

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
OBSERVATÓRIO DO VALONGO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

Altair Ramos Gomes Júnior

*Aplicações Astrométricas e Fotométricas para o Estudo do
Sistema Solar Exterior*

Rio de Janeiro

2015

Altair Ramos Gomes Júnior

*Aplicações Astrométricas e Fotométricas para o Estudo do
Sistema Solar Exterior*

Tese apresentada ao Curso de Astronomia da UFRJ,
como requisito parcial para a obtenção do grau de
DOUTOR em Astronomia.

Orientador: Marcelo Assafin

Professor Doutor

Rio de Janeiro

2015

Gomes Júnior, Altair Ramos

Aplicações Astrométricas e Fotométricas para o Estudo do Sistema
Solar Exterior / Altair Ramos Gomes Júnior - 2015

160.p

Astrometria. I.Título.

CDU 521.9

Altair Ramos Gomes Júnior

*Aplicações Astrométricas e Fotométricas para o Estudo do
Sistema Solar Exterior*

Tese apresentada ao Curso de Astronomia da UFRJ,
como requisito parcial para a obtenção do grau de
DOUTOR em Astronomia.

Aprovado em Junho de 2015

BANCA EXAMINADORA

Marcelo Assafin

Professor Doutor

Primeira Pessoa

Doutor

Segunda Pessoa

Doutor

Terceira Pessoa

bacharel

Quarta Pessoa

licenciado

Resumo

Palavras-chave: Astrometria, Ocultações

Sumário

1	Introdução	3
2	Ocultações	4
2.1	Ceres	4
2.1.1	Ocultação de 2010	5
2.1.2	Ocultação de 2013	8
2.2	Satélites Irregulares	8
2.3	TNOs	8
3	Astrometria de Netuno e Tritão	9

1 Introdução

O estudo de objetos como TNOs, Centauros e Satélites Irregulares (remanescentes relativamente inalterados da formação do sistema solar) nos ajudam a compreender a formação e evolução do Sistema Solar. Atualmente, é aceito que TNOs e Centauros tenham sido formados nas partes mais internas do sistema solar. Eles teriam então sido colocados em suas posições atuais devido a troca de momento angular entre os planetas e planetesimos quando da migração dos planetas gigantes. A evolução se deu de tal forma que a passagem dos planetesimais e planetas por zonas de ressonância de movimento médio redefiniu as órbitas desses corpos (Tsiganis et al., 2005).

Sabe-se que poucas sondas espaciais foram enviados para estudar o Sistema Solar Externo e que a quantidade de objetos estudados é muito pequena. Por isso, ainda hoje, as observações de solo tem se mostrado de grande importância.

Os sistemas de Júpiter e Saturno já foram pelas Voyager I e II, Galileu (Júpiter) e Cassini (Saturno), porém apenas Saturno continua sendo investigado por uma sonda. Porém as sondas observaram apenas os planetas, os anéis e satélites mais internos. Os satélites externos, que acredita-se ser oriundo de capturas ou foram pouco observados (como Phoebe) ou simplesmente não foram observados.

Já no caso de Urano e Netuno, nenhuma sonda exclusiva foi enviada, apenas as Voyagers I e II os visitaram, mas não permaneceram nos sistemas. A sonda New Horizons visitará Plutão em 2015 e obterá parâmetros físicos para Plutão e seus satélites (primeira visita por sonda a um satélite do cinturão de Kuiper), porém será uma passagem rápida e o acompanhamento da evolução do sistema, incluindo a evolução da atmosfera de Plutão se dará por observações de solo.

A quantidade de objetos descobertos além da órbita de Saturno tem aumentado muito desde o fim do século passado. Como são raras as oportunidades em que uma sonda se aproxima desses objetos, a obtenção de suas características físicas ficam a cargo de observações de solo ou de telescópios espaciais.

Um método que tem se mostrado eficiente para a obtenção desses parâmetros é o método de ocultações estelares, que proporciona medidas tão precisas que são apenas superadas por medidas oriundas de sondas.

2 Ocultações

2.1 Ceres

Apesar de Ceres não ser um objeto do sistema solar exterior, ele é o único planeta-anão no sistema solar interno e, por isso, é um objeto de grande importância e seu estudo pode ter grande impacto na formação e evolução do sistema solar. Na verdade, foi proposto que a origem de Ceres pode ser como um objeto transnetuniano (McKinnon, 2012), espalhado posteriormente para o cinturão principal de asteroides devido à migração dos planetas gigantes predito pelo Modelo de Nice (Gomes et al., 2005). Mesmo que ele tenha sido formado próximo à sua localização atual, a história dinâmica do sistema solar deve ter deixado sua assinatura em Ceres.

Contendo aproximadamente um quinto de toda a massa do cinturão de asteroides, espera-se que Ceres esteja em equilíbrio gravitacional e seja, portanto, um elipsóide Maclaurin ou Jacobi. De fato, observações diretas de Ceres com a utilização de ótica adaptativa indica que ele é um esferóide achatado nos pólos (Drummond et al., 2014). O conhecimento preciso de seu tamanho e forma é extrema importância para modelos de densidade, estrutura interna e diferenciação.

A primeira ocultação estelar por Ceres foi observada em 1984 (Millis et al., 1987) e determinou seu tamanho com precisão de alguns quilômetros em uma época que as incertezas eram, normalmente, dez vezes maiores. Devido ao brilho aparente de Ceres ser alto, comparado à maioria dos asteroides, estrelas capazes de causar uma queda de magnitude detectável quando ocultadas são limitadas às mais brilhantes. Por exemplo, depois do evento de 1984, apenas 4 ocultações estelares por Ceres foram observadas (D.W. et al., 2014). Duas delas tiveram apenas duas cordas cada que não foram suficientes para prover resultados acurados¹. Os dois restantes, que ocorreram em 17 de Agosto de 2010 e 25 de Outubro de 2013, foram trabalhos por mim em colaboração com o grupo do Rio (Gomes-Júnior et al., 2015, aceito).

¹Esses eventos ocorreram em 22 de Agosto de 1994 e 30 de Outubro de 2010.

Os dois eventos foram preditos por Steve Preston² para a IOTA (International Occultation Timing Association), durante previsões de rotina de ocultações de asteroides de estrelas brilhantes. Os caminhos das sombras podem ser visualizados na Fig. 2.1.

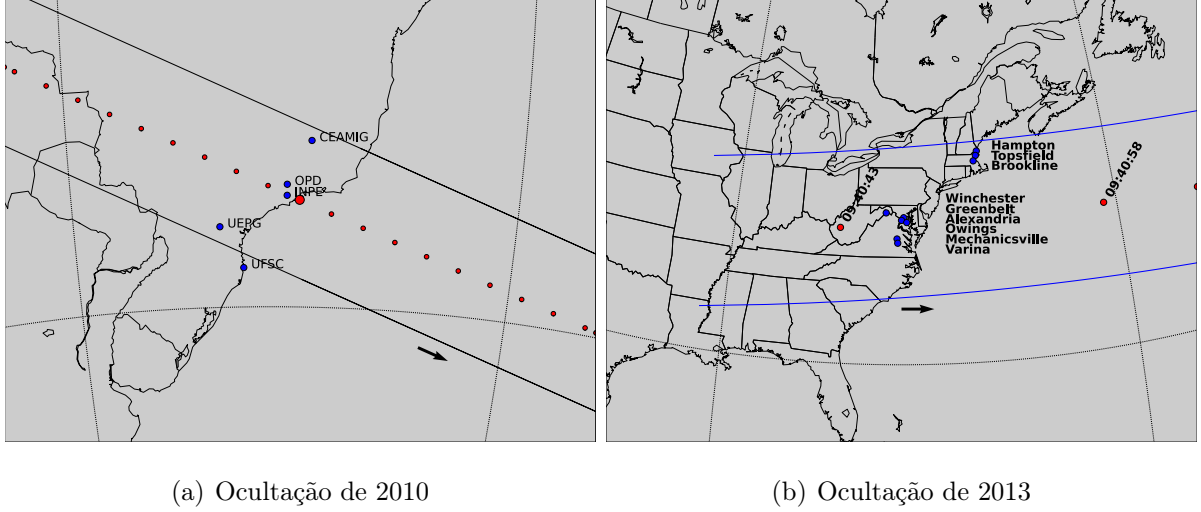


Figura 2.1: Reconstrução pós-ocultação do caminho da sombra de Ceres na Terra para os eventos de 17 de Agosto de 2010 (a) e 25 de Outubro de 2013 (b). Os pontos em azul são os sítios que observaram os eventos. a) O ponto grande vermelho é a máxima aproximação geocêntrica às 22:40:25 UT. Os pequenos representam o centro da sombra separados por um minuto. b) Visão superior da ocultação sobre os sítios que observaram o evento de 25 de Outubro de 2013. Os pontos vermelhos são os centros da sombra separados por 15 segundos. Nos dois eventos a sombra se move da esquerda para a direita.

2.1.1 Ocultação de 2010

Em 17 de Agosto de 2010 Ceres ocultou a estrela TYC 6833-163-1 (UCAC4 313-111823), cuja magnitude é $V = 11.55$ e tem posição no ICRS para a data do evento baseada no catálogo UCAC4 (Zacharias et al., 2013):

$$\begin{cases} \alpha = 17^h 18^m 29^s 0085 \\ \delta = -27^\circ 26' 38'' 867 \end{cases} \quad (2.1)$$

O evento foi observado no Brasil a partir de cinco diferentes sítios (ver Fig. 2.1(a)). Destes, 4 obtiveram cordas positivas enquanto UFSC teve uma corda negativa.

²Predições publicadas em <http://asteroidoccultation.com>.

Das positivas, a observação proveniente do INPE iniciou-se após o início do evento devido a dificuldades técnicas e, portanto, apenas a emersão da curva de luz foi detectada.

Uma das características mais importantes desse evento foi a velocidade com que ocorreu (apenas 3.9 km s^{-1}) acarretando que mesmo exposições de poucos segundos representariam resoluções espaciais significantes.

Todas as observações foram feitas com a utilização de CCDs. As curvas de luz de cada observação foram obtidas das imagens FITS com a utilização do pacote PRAIA (Plataforma de Redução Astrométrica de Imagens Astronômicas, Assafin et al., 2011). As curvas foram normalizadas para o fluxo da estrela mais Ceres, uma vez que eles estavam indistinguíveis logo antes e depois da ocultação. Por fim, elas foram normalizadas pelo ajuste de uma curva polinomial (de primeira ou segunda ordem) fora da queda de fluxo assim fixando em 1 a razão de fluxo fora da ocultação.

Os instantes de ingresso e egresso foram obtidas de cada curva de luz ajustando-se um modelo de poço quadrado levando em consideração a difração de Fresnel, a banda do CCD, o diâmetro aparente da estrela e o tempo de exposição utilizado (ver Widemann et al., 2009, Braga-Ribas et al., 2013).

O menor tempo de integração usado nas observações positivas foi de 1.0s, que corresponde a aproximadamente 3.9 km no plano do céu. Portanto, o erro na determinação dos instantes de ingresso e egresso é dominado principalmente pelo tempo de integração, não pela difração de Fresnel ou diâmetro da estrela, ambos da ordem de algumas centenas de metros para esse evento.

O ajuste dos dados da ocultação consiste em minimizar uma função de χ^2 clássica para cada curva de luz, como descrito em Sicardy et al. (2011) e Braga-Ribas et al. (2013). Os parâmetros livres para ajustar são os instantes de ingresso e egresso que fornece o valor mínimo de χ^2 (χ^2_{min}). O melhor ajuste das curvas de luz para a ocultação de 2010 está mostrado na Fig. 2.2(a).

A metodologia usada para analisar o perfil de Ceres a partir das observações é o mesmo descrito em Sicardy et al. (2011) e Braga-Ribas et al. (2013). Cada combinação de posição do sítio, instantes de ingresso e egresso, junto com as coordenadas da estrela e as efemérides de Ceres, correspondem a um ponto no plano do céu. A coleção de todos esses pontos determina o limbo aparente de Ceres.

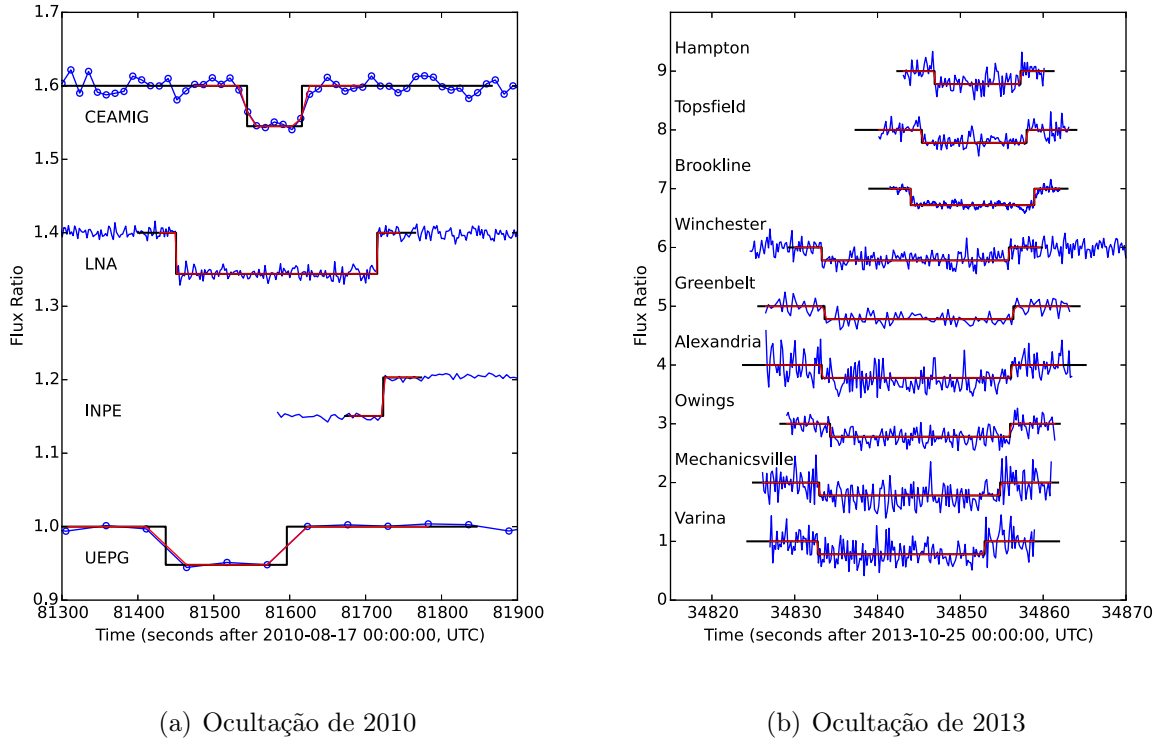


Figura 2.2: Curvas de luz normalizadas das cordas positivas dos eventos. As curvas estão desviadas por um fator de 0.2 (a) e 1.0 (b) para melhor visualização. As linhas pretas são os melhores ajustes com o modelo de poço quadrado. As linhas vermelhas são os melhores ajustes com o modelo de poço quadrado, porém levando em conta a difração de Fresnel, o diâmetro da estrela e o tempo de exposição. Os instantes médios de cada curva não coincidem devido às diferentes longitudes dos sítios. A curva de luz de Brookline (b) está desviada por um fator de -64 s como explicado no texto.

Adotamos um modelo elíptico para o perfil do limbo, resultante da projeção de um esferóide com achatamento nos pólos no plano do céu. Essa escolha é suportada pelo trabalho de Drummond et al. (2014), por meio de imagem direta de Ceres. Dessa forma, nós temos $N = 7$ extremidades das cordas para ajustar $M = 5$ parâmetros que definem uma elipse: semi-eixo maior e semi-eixo menor aparentes (a' and b' , respectivamente), ângulo de posição P do seu semi-eixo maior e as posição (f_c, g_c) do seu centro com respeito à estrela ocultada. O semi-eixo maior a' é equivalente ao raio equatorial R_{equa} do elipsoide.

As coordenadas f_c e g_c , em quilômetros, foram calculadas usando a efeméride de Ceres JPL#33 (?) e a posição da estrela ocultada. Elas são positivas na direção Leste e Norte celestes, respectivamente. O ângulo de posição P é contado positivamente a partir do norte celeste local em direção ao leste celeste. O achatamento aparente pode

ser definido por $\epsilon' = 1 - (b'/a')$. O melhor ajuste é obtido minimizando uma função de χ_r^2 reduzido, onde definimos o número de graus de liberdade do problema como $\mathcal{N} \equiv N - M$. Todos os procedimentos que permitem a determinação das barras de erro dos parâmetros físicos podem ser encontradas em Braga-Ribas et al. (2013).

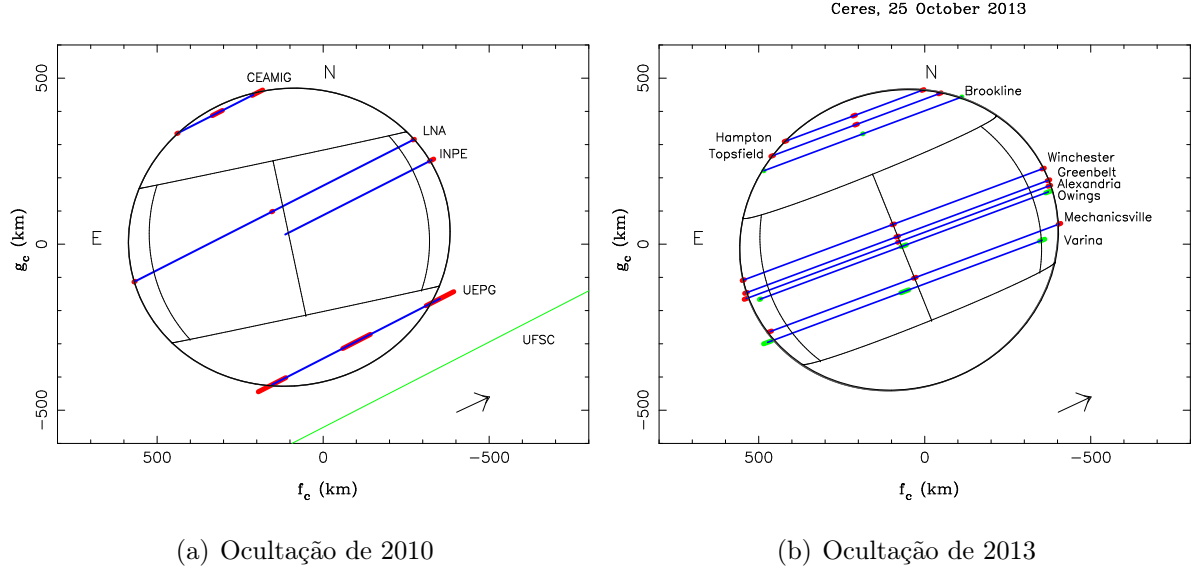


Figura 2.3: Melhores ajustes elípticos para as cordas das ocultações de 2010 e 2013. As setas indicam a direção de movimento, as linhas azuis são as cordas observadas, os segmentos vermelhos são as barras de erro dos ingressos, egressos e centro da ocultação em 1σ . A linha verde em (a) é uma corda negativa. Os instantes marcados em verde em (b) não foram utilizados para o ajuste como descrito no texto.

2.1.2 Ocultação de 2013

2.2 Satélites Irregulares

2.3 TNOs

3 Astrometria de Netuno e Tritão

Referências Bibliográficas

- Assafin, M. et al. (2011). In *Gaia follow-up network for the solar system objects: Gaia FUN-SSO workshop proceedings. IMCCE-Paris Observatory, Paris*.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., Lellouch, E., Tancredi, G., Lecacheux, J., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Assafin, M., Behrend, R., and et al. (2013). The size, shape, albedo, density, and atmospheric limit of transneptunian object (50000) quaoar from multi-chord stellar occultations. *ApJ*, 773(1):26.
- Drummond, J., Carry, B., Merline, W., Dumas, C., Hammel, H., Erard, S., Conrad, A., Tamblyn, P., and Chapman, C. (2014). Dwarf planet ceres: Ellipsoid dimensions and rotational pole from keck and vlt adaptive optics images. *Icarus*, 236:28–37.
- D.W., D. et al. (2014). *Asteroid Occultations V12.0. EAR-A-3-RDR-OCCULTATIONS-V12.0. NASA Planetary Data System*.
- Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Morbidelli, A. (2005). Origin of the cataclysmic late heavy bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435(7041):466–469.
- Gomes-Júnior, A. R. et al. (2015). Results of two multi-chord stellar occultations by dwarf planet (1) ceres. *Monthly Notices*.
- McKinnon, W. B. (2012). Where did ceres accrete? In *LPI Contrib*, volume 1667.
- Millis, R., Wasserman, L., Franz, O., Nye, R., Oliver, R., Kreidl, T., Jones, S., Hubbard, W., Lebofsky, L., Goff, R., and et al. (1987). The size, shape, density, and albedo of ceres from its occultation of bd+8°471. *Icarus*, 72(3):507–518.
- Sicardy, B. et al. (2011). A pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet eris from an occultation. *Nature*, 478:493–496.
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., and Levison, H. F. (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the solar system. *Nature*, 435(7041):459–461.

- Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., Martinez, C., Beisker, W., Bredner, E., Dunham, D., Maley, P., Lellouch, E., Arlot, J.-E., and et al. (2009). Titania's radius and an upper limit on its atmosphere from the september 8, 2001 stellar occultation. *Icarus*, 199(2):458–476.
- Zacharias, N., Finch, C. T., Girard, T. M., Henden, A., Bartlett, J. L., Monet, D. G., and Zacharias, M. I. (2013). The fourth us naval observatory ccd astrograph catalog (ucac4). *The Astronomical Journal*, 145(2):44.