

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

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Ocultações</b>	<b>4</b>
2.1	Ceres . . . . .	4
2.1.1	Ocultação de 2010 . . . . .	5
2.1.2	Ocultação de 2013 . . . . .	9
2.2	Satélites Irregulares . . . . .	9
2.3	TNOs . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Astrometria de Netuno e Tritão</b>	<b>10</b>

# 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 acurados<sup>1</sup>. 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).

---

<sup>1</sup>Esses eventos ocorreram em 22 de Agosto de 1994 e 30 de Outubro de 2010.



Os dois eventos foram preditos por Steve Preston<sup>2</sup> para a IOTA (International Occultation Timing Association), durante predições de rotina de ocultações de asteroides de estrelas brilhantes. Os caminhos das sombras podem ser visualizados na Fig. 2.1.

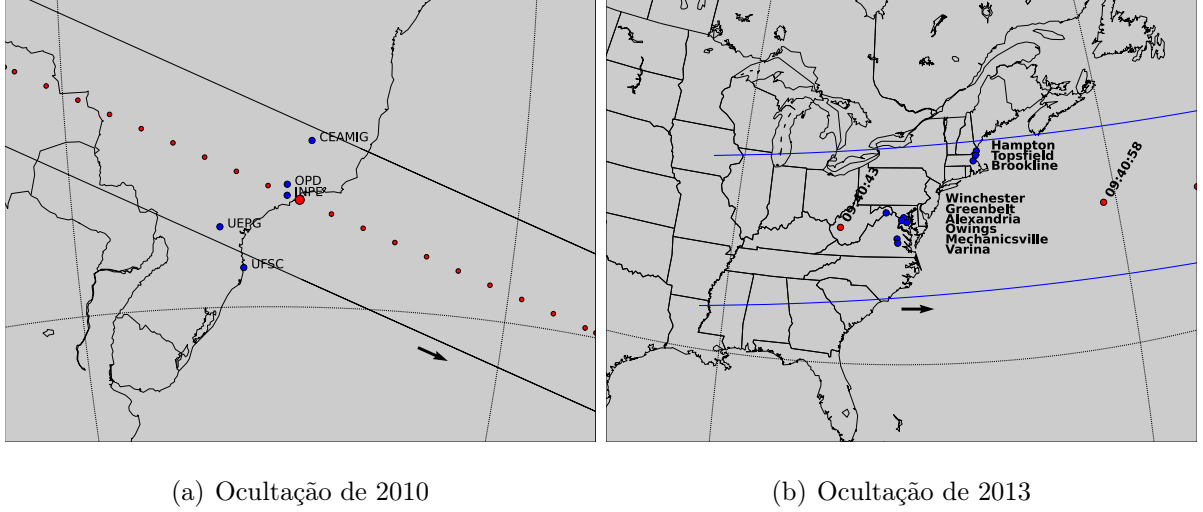


Figura 2.1: Reconstrução pós-ocultação do caminho da sombra de Ceres na Terra para os eventos de 17 de Agosto de 2010 (a) e 25 de Outubro de 2013 (b). Os pontos em azul são os sítios que observaram os eventos. a) O ponto grande vermelho é a máxima aproximação geocêntrica às 22:40:25 UT. Os pequenos representam 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.

<sup>2</sup>Predições 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  $3.9 \text{ km s}^{-1}$ ) 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  $3.9 \text{ km}$  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  $\chi^2$  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  $\chi^2$  ( $\chi^2_{min}$ ). 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.

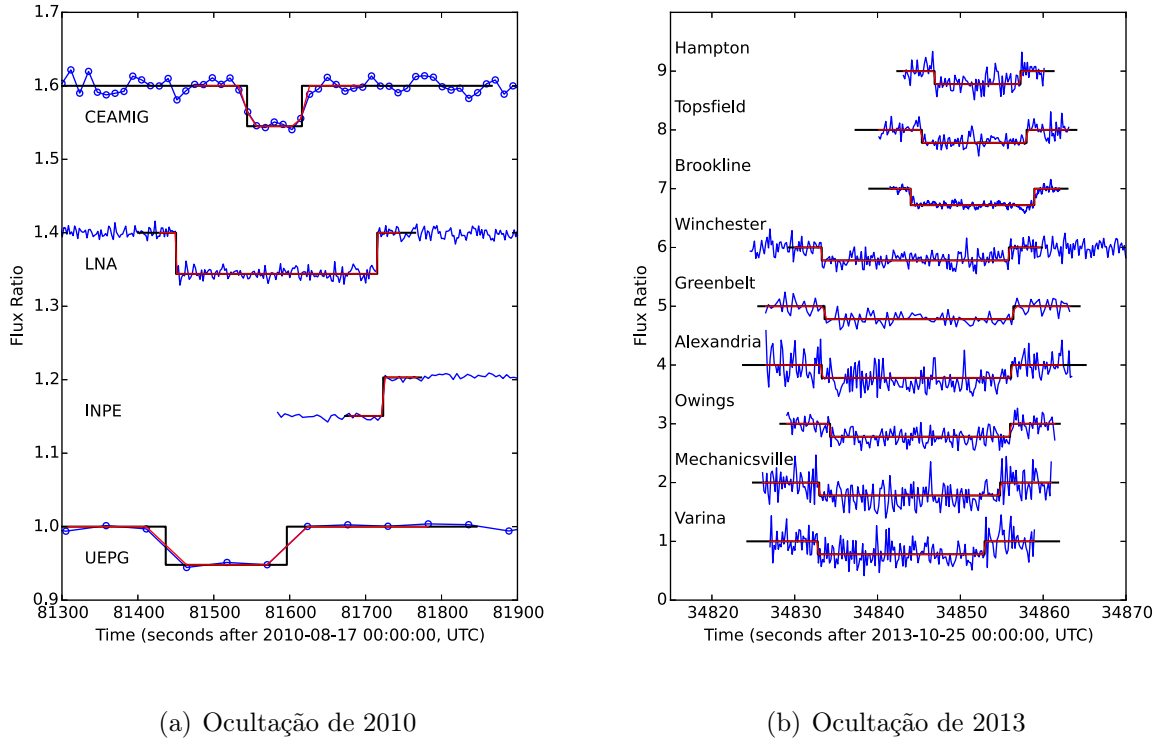


Figura 2.2: Curvas de luz normalizadas das cordas positivas dos eventos. As curvas estão desviadas por um fator de 0.2 (a) e 1.0 (b) para melhor visualização. As linhas pretas são os melhores ajustes com o modelo de poço quadrado. As linhas vermelhas são os melhores ajustes com o modelo de poço quadrado, 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 (Giorgini et al., 1996) 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  $\chi_r^2$  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).

Duas possíveis soluções foram consideradas para o ajuste do limbo. O primeiro, que chamamos de solução nominal, consiste em determinar os cinco parâmetros que caracterizam uma elipse a partir dos sete contatos observados. A segunda solução consiste em calcular o ângulo de posição  $P$  a partir das coordenadas do pólo de Ceres obtidas por Drummond et al. (2014) ( $\alpha_p = (287 \pm 3)^\circ$ ,  $\delta_p = (+64 \pm 3)^\circ$  no ICRS) e da efeméride de Ceres no instante da ocultação. Chamamos de solução de pólo fixo.

Para o evento de 2010, a solução nominal teve como melhor ajuste  $\chi_{r,min}^2 = 0.24$ , que podem ser interpretadas como as barras de erro estarem superestimadas com respeito à boa qualidade do ajuste. Porém, como o problema tem somente dois graus de liberdade,  $\chi_{r,min}^2$  relativamente pequenos são aceitáveis. Os resultados obtidos para o diâmetro equatorial, achatamento, ângulo de posição e coordenadas do centro esao apresentadas na segunda coluna da tabela 2.1.

Tabela 2.1: Resultados do ajuste de limbo de Ceres com os dados dos eventos de 2010 e 2013.

Solution	2010/Nominal	<b>2010/Pólo fixo</b>	2013/Nominal	2013/Pólo fixo
Diam. equat. (km)	$982 \pm 14$	<b><math>972 \pm 6</math></b>	$971 \pm 7$	$971 \pm 7$
Achatamento	$0.08 \pm 0.03$	<b><math>0.08 \pm 0.03</math></b>	$0.08 \pm 0.04$	$0.08 \pm 0.04$
Âng. de pos. (deg)	$5 \pm 10$	<b><math>12 \pm 3</math> (*)</b>	$22 \pm 5$	$25 \pm 3$ (*)
$f_c$ (km)	$97 \pm 9$	<b><math>102 \pm 5</math></b>	$77 \pm 6$	$78 \pm 6$
$g_c$ (km)	$16 \pm 15$	<b><math>21 \pm 11</math></b>	$13 \pm 16$	$13 \pm 16$
$\chi_{r,min}^2$	0.24	<b>0.42</b>	1.27	1.27

**Notas:** Em negrito destacamos nossa melhor solução. As barras de erro estão no nível de  $1\sigma$ . O diâmetro polar ( $D_{pol}$ ) pode ser facilmente calculado a partir de  $D_{pol} = D_{equa}(1 - \epsilon)$ . (\*) Ângulos de posição derivados a partir das coordenadas do pólo de Ceres determinadas por Drummond et al. (2014).

Como pode ser visto, o parâmetro com a maior incerteza é o ângulo de posição cobrindo um intervalo de  $20^\circ$ . Claramente, fixar as coordenadas do pólo pode melhorar a solução. Por fim, a correção do achatamento devido ao ângulo do aspecto polar está

dentro da barra de erro  $1\sigma$  e não tem relevância estatística, dessa forma  $\epsilon = 0.08 \pm 0.03$ .

No momento da ocultação, as coordenadas do pólo de Ceres correspondiam a um ângulo de posição  $P = (12 \pm 3)^\circ$ . Explorar o espaço de parâmetros restringindo a elipses com ângulo de posição dentro deste intervalo resulta na solução de pólo fixo. O parâmetros físicos do melhor ajuste estão mostrados na Tab. 2.1 enquanto a solução está esquematizada na Fig. 2.3(a).

Essa solução corresponde ao limite superior da barra de erro  $1\sigma$  da solução nominal para  $P$ . Por outro lado, ela obtém os menores valores para o diâmetro equatorial, melhorando sua determinação por um fator de 2.

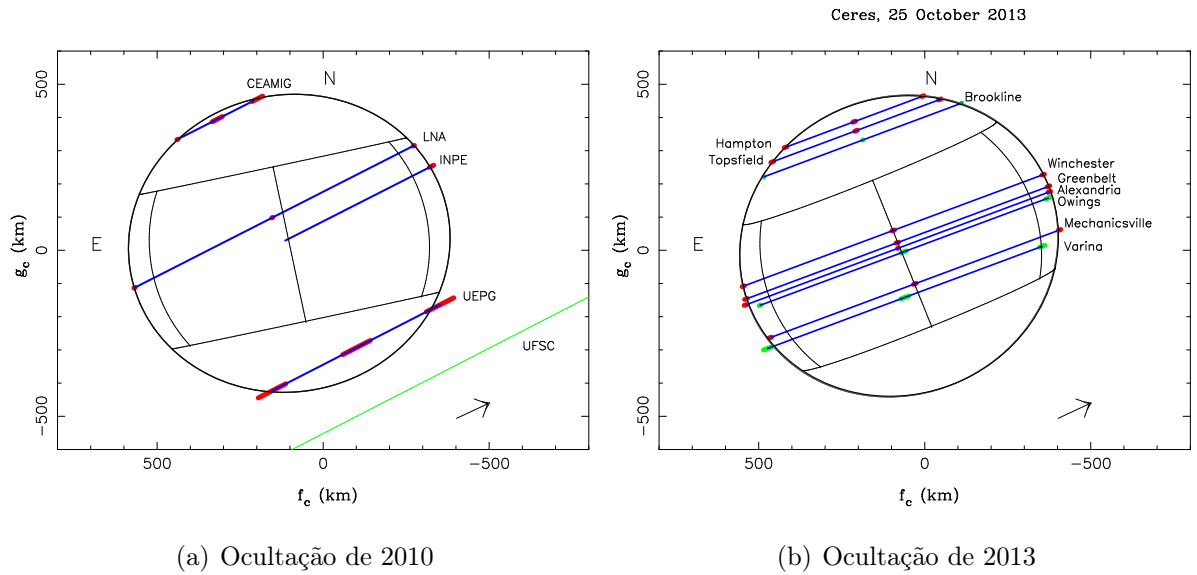


Figura 2.3: Melhores ajustes elípticos para as cordas das ocultações de 2010 e 2013. As setas indicam a direção de movimento, as linhas azuis são as cordas observadas, os segmentos vermelhos são as barras de erro dos ingressos, egressos e centro da ocultação em  $1\sigma$ . A linha verde em (a) é uma 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*.
- Giorgini, J., Yeomans, D., Chamberlin, A., Chodas, P., Jacobson, R., Keesey, M., Lieske, J., Ostro, S., Standish, E., and Wimberly, R. (1996). Jpl’s on-line solar system data service. BULLETIN OF THE AMERICAN ASTRONOMICAL SOCIETY (BAAS).
- 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., Ortiz, J. L., Assafin, M., Jehin, E., Maury, A., Lellouch, E., Hutton, R. G., Braga-Ribas, F., Colas, F., Hestroffer, D., and et al. (2011). A pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet eris from an occultation. *Nature*, 478(7370):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.