

## **APLICAÇÕES ASTROMÉTRICAS E FOTOMÉTRICAS PARA O ESTUDO DE CORPOS DO SISTEMA SOLAR EXTERIOR**

### **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, 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.

## **Mestrado**

Realizei junto ao grupo um trabalho de caráter astrométrico para a melhoria das efemérides dos satélites irregulares de Júpiter Saturno. Em colaboração com o Dr. Jean-Eudes Arlot do IMCCE, reduzi um banco de dados observado no Observatoire Haute-Provence entre 1998 e 2008, obtendo mais de 3 mil posições para 19 satélites. Reduzi também um banco de dados com mais de 80 mil imagens obtidas no OPD. Os resultados obtidos serão publicados em periódicos de circulação internacional.

## **Objetivos**

O objetivo do projeto é utilizar técnicas astrométricas e fotométricas para o estudo do Sistema Solar externo. Esse trabalho será feito em cima de bancos de dados com observações feitas no OPD/LNA e outros observatórios, além de observações que serão feitas objetivadas no projeto proposto.

Inicialmente, faremos a integração numérica das posições dos satélites irregulares de Júpiter e Saturno obtidas no meu projeto de mestrado. Essa parte do projeto será desenvolvida em colaboração com o Dr. Josselin Desmars, atualmente trabalhando no Observatório Nacional, utilizando o pacote NIMAS. Os resultados desse trabalho serão publicados em até três periódicos de circulação internacional, sendo um sobre a organização dos dados, redução e análise das posições obtidas para os satélites utilizando o banco de dados do OHP (Observatoire Haute-Provence) e outro como o banco de dados do LNA. O terceiro será uma publicação da integração numérica das órbitas desses objetos.

Devido à quantidade de posições obtidas em comparação com a quantidade de posições usadas na integração orbital da efeméride atualmente estabelecida (Jacobson, 2012), chegando a cerca de 30% para os satélites mais observados, e ao grande intervalo de tempo em que nossas observações se distribuem, a órbita desses objetos serão refinadas permitindo assim predições com maior confiança de ocultações estelares, método que tem se mostrado muito eficiente na obtenção de propriedades físicas dos objetos ocultados (tamanho, forma, densidade, superfície, etc.). Essas informações nos permitirá aproximarmos da resposta sobre suas origens.

Ainda utilizando o banco de dados do LNA, o próximo trabalho será entorno do sistema de Netuno. O estudo astrométrico de Netuno tem se mostrado de bastante interesse científico devido a recentes publicações que apontam um desvio sistemático nas efemérides de objetos dos Sistema Solar externo como Urano (Pinho, 2012) e Plutão (Rossi, 2012).

Nesse trabalho será usado uma nova metodologia de astrometria. Uma vez que Netuno é um objeto extenso, ele não forma uma imagem pontual e não pode ser tratada por uma PSF Gaussiana como no caso de estrelas. A obtenção do fotocentro de objetos extensos (maiores que  $0.5''$ ) tem se mostrado mais eficiente quando tratado de forma numérica.

Para a obtenção das posições de Tritão, utilizaremos um método conhecido por corografia digital, inédito nesse sistema planetário, onde procuramos eliminar a influência da luz de Netuno na posição do satélite, diminuindo assim erros sistemáticos tanto astrométricos quanto fotométricos cometidos por autores que não tomaram esse cuidado. Essa técnica foi bem sucedida na astrometria de satélites regulares de Urano (Pinho, 2012) e já faz parte do pacote de redução astrométrica PRAIA (Assafin, 2009).

As posições que serão obtidas para os satélites internos de Netuno terão precisão tal que nos permitirá aplicar o modelo de marés desenvolvido pelo Dr. Valery Lainey do Observatoire de Paris/IMCCE. Esse modelo está sendo aplicado às posições obtidas por Pinho (2012) e está de conclusão (comunicação privada) e o próximo passo será aplicá-lo às posições de Tritão. Nesse intuito, um contato mais direto será necessário e ele se dará por meio de um Doutorado sanduiche no IMCCE.

Um método que tem gerado boas posições astrométricas é o método de ocultações estelares. Além dos parâmetro físicos que podem ser obtidos por esse método, o instante de tempo central do evento em conjunto com a posição da estrela, que em sua maioria tem a posição medida com mais precisão do que a de um objeto móvel fornecem de maneira direta uma posição astrométrica muito precisa.

O grupo já vem há algum tempo trabalhado na predição e observação de ocultações estelares, inclusive uma de Tritão em 2008 (única do objeto até o momento). Essa ocultação teve apenas uma corda na Namíbia e a atmosfera do satélite foi bem detectada, porém somente com uma segunda corda será possível determinar os parâmetros de impacto dessa corda. A observação de ocultações estelares por Tritão nos permitirá estudar com grande precisão a evolução da atmosfera do satélite, precisão essa que só foi alcançada até o momento com a passagem da Voyager vinte anos antes.

Uma técnica que será utilizada e que permitirá que se resgate a ocultação e que permitirá a

calibração do perfil de pressão e temperatura da atmosfera é conhecida por corda astrométrica. Essa técnica consiste em observar o objeto ocultante e a estrela ocultada no mesmo campo de visão (FOV). Ela se baseia em uma astrometria diferencial onde um modelo que relaciona as distâncias objeto-estrela teóricas e observadas ajusta os pontos e determina o offset momentâneo da efemérides. Como as observações são feitas próximas ao evento, os erros sistemáticos da efeméride e da posição nominal da estrela são absorvidos pelo offset podendo-se assim obter com grande precisão a trajetória aparente do objeto.

Essa técnica foi empregada com sucesso na ocultação de 6 de Novembro de 2010 de Eris. A predição da ocultação se mostrou precisa tendo uma diferença de apenas 2 mas em parâmetro de impacto da ocultação observada. Considerando que o diâmetro aparente de Eris é de 33 mas e que ele está a 97 UA de distância ao Sol, isso é um grande feito. A observação dessa ocultação gerou uma publicação na revista *Nature* (Sicardy, 2011) onde eu participo.

As ocultações estelares por TNOs, Plutão e satélites resultam em campanhas internacionais e mobilizam uma grande quantidade de pessoas e instrumentos. Os telescópios utilizados vão desde telescópios com 20 cm de diâmetro até a telescópios de grande porte como o VLT. Uma ocultação mal-sucedida resulta em uma grande perda de esforço e dinheiro. Por isso, uma predição precisa é fundamental para que o projeto dê frutos.

A minha participação junto ao grupo no projeto de ocultações estelares por TNOs tem crescido e hoje interajo em várias partes do projeto desde a observação e redução astrométrica de estrelas e TNOs para predição das ocultações até a observação da ocultação e redução para obtenção da curva de luz. Um segundo trabalho em que sou co-autor e é oriundo do envolvimento com ocultações estelares é um artigo sobre a atmosfera de Plutão que será publicada na revista *Icarus* (Olkin, 2014). O terceiro será uma co-autoria em uma nova publicação na *Nature* (Braga-Ribas, 2014, submetido).

O esforço para o aprimoramento das técnicas astrométricas se justifica pelo lançamento próximo do GAIA. Com a publicação dos primeiros catálogos, o trabalho astrométrico aumentará exponencialmente. Posições já reduzidas e publicadas serão revisitadas, novas integrações numéricas para obtenção de órbitas mais precisas serão feitas e, além disso, com a grande quantidade de estrelas que haverá no catálogo, o número de ocultações aumentarão exigindo um maior esforço no acompanhamento da órbita do objeto ocultante.

O software que será utilizado para a redução astrométrica será o pacote PRAIA (Pacote de Redução Astrométrica de Imagens Astronômicas). Esse pacote foi feito pelo Dr. Marcelo Assafin em colaboração com o grupo de astrometria do Rio, do qual fazem parte pesquisadores e estudantes

do Observatório Nacional e do Observatório do Valongo. É oriundo de uma experiência de mais de 20 anos do grupo e tem gerado bons resultados.

### **Referências**

Assafin, M., Vieira Martins, R., Andrei, A. H. 1997, AJ, 113, 1451

Assafin, M., Vieira-Martins, R., Braga-Ribas, F., Camargo, J. I. B., da Silva Neto, D. N., Andrei, A. H. 2009, AJ, 137, 4046-4053

Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., Andrei, A. H., Sicardy, B., Young, L., da Silva Neto, D. N., Braga-Ribas, F. 2010, A&A, 515, id.A32

Fabiola Pinho Magalhães, 2012, “Astrometria de Urano e de seus Satélites Principais: 18 anos de Observações no OPD/LNA”, Dissertação de Mestrado (ON/MCTI)

Gustavo Benedetti Rossi, 2012, “Plutão: Análise Astrométrica de 15 anos de Observações”, Dissertação de Mestrado (ON/MCTI)

Jacobson, R., Brozovic, M., Gladman, B., Alexandersen, M., Nicholson, P. D., Veillet, C. 2012, AJ, 144, 132

Lainey V., Arlot J. E., Karatekin O., Van Hoolst T. 2009, “Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations”, Nature, 459, 957

Sicardy, B. et al. 2011, “A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation”, Nature, 478, 493

Tsiganis, K., Gomes da Silva, R., et al. “Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System”, 2005, Nature, 435, 459

Altair Ramos Gomes Júnior