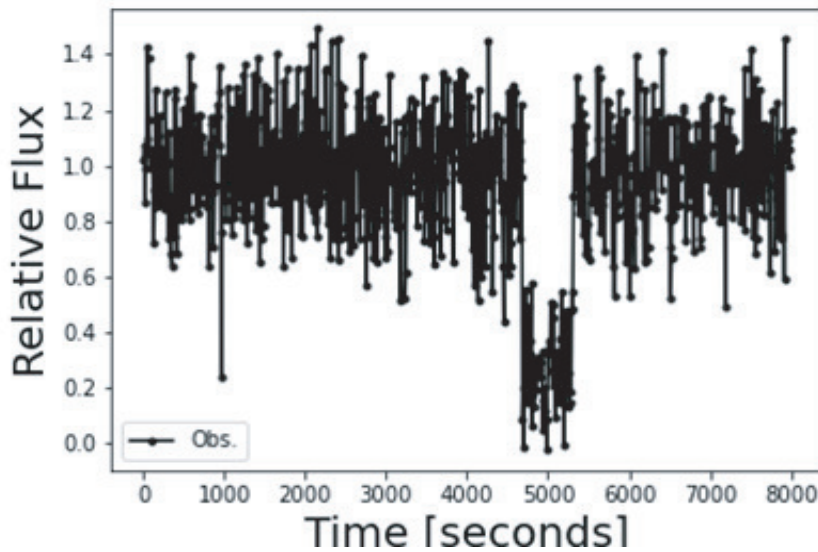


Fonte: Autoria própria (2023).

Outra simulação interessante se refere a detecção de um pequeno satélite similar a Miranda, na qual utiliza-se a um tempo de exposição de 10 s, conforme a Figura 20.

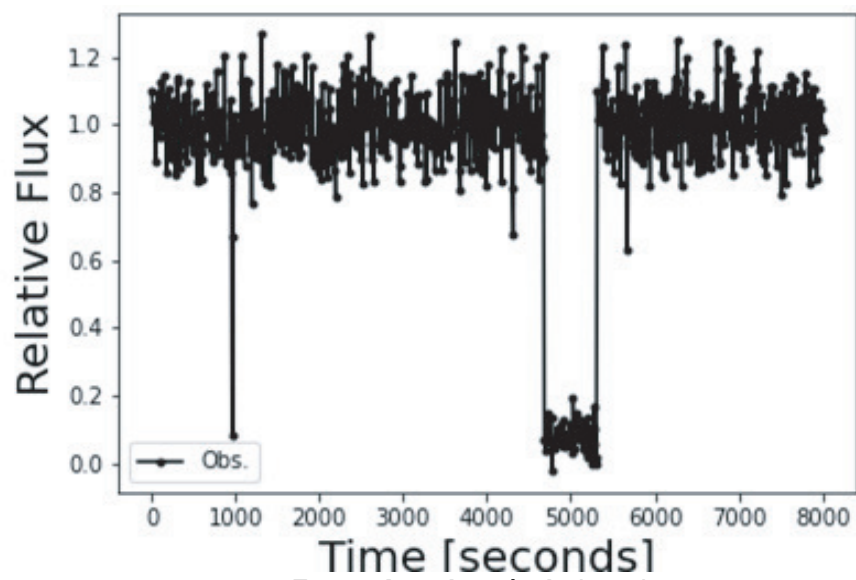
Quanto aos anéis, aqui simulados com profundidade óptica de 0.5, com 20 km de largura, as simulações mostram um limite para detecção com tempo de exposição de 0,1 s, utilizando um telescópio de 1 m de diâmetro, conforme a Figura 21.

Figura 20 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com um satélite, situação com ruído



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 21 – Gráfico de uma ocultação simulada pelo possível Planeta 9 com anéis e um satélite, situação com ruído



Fonte: Autoria própria (2023).

7 CONCLUSÃO

A origem e evolução do Sistema Solar pode ser investigada com a caracterização física dos objetos do Sistema Solar exterior. Neste contexto, os objetos Transnetunianos, por conta de um ambiente com baixa taxa colisional e distância ao Sol, mantiveram características físicas e superficiais com menor alteração desde a origem do sistema, se compararmos com aqueles mais próximos ao Sol. Um dos principais métodos de estudo desses corpos é a ocultação estelar, levando à caracterizações físicas dos corpos com precisão da ordem do km.

A detecção de novos corpos nessa região, os ETNOs, levou ao aprofundamento da hipótese da existência de um planeta ainda não descoberto no Sistema Solar, o Planeta 9. Caso venha a ser descoberto, suas propriedades físicas poderão ser determinadas via observações de ocultação estelar. Buscando uma melhor compreensão acerca do corpo é importante sabermos quais os principais parâmetros envolvidos, e o que podemos esperar de uma ocultação por esse possível corpo. Desse modo foi desenvolvido o Simulador de Ocultações Estelares (SOS), que permite antever as características e limites para detecção de curvas de luz de ocultação, considerando as características do evento, equipamentos e atmosféricas.

Para verificar os resultados dados pelo simulador, comparou-se os resultados do simulador à curva de luz real obtida quando da detecção do TNO (541132) Leleākūhonua, indicando uma concordância entre as curvas. Desse modo foram realizadas simulações com os parâmetros previstos para o P9, verificando os limites necessários, em termos da abertura do telescópio e tempo de exposição, para a detecção do P9, bem como para a detecção de possíveis anéis e satélites.

Devido ao grande número de variáveis possíveis envolvidas numa ocultação, sobretudo relacionados às propriedades desconhecidas sobre o P9, apresentamos a situação média. Utilizou-se como exemplo um telescópio de 0,5 m de abertura sob um *seeing* de 1,15, utilizando os valores mais prováveis para o P9 (BROWN; BATYGIN, 2021), incluindo um satélite similar a Tritão, um anel similar ao de Netuno e uma estrela de magnitude 19.

As simulações indicaram que, para detectar os anéis é necessário a utilização de um tempo de exposição de no máximo 0,1 segundos, exposições maiores tornam o anel indetectável. Para o satélite, o tempo limite de exposição é de aproximadamente 100 segundos, enquanto o corpo principal ainda é detectado com exposições de 300 segundos.

Com um *seeing* de 2,5 o corpo principal permanece evidente em exposições 300 segundos, no entanto o satélite só é detectável com exposições de até, e os anéis não são mais visíveis em exposições de 0,1 segundos ou superiores.

Estes resultados poderão ser utilizados pela comunidade para planejar eventuais observações de ocultação pelo P9, considerando cenários compatíveis com telescópios similares aos usados colaboradores em outras ocultações.

Vale ressaltar, também, que tais resultados dependem diretamente das situações de observação do local e das condições atmosféricas, que pode apresentar um comportamento di-

ferente dos simulados, principalmente por não conter todos os detalhes existentes da atmosfera e outros problemas existentes em uma observação real.

Para uma maior precisão nas simulações, é importante que, sempre que possível, sejam utilizados os dados da caracterização da turbulência atmosférica do sítio de observação. Trabalhos como (TOKOVININ; TRAVOUILLO, 2006) apresentam a modelagem da turbulência em Cerro Pachón, (ELS *et al.*, 2009) apresenta os valores para Cerro Tololo, (GARCÍA-LORENZO; J., 2011) para o observatório de Roque de los Muchachos. Tais caracterizações permitem obter valores mais precisos de C_n^2 , resultando em simulações mais realistas das condições observacionais.

De toda maneira o simulador apresentou um bom desempenho, sendo que alguns efeitos podem vir a ser considerados para torná-lo ainda mais preciso, como:

- contagem de fótons para o fundo de céu, a partir de uma magnitude dada;
- calculo da dependência do ângulo zenital na de contagem de fótons por conta de efeitos atmosféricos, como a extinção;
- simulação de ocultação por atmosferas;
- projeção do corpo e anéis na ocultação conforme seu ângulo de aspecto;
- distribuição dos fótons na CCD seguindo distribuição de Poisson;
- possibilidade de utilização do perfil de turbulência do sítio.

Apesar das limitações existentes, o simulador pode apresentar algumas das principais características de uma curva de luz de ocultação promovida pelo P9. Estes resultados foram apresentados em um artigo publicado em 2023, Anexo A, na “*The European Physical Journal Special Topics*”, intitulado “*Stellar Occultation Simulator: application to Planet 9*” (GOMES-FERRANTE; BRAGA-RIBAS, 2023).

O SOS esta disponível via *github* (<https://github.com/FerranteWellington/SOS>) para ser utilizado pela comunidade, permitindo assim, que se torne uma ferramenta para auxílio de astrônomos amadores ou profissionais, que busquem ter mais informações de uma ocultação estelar futura.

REFERÊNCIAS

- ANDREW, R. Soapy: an adaptative optics simulation written purely in python for rapid concept development. **Adaptive Optics System V**, v. 9909, jul. 2016.
- ARBHEY, A.; AUFFINGER, J.; SILK, J. Primordial kerr black holes. *In*: MEDIALAB, S. (Ed.). **Proceedings of 40th international conference on high energy physics - Pos(Ichep2020)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 585.
- ASSAFIN, M. *et al.* Precise predictions of stellar occultations by pluto, charon, nix and hydra for 2008-2015. **Astronomy and Astrophysics**, v. 515, p. A32, jun. 2010.
- BAILEY, E.; BROWN, M. E.; BATYGIN, K. Feasibility of a resonance-based planet nine search. **The Astronomical Journal**, v. 156, n. 2, p. 74, jul. 2018.
- BANNISTER, M. T. *et al.* Ossos. vii. 800+ trans-neptunian objects - the complete data release. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 236, n. 1, p. 18, 2018.
- BARUCCI, M. A. *et al.* **The Solar System Beyond Neptune**. [S.l.]: Tucson: University of Arizona Press, 2008. ISBN 9780816527557.
- BATYGIN, K. *et al.* The planet nine hypothesis. **Physics Reports**, v. 805, n. 2, p. 1–53, 2019.
- BATYGIN, K.; BROWN, M. E. Evidence for a distant giant planet in the solar system. **The Astronomical Journal**, v. 151, n. 2, p. 22, jan. 2016.
- BELLE, G. T. van. Predicting stellar angular sizes. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 111, n. 766, p. 1515–1523, 1999.
- BELY, P. Y. **The Design and Construction of Large Optical Telescopes**. New York, USA: Springer, 2003. ISBN 0387955127.
- BERNARDINELLI, P. H. *et al.* Trans-neptunian objects found in the first four years of the dark energy survey. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 247, n. 1, p. 32, mar. 2020.
- BOLTE, M. **AY257: Modern Observational Techniques**. 2006. Disponível em: https://www.ucolick.org/~bolte/AY257/ay257_1.pdf. Acesso em: 18 nov. 2022.
- BRAGA-RIBAS, F. *et al.* A ring system detected around the centaur (10199) chariklo. **Nature**, v. 508, n. 7494, p. 72–75, mar. 2014.
- BROMLEY, B. C.; KENYON, S. J. Making planet nine: a scattered giant in the solar system. **The Astrophysical Journal**, v. 826, n. 1, p. 64, jul. 2016.
- BROWN, M. E. Observational bias and the clustering of distant eccentric kuiper belt objects. **The Astronomical Journal**, v. 154, n. 2, p. 65, jul. 2017.
- BROWN, M. E.; BATYGIN, K. Observational constraints on the orbit and location of planet nine in the outer solar system. **The Astrophysical Journal letters**, v. 824, n. 2, p. L23, jun. 2016.
- BROWN, M. E.; BATYGIN, K. Orbital clustering in the distant solar system. **The Astronomical Journal**, v. 157, n. 2, p. 62, jan. 2019.
- BROWN, M. E.; BATYGIN, K. The orbit of planet nine. **The Astronomical Journal**, v. 162, n. 5, p. 219, 2021.

- BROWN, M. E.; TRUJILLO, C.; RABINOWITZ, D. Discovery of a candidate inner oort cloud planetoid. **The Astrophysical Journal**, v. 617, n. 1, p. 645–649, 2004.
- BUIE, M. W. *et al.* A single-chord stellar occultation by the extreme trans-neptunian object (541132) leleākūhonua. **The Astronomical Journal**, v. 159, n. 5, p. 230, 2020.
- BUS, S. J. *et al.* Stellar occultation by 2060 chiron. **Icarus**, v. 123, n. 2, p. 478–490, 1996.
- CHAN, M. H. What if planet nine has satellites? **The Astrophysical Journal**, v. 944, n. 2, p. 172, 2023.
- EDLÉN, B. The refractive index of air. **Metrologia**, v. 2, n. 2, p. 71–80, 1966.
- ELS, S. G. *et al.* Four year of optical turbulence monitoring at the cerro tololo inter-american observatory (ctio). **The Astronomical Society of the Pacific**, v. 121, p. 922–934, 2009.
- GARCÍA-LORENZO, B.; J., F. J. Atmospheric optical-turbulence at roque de los muchachos observatory: database and recalibration of the generalized-scidar data. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 416, n. 3, p. 2123–2129, 2011.
- GLADMAN, B.; MARSDEN, B. G.; VANLAERHOVEN, C. Nomenclature in the outer solar system. *In*: BARUCCI, M. A. (Ed.). **The Solar System Beyond Neptune**. [S.l.]: Tucson: University of Arizona Press, 2008. p. 43–57.
- GOMES-FERRANTE, W.; BRAGA-RIBAS, F. Stellar occultation simulator: application to planet 9. **The European Physical Journal Special Topics**, v. 232, p. 18–19, 2023.
- GOMES-JÚNIOR, A. *et al.* Sora: Stellar occultation reduction and analysis. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 511, n. 1, p. 1167–1181, mar. 2022.
- GOMES, R. S.; SOARES, J. S.; BRASSER, R. The observation of large semi-major axis centaurs: Testing for the signature of a planetary-mass solar companion. **Icarus**, v. 258, p. 37–49, 2015.
- GUILBERT, A. *et al.* Eso-large program on tnos: Near-infrared spectroscopy with sinfoní. **Icarus**, v. 201, n. 1, p. 272–283, mar. 2009.
- GULBIS, A. A. S. *et al.* Observation of a successive stellar occultation by charon and graze by pluto in 2011: Multiwavelength spex and moris data from irtf. **Icarus**, v. 246, p. 226–236, jan. 2015.
- HARDY, J. W. **Adaptive Optics for Astronomical Telescopes**. New York, USA: Oxford University Press, 1998. 448 p. ISBN 9780195090192.
- HOLMAN, M. J.; PAYNE, M. J. Observation constraints on planet nine: Cassini range observations. **The Astronomical Journal**, v. 152, n. 4, p. 94, 2016.
- HOWELL, S. B. **Handbook of CCD Astronomy**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 222 p. ISBN 9780511807909.
- KENYON, S. J.; BROMLEY, B. C. Omaking planet nine: pebbles accretion at 250 - 750 au in a gravitational unstable ring. **The Astrophysical Journal**, v. 825, n. 1, p. 33, jun. 2016.
- KERVELLA, P. *et al.* The angular sizes of dwarf star and subgiants. **AA**, v. 426, n. 1, p. 297–307, 2004.
- LAWRENCE, S.; ROGOSZINSKI, Z. **The Brute-Force Search for Planet Nine**. 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2004.14980>.

- LIU, L.-Y. *et al.* Optical turbulence characterization at lamost site: Observation and models. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 451, n. 3, p. 3299–3308, 2015.
- MADIGAN, A.-M.; MCCOURT, M. A new inclination instability reshapes keplerian discs into cones: application to the outer solar system. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 457, n. 1, p. L89–L93, 01 2016. ISSN 1745-3925. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slv203>.
- MALHOTRA, R.; KATHRYN, V.; WANG, X. Corraling a distant planet with extreme resonant kuiper belt objects. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 824, n. 2, p. 22, jun. 2016.
- MARGOTI, G. **Determinação da forma tridimensional de (50000) Quaoarpor ocultações estelares utilizando algoritmo genérico para minimização**. 2024. 208 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.
- MCLEAN, I. S. **Electronic Imaging in Astronomy**. [S.l.]: Springer Praxis Publishing, 208.
- MILLHOLLAND, S.; LAUGHLIN, G. Constraints on planet nine's orbit and sky position within a framework of mean-motion resonances. **The Astronomical Journal**, v. 153, n. 3, p. 91, fev. 2017.
- MORGADO, B. E. *et al.* A stellar occultation by the transneptunian object (50000) quaoar observed by cheops. **AA**, v. 664, p. L15, 2022.
- MORGADO, B. E. *et al.* A dense ring of the trans-neptunian object quaoar outside its roche limit. **Nature**, v. 614, p. 239–243, fev. 2023.
- MUSTILL, A. J.; RAYMOND, S. N.; DAVIES, M. B. Is there an exoplanet in the solar system? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 460, n. 1, p. L109–L113, 04 2016. ISSN 1745-3925. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slw075>.
- OLIVEIRA, J. M. *et al.* Constraints on the structure and seasonal variations of triton's atmosphere from the 5 october 2017 stellar occultation and previous observations. **AA**, v. 659, p. 136, mar. 2022.
- Ortiz, J. L. *et al.* Changing material around (2060) chiron revealed by an occultation on december 15, 2022. **AA**, v. 676, p. L12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347025>.
- ORTIZ, J. L. *et al.* The size, shape, density and ring of the dwarf planet haumea from a stellar occultation. **Nature**, v. 550, p. 219–223, 2017.
- PARKER, R. J.; LICHTENBERG, T.; QUANZ, S. P. Was planet 9 captured in the sun's natal star-forming region? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 472, n. 1, p. L75–L79, 09 2017. ISSN 1745-3925. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slx141>.
- PEREIRA, C. L. **Tamanho e forma do Centauro (2060) Chiron e a busca por estruturas em seu entorno a partir de ocultações estelares**. 2020. 106 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- Pereira, C. L. *et al.* The two rings of (50000) quaoar. **AA**, v. 673, p. L4, 2023.
- PRAVEC, P.; HARRIS, A. Binary asteroid population: 1. angular momentum content. **Icarus**, v. 190, n. 1, p. 250–259, 2007. ISSN 0019-1035. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103507001388>.
- PRIALNIK, D.; BARUCCI, M. A.; YOUNG, L. A. **The Trans-neptunian Solar System**. [S.l.]: Elsevier, 2020. ISBN 9780128164907.

PROJECT, L. **LSST Science Book**. LSST Science Collaborations, 2009. Disponível em: https://www.lsst.org/sites/default/files/docs/sciencebook/SB_Whole.pdf. Acesso em: 31 out. 2024.

RICE, M.; LAUGHLIN, G. The case for a large-scale occultation network. **The Astronomical Journal**, v. 158, n. 1, p. 19, jun. 2019.

ROMMEL, F. L. **Posição de objetos centauros e transnetunianos através de ocultações estelares na era GAIA**. 2018. 138 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

Rommel, F. L. *et al.* A large topographic feature on the surface of the trans-neptunian object (307261) 2002 ms4 measured from stellar occultations. **AA**, v. 678, p. A167, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346892>.

ROQUES, F.; MONCUQUET, M.; SICARDY, B. Stellar occultations by small bodies - diffraction effects. **The Astronomical Journal**, v. 93, p. 1549–1558, 1987.

SAHA, S. K. **Diffraction-Limited Imaging with Large and Moderate Telescopes**. [S.l.]: WORLD SCIENTIFIC, 2007. 636 p. ISBN 9789812707772.

SAINT-JACQUES, D. **Astronomical Seeing in Space and Time**. dez. 1998. 162 p. Tese (Doutorado) — University of Cambridge, Cambridge, dez. 1998.

SCHNEIDER, J. Measuring the radius and mass of planet nine. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 129, n. 980, p. 5, 2017.

SCHOLTZ, J.; UNWIN, J. What if planet 9 is a primordial black hole? **Physical Review Letters**, American Physical Society, v. 125, n. 5, p. 051103, jul. 2020. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.051103>.

SHANKMAN, C. *et al.* Ossos. ii. a sharp transition in the absolute magnitude distribution of the kuiper belt's scattering population. **The Astronomical Journal**, v. 151, n. 2, p. 31, jan. 2016.

SHEPARD, M. K. **Introduction to Planetary Photometry**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017.

SHEPPARD, S. S.; TRUJILLO, C. New extreme trans-neptunian objects: toward a super-earth in the outer solar system. **The Astronomical Journal**, v. 152, n. 6, p. 221, 2016.

SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. **The American Journal of Psychology**, University of Illinois Press, v. 15, n. 1, p. 72–101, 1904. ISSN 00029556.

STUART, J. S.; BINZEL, R. P. Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-earth objects. **Icarus**, v. 170, n. 2, p. 295–311, 2004. ISSN 0019-1035. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103504001265>.

TOKOVININ, A.; TRAVOUILLON, T. Model of optical turbulence profile at cerro pachón. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 365, n. 4, p. 1235–1242, fev. 2006.

Toth, I. Some physical properties predicted for the putative planet nine of the solar system. **AA**, v. 592, p. A86, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628444>.

TRUJILLO, C. A.; SHEPPARD, S. S. A sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units. **Nature**, v. 507, p. 471–474, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature13156>.

TYSON, R. K. **Principles of Adaptive Optics**. [S.l.]: CRC Press, 2011. 299 p. ISBN 9781439808597.

WASKOM, M. seaborn: statistical data visualization. **The Journal of Open Source Software**, The Open Journal, v. 6, n. 60, p. 3021, 2021.

YOUNG, L. A.; BRAGA-RIBAS, F.; JOHNSON, R. E. Chapter 6 - volatile evolution and atmospheres of trans-neptunian objects. *In*: PRIALNIK, D.; BARUCCI, M. A.; YOUNG, L. A. (Ed.). **The Trans-Neptunian Solar System**. Elsevier, 2020. p. 127–151. ISBN 978-0-12-816490-7. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128164907000060>.

ANEXO A – Artigo publicado



Stellar Occultation Simulator: application to Planet 9

Wellington Gomes-Ferrante^a  and Felipe Braga-Ribas^b

PPGFA/UTFPR-Curitiba, Federal University of Technology-Paraná, Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba, Paraná 80230-901, Brazil

Received 15 May 2023 / Accepted 9 November 2023 / Published online 7 December 2023

© The Author(s), under exclusive licence to EDP Sciences, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2023

Abstract Evidence suggests the existence of a ninth planet in the Solar System, with an orbit far beyond Neptune. This so-called “Planet 9” has not yet been directly observed, but gravitational effects can be noticed in objects known as trans-Neptunian objects (TNOs), those with a semi-major axis orbital greater than that of Neptune. Some of them present a clustering in relation to the perihelion argument, and from these data, numerical simulations were performed by Brown and Batygin (Astron J 162:219, 2021. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac2056>) indicating some orbital elements for Planet 9 so that, in the near future, the body may be detected. For a better understanding of the evolution and origin of the Solar System, a physical characterization of the body becomes necessary. One powerful observational technique for the study of TNOs is stellar occultation. A technique in which a body generates a shadow over the Earth as it passes in front of a background star, allowing it to determine, with kilometer accuracy, the shape, size, albedo and to sound for the existence of atmosphere, rings and satellites around the body. Thus, a code in Python was developed to simulate stellar occultation light curves by the Planet 9. The results are analyzed to understand the main parameters that influence the light curve construction so we can be better prepared for a future occultation by the body.

1 Introduction

Trans-Neptunian Objects (TNOs) are solar system objects located beyond Neptune. They are some of the bodies that least changed due to radiation or collisions of the Solar System and may have retained information about the origin and evolution of the Solar System. The stellar occultation technique has been used to study these objects. It consists of registering the flux of a background star while the object passes in front of it. Observers in different locations on Earth, observing the same event, measure different parts of the object's apparent profile, called chords. This allows for determining some relevant physical properties of the body, like its shape, size, albedo, and possibly density, if the 3D shape is extracted from the occultation. Searching for rings or satellites around the body [2] and even an atmosphere and [8] is also possible.

With the discovery of new Extreme TNOs (ETNOS), such as Sedna, and with the analyses of some centaurs, it was proposed that some distant planet is perturbing these bodies, promoting the alignment of their arguments of perihelia, as shown in Fig. 1. This proposal was made by Batygin and Brown [1], and the perturbing body was called Planet 9 (hereafter, P9). Other possible explanations for the observed clustering are (i) close stellar encounters in the early Solar System, (ii) minor planets suffering instability on the inclination around ~ 1 to 4 Gyr, increasing their inclination and developing the clustering [7].

Simulations on the influence of the putative planet and known ETNOS provided constraining on P9's mass, size, and orbit [3]. It is expected to have a 20% probability of being detected in the next ten years, using the 30 m telescopes [10].

If this Planet is found, further study will be needed to characterize its physical properties better. Here we propose the use of stellar occultation. With this in mind, we are developing a Stellar Occultation Simulator (SOS), which may be used for any kind of body in the Solar System. We aim to establish the needed conditions and limits to detect occultation by P9, putative satellites, and rings. Knowing the critical observational parameters it will

^a e-mail: wellingtonferrante@gmail.com (corresponding author)

^b e-mail: fribas@utfpr.edu.br (corresponding author)

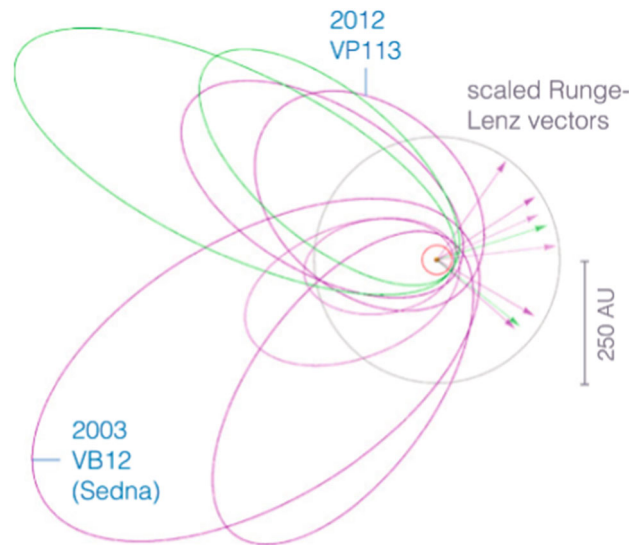


Fig. 1 Clustering of TNO orbits used to predict Planet 9 [1]

be possible to prepare the best observation possible. We are not considering here the prediction process, as this depends on good ephemeris, which can only be obtained from direct observations that can only be taken with big professional telescopes. Unlike the TNOs, a planetary body produces a shadow that is a few times the size of the Earth. So, in practice, all the Earth's hemisphere that can view the occultation star during the event can register the occultation by the planet.

2 Methods

The main objective is to create a simulated light curve considering different parameters from the star and the occulting body. The SOS is in development using Python, and the input parameters are the object's diameter, distance to the observer, geometric albedo (or magnitude), and shadow velocity (with respect to Earth); the magnitude of the occulted star (which is used to calculate its projected size), the band-pass of the observation; if a satellite and/or ring should also be simulated providing size, distance, and absolute magnitude or optical depth, respectively. Some additional information related to the observation, such as the exposure and cycle time, the acquisition interval, and the telescope diameter.

Simulations of stellar occultations by P9 are made to evaluate the correlation between the considered parameters. The simulated parameters related to the planet's physical and orbital properties, the occulted star, and the instruments and observation are presented in Table 1.

The most relevant parameters are easily extracted from these simulations with a correlation table (Fig. 2), created using Seaborn [13] in Python with Spearman method [11].

Table 1 Input parameters for the simulated light curves

P9 Diameter [km] ^a	18432	19548	20665			
P9 Distance [au] ^a	240	300	520			
P9 V magnitude ^b	19	21	25			
Star V magnitude	12	19	21			
Exposure time [s]	0.1	1	10	50	100	300
Telescope size [m]	0.5	1				
Bandpass [μm]	5000	5500	6000	6500	7000	7500

^aBrown and Batygin [3]

^bToth [12]

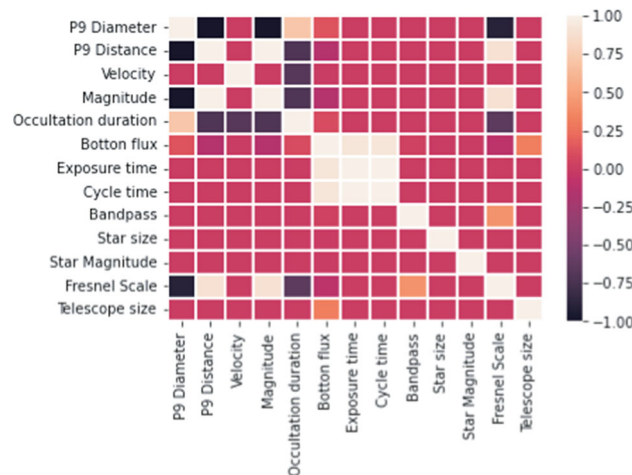


Fig. 2 Correlation table with all parameters used to simulate the light curves, using the Spearman's test where it is possible to see which are the most relevant parameters to detect an occultation by P9. Large absolute values show a larger correlation between the parameters, whereas the negative sign shows an inverse correlation

Just after the announcement of the discovery of this big ETNO (541132) Leleākūhonua, an effort was made to observe a stellar occultation to determine its size better. This produced a positive observation published by Buie et al [4]. Using it as a testable case, we simulated the occultation light curve using the same parameters as the observed event: an object with 110 km in radius, at a distance of 77.7 au, with 24 km s^{-1} , a star with V magnitude of 14.7 and a body with 24.6, a 30 cm telescope in diameter, an exposure time of 4 s, with a standard deviation of 0.25 in flux. Figure 3 compares the real occultation light curve with the simulation made with SOS.

Likely, a planet with a size such as the expected for P9 has satellites Chan, Man Ho [5]. In this case, sizes similar to Triton and Miranda were used as examples in our simulations. Considering that the four known giant planets and at least three small bodies have rings [9], it is reasonable to consider that P9 can also have a ring system. For the ring simulation, the input parameters are optical depth, width, and distance to the central body. Our simulations used similar values to those of the Uranus and Neptune rings. All the simulations have lengths

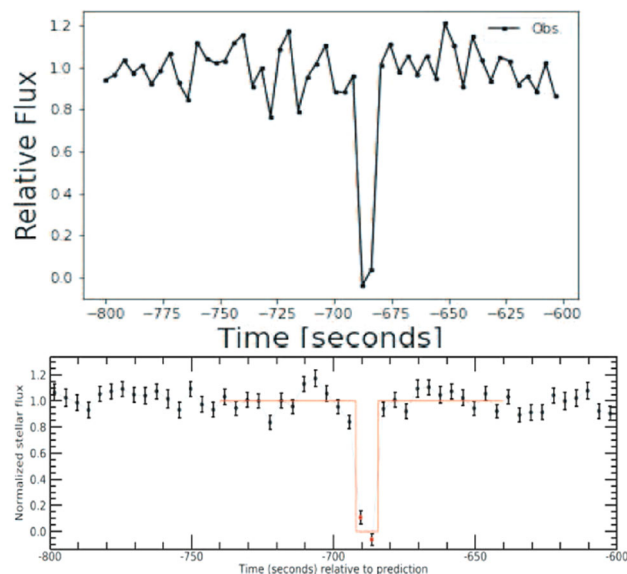


Fig. 3 The top graph presents our simulated light curve for the event by the ETNO (541132) Leleākūhonua. The bottom plot presents the real occultation light curve obtained by [4]. To simulate the light curve we used the same parameters as the ones used in the real observation (see text). The resemblance between the light curves is remarkable

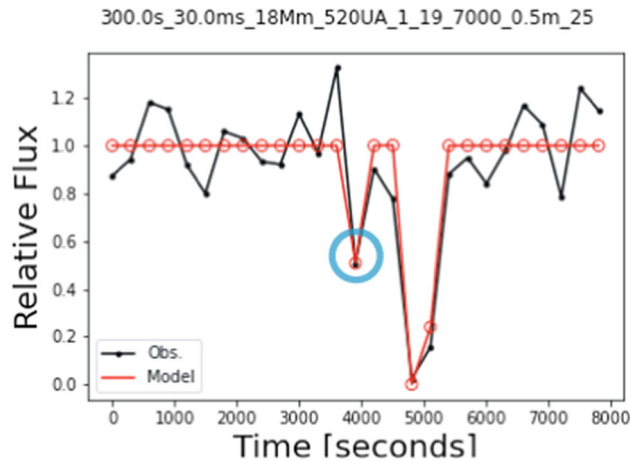


Fig. 4 The model, in red, was made using SORA [6]. This curve simulates P9 with 18,432 km in diameter, at 520 au distance, bandpass of $7.000\ \mu\text{m}$, observed with a 0.5-m telescope, 300 s of exposure, and relative velocity of $30\ \text{km s}^{-1}$. A satellite similar in size to Triton, with 2700 km of diameter, orbiting at a distance of 60,000 km, and a ring with an optical depth of 0.003 and 2000 km width were also simulated. The occulted star has V magnitude 19. The occultation by P9 is clearly detected. The satellite causes a light drop, marked in blue, before the start of the main body occultation, and the rings are not detectable due to the relatively short duration and flux drop together with the noise

equal to the provided object's diameter,¹ i.e., an occultation that sounds the planet's and satellite's equators, and no projection of the ring is considered (i.e., it is viewed face-on). The code also generates a Gaussian noise from the standard deviation provided by the user.

At this stage, the SOS does not consider the presence of an atmosphere around P9 on the simulated light curves.

3 Discussion

From the simulated light curves, it is possible to verify that the Fresnel diffraction, the body's velocity, stellar diameter, and bandpass present little relevance to detecting the body. In this simulation, the bandpass was changed, but it is not clear the relationship between bandpass and selected magnitude because the planet's surface may have different albedo in different parts of the spectrum (be more or less reflective in certain bands), so it will be necessary to know P9's spectrum to verify if the bandpass is relevant or not.

We simulated occultation light curves by P9 with SOS and analyzed it using SORA, a Python-based library that models an occultation by an opaque object (or semi-transparent, in the case of rings), the stellar diameter, the Fresnel diffraction for the given band-pass and the exposure time [6]. With this, we could check if the simulated light curves produced the expected results, such as the event duration and the flux drop.

A large stellar occultation campaign relies on amateur astronomers' observations. As their telescope sizes are usually not very large, we analyzed which is the biggest exposure time that can produce an occultation light curve by P9 with a clear detection. We find that exposures of 300 s can still produce a clear detection of an occultation by P9 and a satellite similar in size to Triton (Fig. 4).

Figure 5 presents the simulated occultation by the ring, with 0.5 optical depth and 2 km in width, and a Triton-like satellite, similar to Fig. 4 but with an image cadence of 10 Hz. The occultation by the satellite promotes a drop just after the 4000 s, and the occultations by the ring are closer to the main body. A high cadence is necessary to detect a Uranus-like ring. We point out that on one side the bottom flux of the occultation by the ring is higher than on the other; that occurs because the occultation happens along two exposures, so half of the event occurs in one cycle time, and the other half occurs in the following. It is clear that a high cadence of images is necessary to detect rings. For that a large professional telescope is needed, or an occultation event of a bright star ($V\ \text{mag} < 12$).

Figure 6 shows a possible limit case for detecting the ring when the star with $V\ \text{mag} = 17$ is three magnitudes brighter than P9 (here with $V\ \text{mag} = 20$). Figure 7 shows when the star is only one magnitude brighter, showing

¹To determine the size of the object, observations of the same event from different locations across-track are needed, and they would produce shorter occultations, as they would probe different parts of the object's limb. As this is out of the scope of this work, it was not considered here.

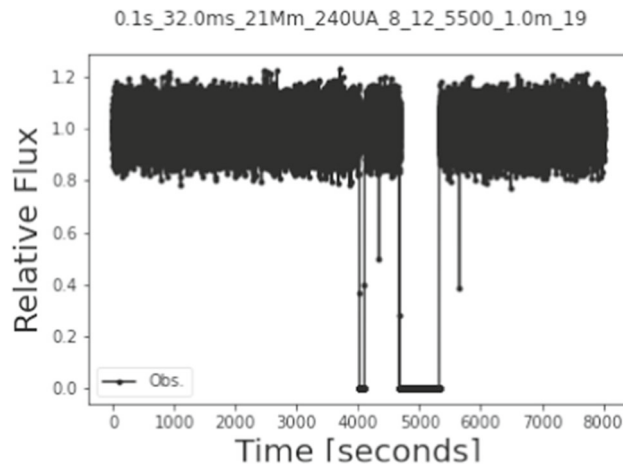


Fig. 5 Simulation of P9 with 20,665 km, at 240 au, bandpass 5500 μm , with a 1-meter telescope and 10 Hz image cadence. A ring with 0.5 optical depth and 2 km width, a satellite similar to Triton with 2700 km in diameter orbiting at 60,000 km distance, and a star with V magnitude 12 were considered

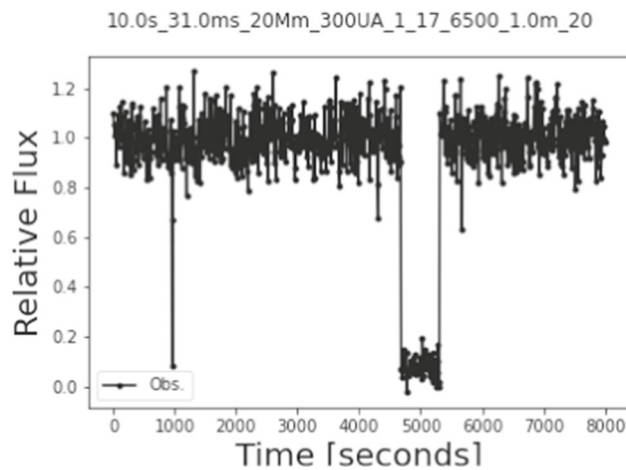


Fig. 6 Simulation of P9 with 19,548 km, at 300 au, bandpass 6500 μm , with a 1-m telescope, 10 s of exposure, shadow velocity of 31 km s^{-1} . A ring with 0.1 optical depth and 100 km width, a satellite similar to Miranda with 500 km in diameter orbiting at 250,000 km distance, and a star with magnitude $V = 17$

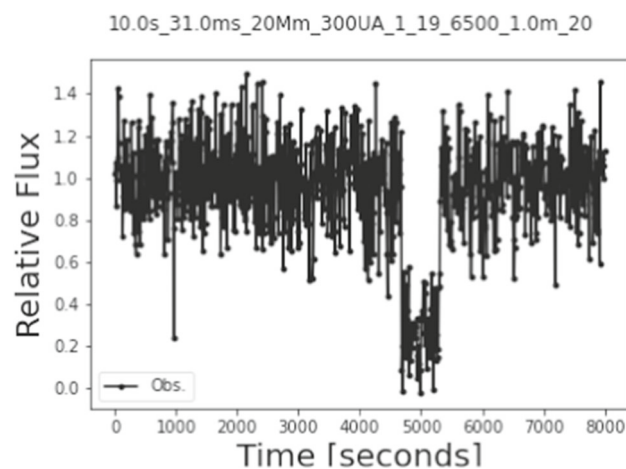


Fig. 7 Similar to Fig. 6 but with star magnitude $V = 19$

that the occultation by the rings is immersed within the noise. A satellite similar to Miranda is detectable in these conditions.

4 Conclusions

The simulations here presented show the first analysis of the detectability of stellar occultations by the proposed Planet 9, putative satellites, and rings around it. The duration of the events can vary from a few seconds for the rings up to 12 min for the main body. To sound for satellites 3 h long observations are needed (considering a Miranda-like satellite at its longest elongation).

The main parameters driving the occultation light curve by P9 are now clear. With this, proposals to observe stellar occultations with professional telescopes and observation campaigns can be properly organized.

Our Stellar Occultation Simulator is a useful tool for simulating atmosphere-less objects, considering different user-determined data standard deviations. The SOS needs to be upgraded to be able to simulate the noise from the cameras and Earth's atmosphere for a more realistic simulation, and when it is done will be publicly available (on GitHub for instance). As a following step, it will be interesting to develop a simulation considering the presence of an atmosphere around the simulated object, as is probably the case of Planet 9.

Data availability statement The simulated occultation light curves generated during the current study are available on reasonable request to the corresponding author.

References

1. K. Batygin, M.E. Brown, Evidence for a distant giant planet in the solar system. *Astron. J.* **151**, 22–34 (2016). <https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/2/22>
2. F. Braga-Ribas, B. Sicardy, J.L. Ortiz et al., A ring system detected around the centaur (10199) chariklo. *Nature* **7494**, 72–75 (2014). <https://doi.org/10.1038/nature13155>
3. M.E. Brown, B. Konstantin, The orbit of planet nine. *Astron. J.* **162**, 219 (2021). <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac2056>
4. M.W. Buie, R. Leiva, J.M. Keller et al., A single-chord stellar occultation by extreme trans-neptunian object (541132) leleākūhonua. *Astron. J.* (2020). <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab8630>
5. M.H. Chan, What if planet nine has satellites? *Astrophys. J.* **944**, 172–177 (2023). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acb5a1>
6. A.R. Gomes-Júnior, B.E. Morgado, G. Benedetti-Rossi et al., Sora: stellar occultation reduction and analysis. *MNRAS* **511**(1), 1167–1181 (2022). <https://doi.org/10.1093/mnras/stac032>
7. A.-M. Madigan, M. McCourt, A new inclination instability reshapes Keplerian disk into cones: application to the outer solar system. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (2015). <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slv203>
8. J. Marques Oliveira, B. Sicardy, A.R. Gomes-Júnior et al., Constraints on the structure and seasonal variations of triton's atmosphere from the 5 October 2017 stellar occultation and previous observations. *Astron. Astrophys.* **659**(A136), 43 (2022). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141443>
9. B.E. Morgado, B. Sicardy, F. Braga-Ribas et al., A dense ring of the trans-neptunian object quaoar outside its roche limits. *Nature* **614**, 239–243 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05629-6>
10. J. Schneider, Measuring the radius and mass of planet nine. *Publ. Astron. Soc. Pac.* **129**, 5 (2017). <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aa79fd>
11. C. Spearman, The proof and measurement of association between two things. *Am. J. Psychol.* (1904). <https://doi.org/10.2307/1412159>
12. I. Toth, Some physical properties predicted for the putative planet nine of the solar system. *Astron. Astrophys.* **592**, A86 (2016). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628444>
13. M.L. Waskom, Seaborn: statistical data visualization. *J. Open Source Softw.* **6**(60), 3021 (2021). <https://doi.org/10.21105/joss.03021>

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.