

Um Estudo Astrométrico e Fotométrico do Sistema Solar Exterior

Altair Ramos Gomes Júnior

11 de novembro de 2015

1. Introdução

O estudo de objetos como objetos trans-Neptunianos (TNOs), Centauros e Satélites Irregulares nos ajudam a compreender a formação e evolução do Sistema Solar Exterior. Nesta região distante do Sol, de baixas temperaturas, objetos principalmente de tamanho relativamente pequeno, e mais dispersos no espaço, provavelmente sofreram muito pouca diferenciação, seja por mecanismos internos, seja por choques com outros corpos, comparados a objetos formados mais próximos do Sol.

Por serem corpos asteroidais localizados de forma dispersa além da órbita de Netuno, considera-se que os TNOs guardam estruturas e composições relativamente inalteradas em relação a sua época de formação, constituindo-se assim em corpos de prova de grande valor para o estudo da origem do Sistema Solar, ao menos para essa região exterior.

Tirando Plutão, o primeiro TNO foi descoberto há pouco mais de 20 anos (Jewitt and Luu, 1993). Por isso, as propriedades básicas desta população ainda não estão inteiramente estabelecidas, como a distribuição de tamanhos, composição, estruturas internas.

Centauros são uma população transiente entre TNOs e cometas da família de Júpiter, orbitando em uma região entre Júpiter e Netuno. Atualmente, cerca de 400 deles são conhecidos e é geralmente aceito que eles compartilham uma origem comum com os objetos do cinturão de Kuiper. Uma vez que Centauros são tipicamente mais brilhantes que TNOs por estarem mais próximos, eles servem como representantes a partir dos quais é possível inferir propriedades mais gerais sobre os objetos mais distantes (Fernández et al., 2002). Dessa forma, a partir daqui, TNOs e Centauros serão tratados indistintamente como uma única população e referida unicamente como "TNOs".

Atualmente, é aceito que TNOs 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).

Muitos dos objetos que pertenciam ao cinturão de Kuiper primordial acabaram sendo enviados pela interação com os planetas gigantes para as partes mais internas do Sistema Solar. Alguns podem ter sido capturados pelos planetas criando a população de satélites irregulares ou satélites externos (Nesvorný et al., 2007), troianos (Morbidelli et al., 2005) ou até mesmo para o cinturão principal de asteroides como proposto para Ceres por McKinnon (2012). Estudar esses objetos é de grande importância para entender a evolução do Sistema Solar.

Desses objetos, Tritão possui um interesse particular. Ele foi capturado por Netuno (McKinnon and Kirk, 2007) em uma órbita retrógrada e próxima ao planeta. Sua superfície é deformada com características tectônicas e possivelmente criovulcânicas (Nimmo and Spencer, 2015) e as propriedades físicas já conhecidas de Tritão mostram uma similaridade com as de Plutão. Além do mais, é um dos poucos objetos do Sistema Solar que

se sabe possuir atmosfera.

Sabe-se que poucas sondas espaciais foram enviadas 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 visitados pelas Voyager I e II, Galileu (Júpiter) e Cassini (Saturno), porém apenas Saturno continua sendo investigado por uma sonda. Todavia, as sondas observaram apenas os planetas, os anéis e satélites mais internos. Os satélites externos 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. Recentemente, a sonda *New Horizons* visitou Plutão (Stern et al., 2015) e obteve parâmetros físicos para o planeta anão e seus satélites (primeira visita por sonda a um objeto do cinturão de Kuiper), porém foi 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. De fato, a sonda *Dawn* já está orbitando Ceres, um dos objetos deste estudo, e a sonda *New Horizons* visitou Plutão. As observações feitas por essas sondas trazem a oportunidade perfeita para comparar os resultados com os obtidos pelas nossas ocultações e calibrar a técnica, de forma que ocultações feitas para outros objetos possam ser mais precisas.

O objetivo desse Doutorado é observar objetos do Sistema Solar exterior, fazer astrometria para melhorar suas efemérides de forma que ocultações estelares por esses objetos possam ser preditas com precisão, observar as ocultações e obter os parâmetros físicos. Além disso, será feito um estudo astrométrico do sistema Netuno-Tritão para obter parâmetros relacionados a efeitos de maré, que permitem em princípio inferir a estrutura interna desses corpos.

Assim, além do trabalho rotineiro de estudo de TNOs e Centauros feito pelo grupo, do qual eu participo ativamente, nos propomos a estudar aqui, no contexto observacional acima, alguns objetos que, por hipótese, também podem ser representativos da população original de TNOs, isto é, podem ter uma origem comum aos TNOs. São eles alguns dos

satélites irregulares de planetas gigantes, Ceres e Tritão.

2. Centauros e TNOs

2.1 Introdução

Dentro do contexto explicitado no capítulo 1, os TNOs são uns dos objetos mais significantes por possivelmente serem a fonte de outras populações do Sistema Solar, como por exemplo Centauros (Fernández et al., 2002), Satélites Irregulares (Nesvorný et al., 2007) e Troianos (Morbidelli et al., 2005). Também existe a possibilidade de que Ceres tenha uma origem como TNO (McKinnon, 2012), assim como Tritão (Agnor and Hamilton, 2006).

Pouco se conhece sobre Centauros e TNOs, pois nunca foram visitados por sondas, com a exceção de Plutão, e a grande maioria das observações são de origem fotométrica usual (magnitudes, cores) ou, em menor parte, espectroscópica, ou em menor número ainda por telescópios espaciais.

Estimar parâmetros físicos para esses objetos é um desafio, porém essencial para acessar a massa atual e composição (material) da população e recuperar sua história evolutiva. É possível obter seus tamanhos através de modelos, por exemplo combinando o brilho no visível e emissão térmica obtida em infra-vermelho. Todavia os erros obtidos são piores que 10 % (Camargo et al., 2014).

Para obter parâmetros como tamanho, albedo, densidade, etc, de forma muito mais precisa e acurada, sem a necessidade de se adotar modelos, utilizamos a técnica de ocultações estelares. Até 2009, quando foi observada uma ocultação de 2002TX300 (Elliot et al., 2010), Plutão e Caronte eram os únicos TNOs com ocultações observadas. Até hoje, cerca de uma dezena de TNOs e Centauros tiveram ocultações observadas, alguns com apenas uma corda, como Varuna, o que permite apenas determinar um tamanho mínimo para o objeto.

Com o objetivo de prever e observar ocultações estelares por TNOs, o nosso grupo conta com colaboração de pesquisadores nacionais e internacionais, profissionais e amadores. Utilizamos telescópios de pequeno e grande porte e câmera rápida para observar eventos que proporcionaram grandes descobertas, como por exemplo a descoberta do sistema de anéis ao redor do Centauro Chariklo (Braga-Ribas et al., 2014).

2.2 Astrometria

Observar uma ocultação exige um grande trabalho de predição e de sua melhoria. Os TNOs estão muito distantes significando que mesmo sem grandes erros nas suas efemérides ou na posição da estrela o erro do local por onde a sombra irá passar pode ser de milhares de quilômetros. Preferencialmente, esse erro tem que ser menor que o tamanho angular do objeto no plano do céu. Por exemplo, Plutão tem um raio de 1190 ± 5 km Dias-Oliveira et al. (2015) que a uma distância de aproximadamente 32 UA representa um diâmetro

angular de 102 mas. Para a maioria dos objetos selecionados, menores que Plutão e/ou mais distantes, seus tamanhos angulares são menores que 50 mas.

Da mesma forma, estando muito distantes, eles se movem relativamente devagar no céu ocultando relativamente poucas estrelas por ano. Porém, sendo menos brilhantes ($\text{Mag } V > 18$) é possível observar ocultações de estrelas mais fracas (estrelas até $\text{Mag } R = 17$), onde a queda de brilho da estrela durante a ocultação poderá ser detectada e, mesmo com baixo sinal-ruído (ex: 5 a 10), o tamanho do corpo pode ser calculado com precisão de pelo menos 10 a 20 km, melhorando à medida em que a velocidade da sombra seja menor que 20 km/s (velocidade típica para um corpo em oposição a 30 UA).

Para identificar candidatas a ocultações estelares foi realizada uma campanha observacional no ESO para observar os caminhos aparentes dos TNOs entre 2009 e 2015. Assim, estrelas que não estão no UCAC4, catálogo comumente utilizado como referência astrométrica, foram identificadas bem como estrelas que estão mas não tem posições ou movimentos próprios com precisão suficiente. Tanto os catálogos de estrelas quanto as estrelas candidatas a ocultação foram publicados (Assafin et al., 2010, 2012, Camargo et al., 2014). Esses catálogos são utilizados como representante prático do ICRS no tratamento astrométrico e o conjunto é denominado catálogo WFI.

Não somente as posições das estrelas precisam ser atualizadas, mas também as posições dos TNOs. Portanto os TNOs também foram observados tanto no ESO quanto no Observatório do Pico dos Dias (OPD, LNA/MCTI, Itajuba, MG., código IAU 874, $45^\circ 34' 57''$ W, $22^\circ 32' 04''$ S, 1864 m). A princípio as predições das ocultações eram atualizadas utilizando o método de offsets, porém, em colaboração com o Dr. Josselin Desmars, integrações numéricas das órbitas dos TNOs foram realizadas desenvolvendo-se uma ferramenta denominada NIMA¹ (Desmars et al., 2015, aceito).

2.3 Ocultações Estelares

Com o objetivo de obter os parâmetros físicos desses objetos, para melhor caracterizar as propriedades básicas dessas populações, uma grande campanha observacional é realizada para se observar ocultações estelares por TNOs e Centauros. Essa campanha é liderada por pesquisadores brasileiros, franceses e espanhóis e tem colaboração com observadores espalhados por todo o mundo.

Os objetos foram basicamente selecionados de acordo com o grau de interesse científico (representar uma classe de TNO, ser um objeto peculiar, etc), tamanho (quanto maior, mais chances de observar a ocultação) e região do céu (quanto mais estrelas, maior a probabilidade de ocultar estrelas brilhantes, permitindo curvas de luz de melhor resolução espacial).

Vários objetos já foram observados pelo grupo, sendo que o Sistema Plutão-Charonte conta com várias ocultações observadas além de um trabalho astrométrico minucioso baseado em 19 anos de observações no OPD, mais observações no ESO (Benedetti-Rossi et al., 2014). As observações bem sucedidas de ocultações estelares resultantes desse trabalho de predição já geraram diversas publicações, inclusive na revista *Nature*, por exemplo Sicardy et al. (2011) e Braga-Ribas et al. (2014) nas quais contribuí em caráter observacional. A ocultação de Plutão de 04 de Maio de 2013, a qual observei, gerou duas publicações (Olkin et al., 2015, Dias-Oliveira et al., 2015).

Sicardy et al. (2011) identificaram, a partir de uma ocultação de 06 de Novembro

¹Numerical Integration of the Motion of an Asteroid

de 2010, que Eris é um planeta anão menor do que se esperava. Devido a seu brilho e distância acreditava-se que ele fosse muito maior, mas na verdade ele tem um albedo geométrico no visível de $p_v = 0.96^{+0.09}_{-0.04}$ e seu tamanho é de 1163 ± 6 km, muito próximo ao tamanho de Plutão. O alto albedo de Eris pode ser relacionado à presença de uma atmosfera colapsada devido ao fato dele estar se aproximando de seu afélio.

Braga-Ribas et al. (2014) observaram uma ocultação do Centauro Chariklo que ocorreu dia 03 de Junho de 2013. O ocultação revelou que o objeto possui um sistema de anéis nunca visto antes em um objeto tão pequeno. Até o momento, conhecia-se apenas anéis em torno dos planetas gigantes. Essa descoberta levanta muitas questões sobre formação dos anéis, estabilidade e tempo de vida e nos leva a crer que pode haver mais objetos com anéis no Sistema Solar, ao menos nessa região.

Olkin et al. (2015) determinaram a partir de observações de ocultações por Plutão que a atmosfera do objeto não colapsa durante os 248 anos de sua órbita, como acontece com Eris. Modelos anteriores previam um colapso de sua atmosfera devido a Plutão receber três vezes menos luz do Sol em afélio que em seu periélio.

Dias-Oliveira et al. (2015), também a partir de ocultações de Plutão, utilizaram modelos para obter os perfis de temperatura, pressão e densidade da atmosfera do objeto. Os modelos ajustam perfeitamente os perfis de temperatura para as duas ocultações utilizando assumindo uma atmosfera esfericamente simétrica. Por fim, foi obtido que a pressão da atmosfera aumentou cerca de 6% entre 2012 e 2013 significando que a atmosfera de Plutão ainda está se expandindo e confirmando o trabalho de Olkin et al. (2015).

No dia 29 de Junho de 2015 houve uma ocultação de Plutão de máxima importância devido a esta ser a última antes da chegada da sonda *New Horizons* no sistema e foi observada na Austrália e Nova Zelândia. Os modelos de perfil de atmosfera para Plutão poderão ser calibrados com os dados da *New Horizons* para serem utilizados em futuras ocultações e estudar a evolução da atmosfera do planeta anão.

Em 29 de Abril de 2014, uma ocultação de Chariklo foi observada na África. Eu trabalhei com a redução de três curvas de luz (Gifberb, SAAO e Springbok). Um fato interessante dessa ocultação foi que a estrela era uma binária não catalogada. Essa ocultação foi importante para obter com total certeza a direção do polo de Chariklo. Além disso, as câmeras utilizadas eram de alta qualidade possibilitando obter que pelo menos um dos anéis é opaco. Uma das cordas, fortuitamente, passou contígua ao anel observando apenas o anel externo. Os resultados ainda não foram publicados.

Outro evento que observei foi uma ocultação do TNO 2003VS2 dia 07 de Novembro de 2014 no OPD. As variações do céu não permitiram uma boa observação de forma que a curva de luz estava muito ruidosa, mas boa o suficiente próximo ao instante do evento. Um trabalho foi feito para identificar alguma ocultação mas nada pôde ser extraído. Nesse evento foram obtidas 3 cordas positivas e 7 negativas. A redução preliminar revelou que 2003VS2 possui um corpo levemente alongado com aproximadamente 600 km de diâmetro.

O trabalho ainda está em análise.

3. Ceres

3.1 Introdução

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 comum aos objetos trans-Netunianos (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).

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

Foram preditos dois eventos por Steve Preston¹ para a IOTA (International Occultation Timing Association), durante predições de rotina de ocultações de estrelas brilhantes por asteroides. Os caminhos das sombras podem ser visualizados na Fig. 3.1.

3.2 Ocultações de 2010 e 2013

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): $\alpha = 17^h 18^m 29^s.0085$ e $\delta = -27^\circ 26' 38''.867$. E em 25 de Outubro de 2013, Ceres ocultou a estrela TYC 865-911-1 (UCAC4 496-058191), de magnitude $V = 10.05$. Baseada no UCAC4 (Zacharias et al., 2013), sua posição ICRS para a data da ocultação é: $\alpha = 11^h 57^m 52^s.7641$ e $\delta = +09^\circ 07' 49''.835$.

O primeiro evento foi observado no Brasil a partir de cinco diferentes sítios (ver Fig. 3.1(a)). Destes, 4 obtiveram cordas positivas enquanto UFSC teve uma corda negativa. Das positivas, a observação proveniente do INPE iniciou-se após o início do evento devido a dificuldades técnicas e, portanto, apenas a emergência da curva de luz foi detectada. O segundo foi observado na costa Leste dos Estados Unidos (3.1(b)).

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

¹Predições publicadas em <http://asteroidoccultation.com>.

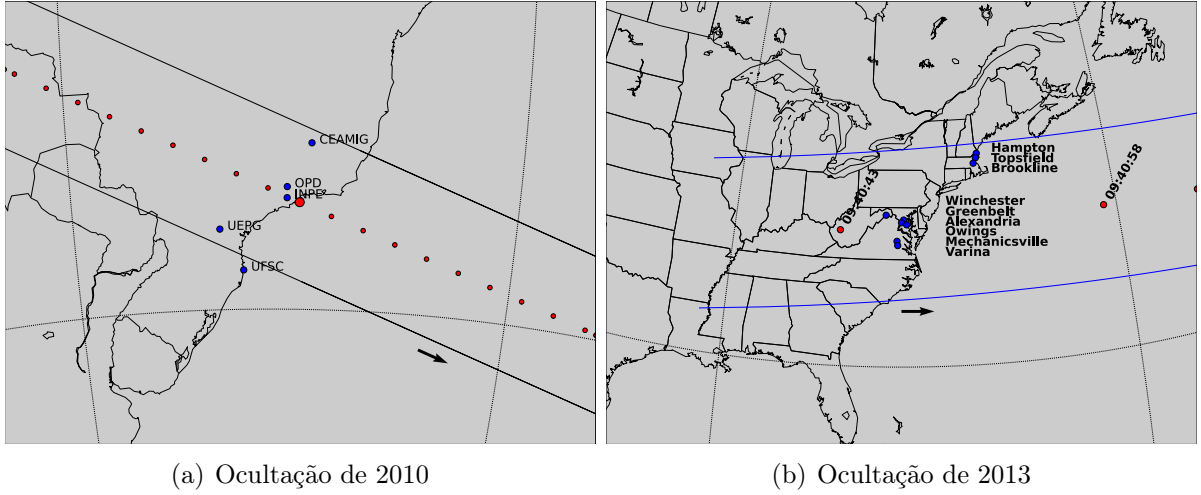


Figura 3.1: Reconstrução pós-ocultação do caminho da sombra de Ceres na Terra para os eventos de 17 de Agosto de 2010 (a) e 25 de Outubro de 2013 (b). Os pontos em azul são os sítios que observaram os eventos. a) O ponto grande vermelho é a máxima aproximação geocêntrica às 22:40:25 UT. Os pequenos representam 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 s.

(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). Algumas cordas do evento de 2013 não foram utilizadas por haver erros nos tempos fornecidos identificados durante o tratamento das imagens.

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}).

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). 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. A primeira, que chamamos de solução nominal, consiste em determinar os cinco parâmetros que caracterizam uma elipse a partir dos contatos observados. A segunda consiste em calcular o ângulo de posição P a partir das coordenadas do polo 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 polo fixo.

Os resultados obtidos para o diâmetro equatorial, achatamento, ângulo de posição e coordenadas do centro são apresentadas na segunda coluna da tabela 3.1. As soluções

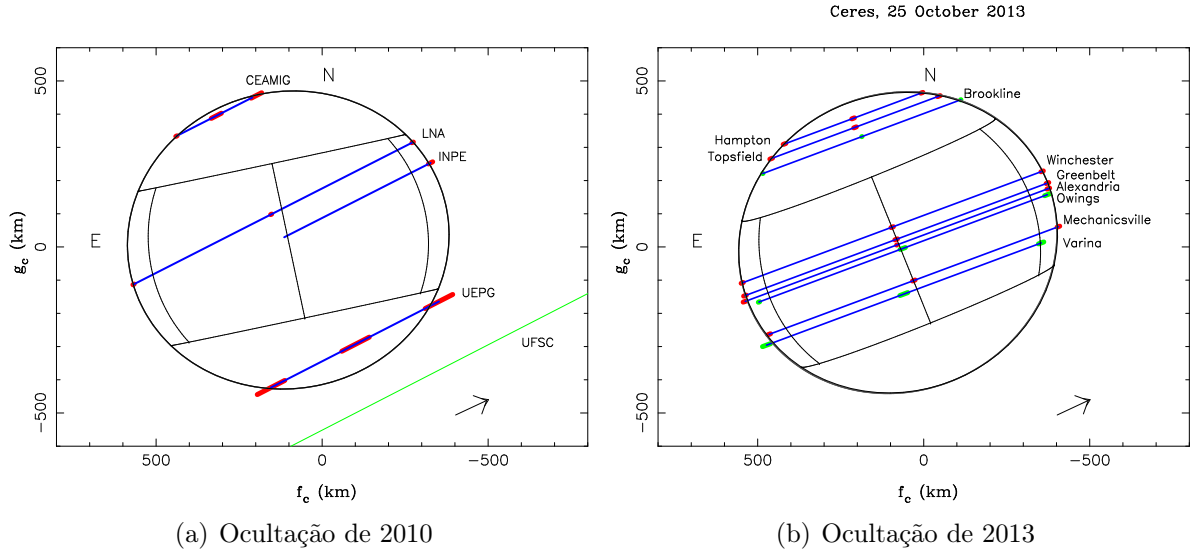


Figura 3.2: Melhores ajustes elípticos para as cordas das ocultações de 2010 e 2013. As setas indicam a direção de movimento, as linhas azuis são as cordas observadas, os segmentos vermelhos são as barras de erro dos ingressos, egressos e centro da ocultação em 1σ . A linha verde em (a) é uma corda negativa. Os instantes marcados em verde em (b) não foram utilizados para o ajuste, como descrito no texto.

para cada evento estão esquematizadas na Fig. 3.2

Tabela 3.1: Resultados do ajuste de limbo de Ceres com os dados dos eventos de 2010 e 2013.

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

Notas: Em negrito destaca-se a melhor solução obtida. As barras de erro estão no nível de 1σ . 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 polo de Ceres determinadas por Drummond et al. (2014).

3.3 Discussão

Os resultados apresentados na tabela 3.1 mostram um acordo entre os parâmetros físicos obtidos nas duas ocultações, especialmente no diâmetro equatorial. As diferenças ocorrem basicamente nos tamanhos das barras de erro e podem ser justificadas pelas particularidades de cada conjunto de dados.

Como foi mostrado, usar as coordenadas do polo de Ceres determinadas por Drummond et al. (2014) para limitar o ângulo de posição não foi um procedimento eficiente para o evento de 2013. Por outro lado, fixar o ângulo de posição para a ocultação de

2010 reduziu as barras de erro dos outros parâmetros (com exceção do achatamento). Por fim, esse procedimento resultou em um excelente acordo entre os raios equatoriais obtidos para ambos os eventos.

Uma comparação do diâmetro equatorial de Ceres medido por diferentes técnicas mostra um acordo entre os nossos resultados e aqueles obtidos por imageamento direto do Hubble Space Telescope (HST) (Thomas et al., 2005), do Keck Observatory e do ESO VLT (Drummond et al., 2014). O valor diferente e menor reportado por Carry et al. (2008) pode ser justificado pelo fato desse estudo não levar em conta o efeito de escurecimento de bordo.

A sonda da NASA *Dawn* poderá elucidar muitas perguntas sobre Ceres e seus resultados serão para calibrar todas as técnicas usadas até agora para o estudo das propriedades físicas dos pequenos objetos do Sistema Solar, como as ocultações estelares.

O resultado deste trabalho está foi publicado em Gomes-Júnior et al. (2015b)

4. Satélites Irregulares dos planetas gigantes

4.1 Introdução

Os satélites irregulares dos planetas gigantes são menores que os regulares, possuindo órbitas mais excêntricas, inclinadas e distantes. Na maioria dos casos, essas órbitas são retrógradas. Devido a suas configurações orbitais, é amplamente aceito que estes objetos foram capturados nos estágios iniciais da formação do Sistema Solar (Sheppard and Jewitt, 2003).

Por serem pequenos, eles são pouco brilhantes e só foram descobertos no último século. Dentre os satélites irregulares dos planetas gigantes, poucos são aqueles que possuem medidas de seus parâmetros físicos. Apenas Himalia, Phoebe e Nereida foram observados por sondas, apesar de não serem medidas ideais, já que foram alvos de oportunidade. A sonda *Cassini* observou Himalia em 2000 ao passar próximo a Júpiter e obteve o tamanho de Himalia com um erro médio de 10 km (Porco et al., 2003). Em 2004, a *Cassini*, aproximando-se de Saturno, observou Phoebe em alta resolução obtendo um erro médio na medida de seu tamanho de 0.7 km (Thomas, 2010). Por fim, Nereida foi observado em 1989 pela sonda *Voyager II* e seu tamanho foi obtido com um erro de 25 km (Smith et al., 1989). Para outros satélites irregulares de Júpiter, seus tamanhos foram estimados por Rettig (2001) impondo um albedo de 4% com a justificativa de que esse valor é um albedo nominalmente utilizado para objetos do Sistema Solar Externo.

Se esses objetos foram capturados, permanece a pergunta de onde eles vieram. Estudos como os de Grav et al., 2003, Clark et al., 2005, Grav and Bauer, 2007 mostraram através de suas cores e inclinações espectrais que esses satélites contêm uma fração mais ou menos igual de objetos semelhantes a asteroides tipo C, P e D ou a Centauros e TNOs. Esses trabalhos sugerem origens diferentes para os satélites irregulares.

Nesse contexto, durante o Mestrado, foi realizado junto ao grupo um trabalho de caráter astrométrico para a melhoria das efemérides dos satélites irregulares de Júpiter e Saturno. Em colaboração com o Dr. Jean-Eudes Arlot do IMCCE, reduzi um banco de dados observado no Observatoire Haute-Provence (OHP) entre 1998 e 2008, contendo mais de 28 mil posições para 10 satélites. Reduzi também um banco de dados com mais de 100 mil imagens obtidas no Observatório do Pico dos Dias (OPD) entre 1992 e 2014. Já no Doutorado, neste mesmo âmbito, reduzi 810 observações feitas no European Southern Observatory (ESO) em 24 noites utilizando o detector mosaico CCD Wide Field Imager (WFI).

Um total de 6523 posições de 18 satélites foram identificadas. Esse trabalho está publicado (Gomes-Júnior et al., 2015a) e o catálogo com as posições está disponível no CDS.

Um dos principais resultados obtidos foi a grande quantidade de posições identificadas para os satélites irregulares em comparação com a quantidade utilizada nas integrações numéricas atuais publicadas por Jacobson et al. (2012). Dessa forma, é de se esperar que nossas posições contribuam significativamente para a melhoria da órbita desses objetos.

Observando os offsets das posições com respeito às efemérides ao longo do tempo e anomalia verdadeira foram identificados erros sistemáticos nas efemérides. O erro mais claro é na declinação do satélite Carme o qual foi associado a um erro em sua inclinação orbital.

Esse padrão em declinação também foi identificado para outros satélites como Pasiphae e Ananke. Para alguns satélites a cobertura orbital não foi suficiente para indicar claramente a presença de erros sistemáticos em elementos orbitais específicos. Os gráficos para todos os satélites estão disponíveis em Gomes-Júnior et al. (2015a).

4.2 Predição das ocultações

Com o objetivo de obter parâmetros físicos para os satélites irregulares com maior precisão foram feitas predições de ocultações estelares para os 7 maiores satélites de Júpiter (Himalia, Elara, Pasiphae, Sinope, Lysithea, Carme, Ananke), o satélite Phoebe de Saturno e Nereida de Netuno. Esses objetos são pequenos, se comparados aos TNOs estudados no capítulo 2, sendo que o menor dos satélites da amostra, Ananke, possui um diâmetro estimado de 28 km.

As predições foram feitas utilizando as posições de estrelas dadas no catálogo UCAC4. Após o lançamento do catálogo GAIA novas predições serão feitas. Para as posições dos satélites de Júpiter foi feita uma nova integração numérica utilizando as posições publicadas em Gomes-Júnior et al. (2015a). Essa integração foi realizada pela pós-doc Laurène Beauvalet. Para Phoebe e Nereida foram utilizadas efemérides do JPL.

Um total de 588 eventos foram obtidos entre 01 de Janeiro de 2015 e 31 de Dezembro de 2017 para os 9 objetos sendo que a maioria será descartada por passar em regiões de oceano ou onde não há observadores disponíveis. Estima-se que restem ao final cerca de 10% desse número. Para Nereida, apenas uma estrela UCAC4 foi identificada para ser ocultada. Nesse caso, utilizamos um catálogo de estrelas feito a partir do caminho aparente do satélite de Netuno, Tritão, no céu para predições de ocultações estelares pelo mesmo.

Observar uma ocultação estelar de um satélite irregular exige um esforço muito grande por parte dos observadores. A sombra cobrirá uma região muito restrita na Terra devido aos satélites irregulares serem pequenos. Portanto, antes de iniciar uma grande campa-

nha observacional, testamos algumas previsões de ocultações para objetos maiores, para avaliar a qualidade da previsão.

Esse teste consiste em se observar o objeto ocultante e a estrela a ser ocultada próximo ao evento, quando os dois objetos estiverem presentes no mesmo campo, preferencialmente próximo ao instante do evento quando os objetos estarão próximos um do outro. Assim as posições relativas entre os dois objetos terão influências mínimas dos erros das estrelas de catálogo utilizadas na redução e das possíveis distorções de campo.

Até o momento, dois testes de ocultações foram feitos, um de Himalia que ocorreu dia 03 de Março de 2015 e o segundo de Elara que ocorreu dia 30 de Março de 2015. Foram comparadas previsões oriundas da nossa integração numérica, das efemérides do JPL, e de offsets de observações tomadas próximas à data do evento.

Para o evento de Himalia identificamos uma boa concordância entre as previsões. De fato, a maior diferença entre as sombras calculadas é de $25s$ e $130km$ na direção perpendicular às sombras. Para o evento de Elara as observações tomadas no Zeiss prejudicaram a qualidade das posições uma vez que Elara é um objeto pouco brilhante. Ainda assim, as diferenças entre os mapas obtidos foram relativamente pequenas. A maior diferença entre elas é de $48s$ e $302km$.

Um pedido de tempo foi feito para o telescópio Zeiss para se tentar observar uma ocultação de Himalia dia 23 de Outubro de 2015. A sombra dessa ocultação estava prevista para passar pela região sudeste do Brasil. Infelizmente o tempo estava fechado e nenhum dos sítios disponíveis pôde observar o evento.

Uma publicação das previsões das ocultações está sendo preparada. A observação de novos eventos serão tentados.

5. Netuno e Tritão

5.1 Introdução

Tritão é um satélite de Netuno que, diferentemente dos satélites regulares dos outros planetas, possui uma órbita retrógrada, circular e altamente inclinada. Devido à sua configuração orbital é muito provável que Tritão tenha sido capturado por Netuno (McKinnon and Kirk, 2007). Ele possui um diâmetro de 1353 km (Thomas, 2000), sendo portanto pouco maior que Plutão, e seus parâmetros físicos mostram similaridades com os do planeta anão (Nimmo and Spencer, 2015).

Tritão é um dos poucos objetos do sistema solar que possuem atmosfera e é constituída principalmente de N_2 . A extrema variação da latitude subsolar em Tritão causa bruscas variações na distribuição de nitrogênio congelado na superfície do objeto de forma que a calota polar pode chegar até próximo o equador do satélite (Hansen and Paige, 1992). Modelos preveem que a pressão da atmosfera de Tritão varia ao longo do tempo de duas ordens de grandeza.

5.2 Ocultações

Nos mesmos moldes em que foram feitas observações dos caminhos de TNOs para predição de ocultações estelares (ver seção 2.2), o caminho de Tritão também foi observado gerando um catálogo de estrelas nos moldes do catálogo WFI. Infelizmente, devido a Netuno estar passando por regiões pouco populadas por estrelas brilhantes, nenhum evento pôde ser observado oriundo deste trabalho.

Em 21 de Maio de 2008 houve uma ocultação por Tritão cuja sombra cruzou o sul da África. Dos sítios que observaram, apenas duas cordas foram positivas. As observações foram feitas de La Réunion e da Namíbia com câmeras rápidas. Dentre elas, uma observou somente a atmosfera do objeto. Foi a primeira ocultação de Tritão desde 1997 (Elliot et al., 2000).

Os perfis de pressão da atmosfera de Tritão foram calculados (Sicardy et al., comunicação privada), porém, devido a uma das cordas ter pego somente atmosfera, não foi possível determinar a posição das cordas em relação ao corpo com precisão. Isso resultou em valores de pressão próximo à superfície com pequenas barras de erro interno, mas que podem estar desviados em mais de 3 sigmas do valor real.

Novas ocultações são necessárias para estudar o perfil da atmosfera de Tritão e sua evolução ao longo do tempo. Para 2015, antes que o catálogo WFI não cubra mais o caminho orbital de Tritão, ainda haverá uma oportunidade de observar uma ocultação estelar pelo objeto. O evento está predito para ocorrer dia 10 de Novembro de 2015 com a sombra passando pela China. Dependendo do offset da estrela e de Tritão, há a possibilidade da sombra ir mais ao sul passando pelo Japão ou Austrália, onde temos colaboradores que poderão observar o evento.

5.3 Astrometria

Com o objetivo de estudar os efeitos de maré sobre o sistema Netuno-Tritão, serão obtidas as posições desses objetos em mais de 7000 imagens observadas no OPD desde 1992 até o presente. Uma vez que eles estão muito próximos no céu e Netuno é muito mais brilhante do que Tritão, a posição do satélite pode estar afetada pela luz do planeta. Para eliminar essa influência será utilizada uma técnica chamada de "coronografia digital" (Assafin et al., 2009).

A vantagem desse banco de dados é sua cobertura temporal (1992 - 2015), o grande número de observações e um tratamento astrométrico diferenciado. Faremos uso de coronografia digital para eliminar a influência da luz difusa de Netuno sobre Tritão, e faremos uma determinação direta de posições de Netuno (com PSFs numéricas especialmente deduzidas para o caso de objetos extensos), com Tritão no mesmo frame. Esses dados tem o mesmo valor que o de posições oriundas de sondas, em que pesem efeitos dinâmicos de longo período (Lainey et al., 2012).

Além das posições de solo, irei trabalhar com posições telemétricas de sondas espaciais dentro do projeto ESPaCE (European Satellite PArtnership for Computing Ephemerides). Esse projeto tem por objetivo extrair e analisar dados astrométricos de medidas feitas por sondas espaciais e utilizá-las para cálculo de órbitas e geração de efemérides dos objetos dos Sistema Solar. Essas medidas são ultra precisas e poderão prover novos modelos dinâmicos para muitos satélites naturais¹.

¹<http://espace.oma.be/>

A combinação desses dois bancos de dados, junto com as posições publicadas na literatura permitirá estudar efeitos dissipativos de energia no interior de Tritão. Como dito na seção 5.1, a circularização da órbita de Tritão, a partir de uma órbita altamente excêntrica, após a captura aconteceu por dissipação oriunda de efeitos de maré (Nimmo and Spencer, 2015).

6. Conclusão e Perspectivas

Esse trabalho tem por meta estudar os objetos do Sistema Solar exterior, de forma a obter características físicas e dinâmicas relevantes para entender a formação e evolução do Sistema Solar. As técnicas utilizadas consistem em obter posições astrométricas precisas desses corpos para corrigir erros sistemáticos em suas efemérides, ou mesmo permitir a determinação de novas órbitas com novas integrações numéricas, a fim de melhorar a predição de futuras ocultações estelares. Prever, observar e reduzir ocultações estelares por esses objetos e obter seus parâmetros físicos (tamanho, forma, albedo, densidade, presença de atmosfera, satélites ou anéis) são os objetivos gerais desta Tese.

Participo ativamente em observações de TNOs, satélites, e estrelas com o objetivo de melhorar as efemérides e/ou predição de ocultações. Nesse âmbito já escrevi 1 trabalho: Gomes-Júnior et al. (2015a); e contribuo em 2 trabalhos: Camargo et al. (2015) e Desmars et al. (2015).

Observar uma ocultação pode revelar características inesperadas e até dar origem a novas descobertas no Sistema Solar. Exemplos disso são a descoberta de um sistema de anéis, estrutura antes conhecida apenas nos planetas gigantes, ao redor de um Centauro e a identificação de um alto albedo geométrico em Eris, objeto que está muito distante do Sol e possui um tamanho bem menor do que se supunha, similar ao de Plutão e Tritão. Esses dois trabalhos foram publicados na Nature em Braga-Ribas et al. (2014) e Sicardy et al. (2011), respectivamente, nos quais contribuí em caráter observacional.

Particularmente, Plutão possui um interesse especial. Recém visitado por uma sonda espacial, ele é um planeta anão que possui atmosfera, cinco satélites, sendo que o maior deles possui um diâmetro pouco maior que a metade do de Plutão. Ocultações estelares por esse objeto permitem estudar a evolução de sua atmosfera, a qual será calibrada a partir de observações oriundas da sonda *New Horizons*. Para isso uma ocultação que ocorreu próxima à data da chegada da sonda foi observada. Das observações às quais participei, dois estudos sobre a atmosfera de Plutão puderam ser feitos: Olkin et al. (2015) e Dias-Oliveira et al. (2015).

Da mesma forma que para Plutão, Ceres é um planeta anão e está sendo visitado por uma sonda. A partir de duas ocultações, calculamos o tamanho de Ceres e obtivemos posições muito precisas. Os resultados foram publicados em Gomes-Júnior et al. (2015b) e serviram como aprendizado pessoal quanto à utilização da técnica. Quando os resultados da sonda *Dawn* forem publicados, será possível calibrar a técnica de ocultações estelares utilizada nesse trabalho.

Dentre os objetos a serem ocultados, inserimos na lista os satélites irregulares dos planetas gigantes, nunca antes observados por ocultações. Diversas ocultações já estão

preditas e a publicação destas predições está em preparação (Gomes-Júnior et al. 2016, A&A, in prep.). Observações de ocultações por Himalia, satélite de Júpiter, e Tritão estão sendo preparadas.

Por fim, estudos sobre efeitos de maré no sistema Netuno-Tritão para obter parâmetros internos dos satélites serão feitos durante o Doutorado Sanduíche que ocorrerá na França em colaboração com o Doutor Valéry Lainey. Nesse trabalho, focaremos na obtenção de posições astrométricas do sistema a partir de imagens de solo observadas no OPD e de sondas espaciais dentro do projeto ESPaCE.

Referências Bibliográficas

- Agnor, C. B. and Hamilton, D. P. (2006). Neptune’s capture of its moon Triton in a binary-planet gravitational encounter. *Nature*, 441(7090):192–194.
- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., et al. (2010). Precise predictions of stellar occultations by Pluto, Charon, Nix, and Hydra for 2008–2015. *Astronomy and Astrophysics*, 515:A32.
- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., et al. (2012). Candidate stellar occultations by large trans-Neptunian objects up to 2015. *Astronomy and Astrophysics*, 541:A142.
- Assafin, M., Vieira-Martins, R., Braga-Ribas, F., et al. (2009). OBSERVATIONS AND ANALYSIS OF MUTUAL EVENTS BETWEEN THE URANUS MAIN SATELLITES. *The Astronomical Journal*, 137(4):4046–4053.
- Assafin, M., Vieira Martins, R., Camargo, J. I. B., et al. (2011). PRAIA - Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically. In Tanga, P. and Thuillot, W., editors, *Gaia follow-up network for the solar system objects : Gaia FUN-SSO workshop proceedings, held at IMCCE -Paris Observatory, France, November 29 - December 1, 2010 / edited by Paolo Tanga, William Thuillot.- ISBN 2-910015-63-7, p. 85-88*, pages 85–88.
- Benedetti-Rossi, G., Vieira Martins, R., Camargo, J. I. B., et al. (2014). Pluto: improved astrometry from 19 years of observations. *Astronomy and Astrophysics*, 570:A86.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., 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.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. (2014). A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*, 508(7494):72–75.
- Camargo, J., Magalhães, F., Vieira-Martins, R., et al. (2015). Astrometry of the main satellites of uranus: 18 years of observations. *Astronomy and Astrophysics*. submetido.

- Camargo, J. I. B., Vieira-Martins, R., Assafin, M., et al. (2014). Candidate stellar occultations by Centaurs and trans-Neptunian objects up to 2014. *Astronomy and Astrophysics*, 561:A37.
- Carry, B., Dumas, C., Fulchignoni, M., et al. (2008). Near-infrared mapping and physical properties of the dwarf-planet Ceres. *Astronomy and Astrophysics*, 478(1):235–244.
- Clark, R. N., Brown, R. H., Jaumann, R., et al. (2005). Compositional maps of Saturn’s moon Phoebe from imaging spectroscopy. *Nature*, 435(7038):66–69.
- Desmars, J., Camargo, J., Braga-Ribas, F., et al. (2015). Orbit determination of trans-neptunian objects and centaurs for the prediction of stellar occultations. *Astronomy and Astrophysics*. submetido.
- Dias-Oliveira, A., Sicardy, B., Lellouch, E., et al. (2015). Pluto’s atmosphere from stellar occultations in 2012 and 2013. *The Astrophysical Journal*. submetido.
- Drummond, J., Carry, B., Merline, W., et al. (2014). Dwarf planet Ceres: Ellipsoid dimensions and rotational pole from Keck and VLT adaptive optics images. *Icarus*, 236:28–37.
- Elliot, J., Person, M. J., McDonald, S. W., et al. (2000). The Prediction and Observation of the 1997 July 18 Stellar Occultation by Triton: More Evidence for Distortion and Increasing Pressure in Triton’s Atmosphere. *Icarus*, 148(2):347–369.
- Elliot, J. L., Person, M. J., Zuluaga, C. A., et al. (2010). Size and albedo of kuiper belt object 55636 from a stellar occultation. *Nature*, 465(7300):897–900.
- Fernández, Y. R., Jewitt, D. C., and Sheppard, S. S. (2002). Thermal Properties of Centaurs Asbolus and Chiron. *The Astronomical Journal*, 123(2):1050–1055.
- 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., Assafin, M., Vieira-Martins, R., Arlot, J.-E., et al. (2015a). Astrometric positions for 18 irregular satellites of giant planets from 23 years of observations. *Astronomy and Astrophysics*. aceito.
- Gomes-Júnior, A. R., Giacchini, B. L., Braga-Ribas, F., et al. (2015b). Results of two multichord stellar occultations by dwarf planet (1) Ceres. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451(3):2295–2302.
- Grav, T. and Bauer, J. (2007). A deeper look at the colors of the saturnian irregular satellites. *Icarus*, 191(1):267–285.
- Grav, T., Holman, M. J., Gladman, B. J., and Aksnes, K. (2003). Photometric survey of the irregular satellites. *Icarus*, 166(1):33–45.
- Hansen, C. J. and Paige, D. A. (1992). A thermal model for the seasonal nitrogen cycle on Triton. *Icarus*, 99(2):273–288.

- Jacobson, R., Brozović, M., Gladman, B., et al. (2012). IRREGULAR SATELLITES OF THE OUTER PLANETS: ORBITAL UNCERTAINTIES AND ASTROMETRIC RECOVERIES IN 2009–2011. *The Astronomical Journal*, 144(5):132.
- Jewitt, D. and Luu, J. (1993). Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1. *Nature*, 362(6422):730–732.
- Lainey, V., Karatekin, O., Desmars, J., et al. (2012). STRONG TIDAL DISSIPATION IN SATURN AND CONSTRAINTS ON ENCELADUS’ THERMAL STATE FROM ASTROMETRY. *ApJ*, 752(1):14.
- McKinnon, W. and Kirk, R. (2007). *Triton*, chapter 26, page 483–502. Elsevier.
- McKinnon, W. B. (2012). Where Did Ceres Accrete? *LPI Contributions*, 1667:6475.
- Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Gomes, R. (2005). Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature*, 435(7041):462–465.
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., and Morbidelli, A. (2007). Capture of Irregular Satellites during Planetary Encounters. *AJ*, 133(5):1962–1976.
- Nimmo, F. and Spencer, J. (2015). Powering Triton’s recent geological activity by obliquity tides: Implications for Pluto geology. *Icarus*, 246:2–10.
- Olkin, C., Young, L., Borncamp, D., et al. (2015). Evidence that Pluto’s atmosphere does not collapse from occultations including the 2013 May 04 event. *Icarus*, 246:220–225.
- Porco, C. C., West, R. A., McEwen, A., et al. (2003). Cassini Imaging of Jupiter’s Atmosphere, Satellites, and Rings. *Science*, 299(5612):1541–1547.
- Rettig, T. (2001). Implied Evolutionary Differences of the Jovian Irregular Satellites from a BVR Color Survey. *Icarus*, 154(2):313–320.
- Sheppard, S. S. and Jewitt, D. C. (2003). An abundant population of small irregular satellites around Jupiter. *Nature*, 423(6937):261–263.
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. (2011). A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation. *Nature*, 478(7370):493–496.
- Smith, B. A., Soderblom, L. A., Banfield, D., et al. (1989). Voyager 2 at Neptune: Imaging Science Results. *Science*, 246(4936):1422–1449.
- Stern, S. A., Bagenal, F., Ennico, K., Gladstone, G. R., Grundy, W. M., McKinnon, W. B., Moore, J. M., Olkin, C. B., Spencer, J. R., Weaver, H. A., and et al. (2015). The pluto system: Initial results from its exploration by new horizons. *Science*, 350(6258):aad1815–aad1815.
- Thomas, P. (2000). The Shape of Triton from Limb Profiles. *Icarus*, 148(2):587–588.
- Thomas, P. (2010). Sizes, shapes, and derived properties of the saturnian satellites after the Cassini nominal mission. *Icarus*, 208(1):395–401.
- Thomas, P. C., Parker, J. W., McFadden, L. A., et al. (2005). Differentiation of the asteroid Ceres as revealed by its shape. *Nature*, 437(7056):224–226.

- 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., Dussler, R., 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., et al. (2013). THE FOURTH US NAVAL OBSERVATORY CCD ASTROGRAPH CATALOG (UCAC4). *The Astronomical Journal*, 145(2):44.