

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo

Felipe Braga Ribas

**FENÔMENOS MÚTUOS ENTRE OS SATÉLITES DE
URANO**

2009



Felipe Braga Ribas

FENÔMENOS MÚTUOS ENTRE OS SATÉLITES DE URANO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Astronomia.

Orientadores: Prof. Dr. Roberto Vieira Martins, Prof. Dr. Marcelo Assafin.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2009

Braga-Ribas, Felipe

Fenômenos Mútuos entre os Satélites de Urano/ Felipe Braga Ribas
- Rio de Janeiro: UFRJ/ OV, 2009

xvi, 63f.:il; 30 cm

Orientadores: Roberto Vieira Martins; Marcelo Assafin.

Dissertação (mestrado) - UFRJ/ OV/ Programa de Pós-graduação
em Astronomia, 2009.

Referências Bibliográficas: f: 81-85.

1.Fenômenos Mútuos 2.Satélites de Urano 3.Processamento de
Imagens 4.Fotometria 5.Modelagem (ocultações/eclipses)

6. Fenômenos Mútuos I. Vieira-Martins, Roberto.

II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo,
Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2009 III. Título.

FENÔMENOS MÚTUOS ENTRE OS SATÉLITES DE URANO

Felipe Braga Ribas

Orientadores: Prof. Dr. Roberto Vieira Martins, Prof. Dr. Marcelo Assafin.

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Astronomia.

Aprovada por:

Presidente, Prof. Dr. Marcelo Assafin - OV/UFRJ

Prof. Dr. Roberto Vieira Martins - ON/MCT

Prof. Dr. Hélio Jaques Rocha Pinto - OV/UFRJ

Prof. Dr. Dario Nepomuceno da Silva Neto - UEZO

Prof. Dr. Gustavo Frederico Porto de Mello - OV/UFRJ (suplente)

Prof. Dr. Rodney da Silva Gomes - ON/MCT (suplente)

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2009

"Filho. Olha sempre o céu, a Lua e as estrelas, pode ter certeza que eu estarei olhando também. Durma bem, amo muito, muito, muito você. Beijos, Mami e Papi"

...Je viens du ciel et les étoiles entre elles ne parlent que de toi...

Francis Cabrel – "Petit Marie"

Agradecimentos

É impossível chegar ao ponto de defender uma dissertação sem o apoio de muitos. Chegando à este marco em minha vida, sinto vontade de dizer a todas estas pessoas que me ajudaram, em voz alta: MUITO OBRIGADO!!

A alguns, deixo aqui meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador, Dr. Roberto Veira Martins, que me mostrou o caminho a trilhar e deu suporte ao longo destes dois anos, trazendo a tona o melhor de mim, nesta gratificante labuta.

Ao grupo de trabalho, Prof. Dr. Marcelo Assafin, Dr. Julio Camargo, Prof. Dr. Dario da Silva Neto e Dr. Alexandre Andrei, que tanto me ensinaram nestes dois anos.

Aos meus pais, Othon Mäder Ribas e Dorothea Braga Ribas, de quem tive o apoio mais fundamental, mais verdadeiro, mais intenso. Sem o suporte de vocês, teria sido impossível chegar até aqui. Não há palavras para descrever a importância de vocês para eu seguir meus passos.

À minha noiva, Giovana Santos Righi, que junto comigo, travou esta dura luta com a saudades por ficarmos estes dois anos vivendo em cidades distantes. Obrigado por seu carinho nos reencontros e beijos nas despedidas.

Às minhas irmãs e cunhados, que fazem o ambiente familiar tão aconchegante. Ao meu afilhado Pedro e à minha sobrinha Renata que enchem as nossas vidas de ternura.

Ao meus tios José Bonifácio e Nícia Ribas, por terem sido a minha família aqui no Rio de Janeiro, junto com minha prima Renata e seu marido Yasser, que aliás me apresentou ao Valongo.

Ao Rafael Sfair, meu bom amigo, poliglota em linguagens de computação (C, fortran, LaTeX, Gnuplot, ...), por ter me ajudado a arranhar um pouco de cada uma destas línguas, facilitando meu trabalho. Além é claro do companheirismo desde os tempos de Iniciação Científica.

Aos amigos/colegas do mestrado, por terem dividido comigo o dia a dia acadêmico, também a pausa nas tardes para o café e os dias de descansos com passeios para vermos o que há de bonito no Rio.

Ao Observatório do Valongo, por ter aceitado a minha inscrição e me dado todo suporte e condições necessárias, nestes dois anos de ótimo convívio, para a minha formação e realização deste trabalho.

Ao pessoal do LNA/OPD que me recebeu por mais de 60 noites para observações diversas, sempre com muita simpatia e apoio logístico. Ao Rodrigo Prates Campos, pelo apoio técnico que permitiu a realização das observações para este trabalho.

Aos amigos que, apesar da distância, não deixam o contato se perder e me recebem com fortes abraços nos reencontros.

Ao prof. Dietmar W. Foryta por ter sido o primeiro a me mostrar a beleza da pesquisa em astronomia.

Ao CACEP por ter me mostrado as maravilhas do céu noturno e fornecido uma excelente base para observações.

Este trabalho contou com o apoio financeiro de todos os brasileiros pagadores de impostos, através de bolsa do Programa de Demanda Social da CAPES.

Resumo

A compreensão do Sistema Solar passa pelo estudo das órbitas dos satélites dos planetas exteriores. Isto é feito através de modelos dinâmicos que necessitam de posições com grande acurácia destes corpos. Uma ótima oportunidade para se atingir esse objetivo é através de astrometria fotométrica, realizada durante os equinócios dos planetas gigantes, quando seus satélites promovem ocultações e eclipses entre si, para um observador na Terra. Esses eventos são conhecidos como fenômenos mútuos entre os satélites. Para Urano, eles ocorrem somente a cada 42 anos. A última vez que ocorreram foi em 1966, quando a tecnologia do CCD ainda não era disponível, inviabilizando a observação de tais eventos devido às dificuldades inerentes à configuração: satélites fracos próximos a um planeta brilhante. Portanto, as ocultações e eclipses dos satélites de Urano observados no período 2006-2009 são os primeiros registros da história. Neste trabalho, cinco ocultações e dois eclipses, envolvendo Miranda, Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon (os cinco satélites principais de Urano), são apresentados e discutidos, com suas curvas de luz, ajustes e parâmetros. Eles foram observados com o telescópio de 1,60 m Perkin-Elmer do Observatório do Pico dos Dias (LNA/Brasil), utilizando um filtro I , que reduz a contaminação da luz do planeta na imagem. Não obstante, a imagem passou por um processo computacional, chamado de coronografia digital, que remove a contribuição do planeta, deixando a imagem com um fundo de céu plano. Esta técnica permite a realização de fotometria de alta precisão para obtenção de curvas de luz, as quais foram ajustadas por um processo de mínimos quadrados não lineares, com um modelo geométrico simples, que considera os corpos em evento como dois discos cinzas. Isto permite determinar os valores dos parâmetros envolvidos, a saber: instante central, parâmetro de impacto, velocidades relativas, razão de albedos e os raios dos satélites. Como a razão de albedos e o parâmetro de

impacto são altamente correlacionados, o primeiro foi fixado no processo do ajuste. Seus valores determinados de imagens tomadas horas antes ou depois dos fenômenos. Os resultados apresentam precisões médias de 3,42 segundos para o instante central, 7,9 km (ou 0,56 mas) para o parâmetro de impacto e 0,21 km /s (ou 0,015 mas/s) para a velocidade relativa. A comparação com as teorias utilizadas para as previsões destes eventos, conhecidas como GUST86 e LA06 [(Christou 2005) e (Arlot *et al.* 2006)], mostra que a última apresenta valores mais próximos dos obtidos neste trabalho. Estes são, pelo menos, uma ordem de grandeza mais precisos que aqueles obtidos através de técnicas astrométricas clássicas, e serão de grande importância para o ajuste de novas teorias dinâmicas dos satélites de Urano.

Palavras-chave: Satélites de Urano (Ariel, Umbriel, Titânia, Oberon, Miranda); Processamento de imagens; Fotometria; Modelos (eclipse/ocultação); Fenômenos Mútuos.

Abstract

The knowledge of the Solar System passes through the study of the orbits of the satellites of the outer planets. This can be accomplished using dynamical models that require high accuracy positions of these bodies. Great opportunities to achieve this goal, are via photometric astrometry, performed during the giant planets' equinox with the Sun, when their satellites occult and eclipse each other, to an Earth-based observer. These events are called mutual phenomena between the satellites. For Uranus, they occur every 42 years. The last occurrence was in 1966, when the CCD technology was still not available, meaning that these events could not be observed because of the difficulties implied for the configuration: faint satellites near a bright planet. So, the occultation and eclipses from the 2006 - 2009 season of mutual phenomena of the Uranian Satellites were the first to be observed in history. In this study five occultations and two eclipses, involving Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, and Oberon (the five major satellites of Uranus), with their light curves, fitting and parameters are presented and discussed. They were observed with a 1.60 m Perkin-Elmer telescope at Pico dos Dias Observatory (LNA/Brazil), using an *I* filter, that reduces the planets' light scattered in the image. Nonetheless, the images passed for a computational process, called digital coronagraphy, which removes the contribution of the planet, leaving the image with a flat sky background. This technique allowed a high precision photometry for determination of the light curves. They were fitted in a non-linear least squares process, with a simple geometric model, that considers the event bodies as two gray disks. It allows the determination of the parameters involved, namely: central instant, impact parameter, relative velocities, albedo ratios and satellites radii. As the albedos ratio and the impact parameters have a strong correlation, the first were fixed in the fitting process with values calculated from images taken hours before or after some

events. The results were obtained with mean precisions of 3.42 seconds for the central instant, 7.9 km (or 0.56 mas) for the impact parameter and 0.21 km /s or (0.015 mas/s) for the relative velocity. The comparison of the theories used for the predictions of the events, known as GUST86 and LA06 [(Christou 2005) and (Arlot *et al.* 2006)], showed that the latter gives values that are closer to the ones obtained here. These are at least 10 times better than those obtained with classical astrometry techniques, and will be valuable for the adjustment of new dynamical theories of the satellites of Uranus.

Keywords: Uranus satellites (Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Miranda); Image Processing: photometry; Models (eclipses/occultations); Mutual phenomena.

Sumário

1	Introdução	17
2	Observações	23
2.1	Equipamentos	23
2.1.1	Telescópio	23
2.1.2	Sensor	23
2.1.3	Filtro	24
2.2	Crítérios para seleção de eventos	28
2.3	Observações	29
3	Tratamento das Imagens	32
3.1	Calibração	32
3.2	Coronografia	35
3.3	Fotometria	38
3.4	Curva de Luz	40
4	Modelo Teórico	43
4.1	Eventos Mútuos	43
4.2	Parâmetros	44
4.2.1	Parâmetro de Impacto	45
4.2.2	Instante Central	45
4.2.3	Velocidade Relativa	46
4.2.4	Razão de Albedos	46
4.2.5	Raios	51
4.3	Modelagem	51
4.3.1	Caso 1	54
4.3.2	Caso 2	55
4.3.3	Caso 3	55
4.3.4	Caso 4	56
4.3.5	Caso 5	57

4.3.6	Derivadas	59
	Razão albedos	59
	Parâmetro de impacto	63
	Velocidade relativa	63
	Instante Central	64
4.4	Ajuste	64
5	Resultados	66
5.1	Ariel oculta Umbriel - 13 de Agosto 2007	67
5.2	Umbriel oculta Oberon - 14 de Agosto 2007	69
5.3	Umbriel oculta Ariel - 19 de Agosto 2007	71
5.4	Ariel oculta Miranda - 08 de Outubro 2007	73
5.5	Titânia eclipsa Miranda - 12 de Outubro 2007	75
5.6	Ariel oculta Miranda - 18 de Outubro 2007	76
5.7	Ariel eclipsa Titânia - 28 de Novembro 2007	78
6	Conclusão	80
A	Razão de Albedos	87
A.1	Direta	87
A.2	Indireta	87
	A.2.1 Caso 1	88
	A.2.2 Caso 2	88
B	Artigo	90

Lista de Figuras

1.1	Urano e seus satélites principais	19
2.1	Eficiência quântica do CCD	25
2.2	Albedo em função do comprimento de onda	26
2.3	Albedo dos satélites em função do comprimento de onda	26
2.4	Banda de passagem do filtro <i>I</i>	27
2.5	Banda de passagem do CCD com o Filtro <i>I</i>	27
2.6	Curva de limite físico do telescópio Perkin-Elmer do OPD	28
3.1	Master dark	34
3.2	Master flat	34
3.3	Coronografia clássica	36
3.4	Perfil do planeta	37
3.5	Imagem coronografada	37
3.6	Processo coronografia	38
3.7	Fotometria diferencial	41
3.8	Diferença de magnitude	42
4.1	Parâmetro de Impacto	44
4.2	Velocidade relativa JPL	47
4.3	Miranda	48
4.4	Ariel	48
4.5	Umbriel	49
4.6	Titânia	49
4.7	Oberon	49
4.8	Modelo geométrico	52
4.9	Modelo caso 1	54
4.10	Modelo caso 2	55
4.11	Modelo caso 3	56
4.12	Modelo caso 4	57
4.13	Modelo caso 5	58

5.1	Ocultação de Umbriel por Ariel em 13 de agosto de 2007	68
5.2	Ocultação de Oberon por Umbriel em 14 de agosto de 2007	70
5.3	Ocultação de Ariel por Umbriel em 19 de agosto de 2007	71
5.4	Ocultação de Miranda por Ariel em 8 de outubro de 2007	74
5.5	Eclipse de Miranda por Titânia em 12 de outubro de 2007	75
5.6	Ocultação de Miranda por Ariel em 18 de outubro de 2007	77
5.7	Eclipse de Titânia por Ariel em 28 de novembro de 2007	78

Lista de Tabelas

1.1	Características dos satélites	20
2.1	Características do CCD301	24
2.2	Parâmetros observacionais	30
2.3	Fenômenos selecionados	31
3.1	Parâmetros fotométricos	40
4.1	Raios dos Satélites	51
5.1	Ariel oculta Umbriel - 13 de Agosto 2007	69
5.2	Umbriel oculta Oberon - 14 de Agosto 2007	70
5.3	Umbriel oculta Ariel - 19 de Agosto 2007	72
5.4	Umbriel oculta Ariel - 19/08/07 (LNA comparado Miller & Chanover, 2009)	72
5.5	Ariel oculta Miranda - 08 de Outubro 2007	74
5.6	Titânia eclipsa Miranda - 12 de Outubro 2007	76
5.7	Ariel oculta Miranda - 18 de Outubro 2007	77
5.8	Ariel eclipsa Titânia - 28 de Novembro 2007	79

Capítulo 1

Introdução

Os planetas gigantes que orbitam o Sol, nominalmente, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, apresentam sistemas de satélites e anéis que lembram o próprio Sistema Solar. Estes sistemas são formados por: anéis, feitos de pedaços de rochas e gelo; pequenos satélites internos; satélites principais, maiores em tamanho; e luas escuras, irregulares e distantes do corpo principal. Como o período orbital dos satélites é muito menor que o dos planetas, tornam-se interessantes alvos para estudos de evolução dinâmica orbital, sujeita a perturbações do próprio sistema e a efeitos de maré. Somando outras informações, como características físicas e morfológicas, estes sistemas auxiliam até mesmo no estudo da formação e evolução do Sistema Solar (Arlot & Stavinschi 2007).

Estudam-se efeitos dinâmicos por perturbações causadas, por ação do Sol, outros planetas e outros satélites, ou pelo achatamento do planeta, através de modelos analíticos ou numéricos. O último considera tais efeitos em integrações numéricas, para, por exemplo, calcular suas influências sobre as órbitas dos satélites. Com bons modelos pode-se calcular efemérides e compará-las à medições astrométricas, quantificando, assim, efeitos gravitacionais e dissipativos por maré.

Forças dissipativas de maré são muito difíceis de medir por serem muito fracas. Apesar disto, são cumulativas e mais atuantes nos objetos mais próximos ao corpo principal (Vienne 2008). Como são efeitos muito fracos, provocam pequenas variações nas órbitas dos satélites e, portanto, para serem detectados, é preciso medir a posição destes corpos com muita precisão. Só assim será possível testar o modelo ou, ainda melhor, ajustá-lo às observações para compreender a dinâmica do sistema (Arlot & Stavinschi 2007).

Então, realizar astrometria desses satélites torna-se estratégico para a compreensão do Sistema Solar. A técnica de medição astrométrica tradicional (posição do objeto em relação a estrelas de catálogo), permite determinar a posição de um satélite com precisão de várias dezenas a centenas de milissegundos de grau (**mas**, por simplicidade). Para o caso de Urano, interesse deste trabalho, medidas intersatélites chegam a valores de

50 e 100 mas para os quatro maiores (Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon) e Miranda, respectivamente (Veiga & Vieira Martins 1999).

Outra técnica é a astrometria usando fotometria. Em épocas específicas pode-se observar eclipses e ocultações dos satélites pelo planeta. Quando o primeiro entra no cone de sombra do segundo, de acordo com Mallama (2007), é possível determinar suas posições relativas com precisão de algumas dezenas de mas. Outra oportunidade interessante é quando os satélites realizam eventos mútuos; ou seja, os satélites promovem ocultações e eclipses entre si.

Objeto de estudo deste trabalho, os fenômenos mútuos entre os satélites oferecem a possibilidade de se medir as posições relativas entre esses corpos com precisão de poucos mas. Estes eventos ocorrem em datas e horários muito específicos, quando a luz oriunda desses objetos diminui durante alguns minutos e retorna a seu patamar inicial. Isto ocorre porque parte da luz refletida por um satélites é bloqueada por outro (ocultação) ou por sua sombra (eclipse). A medição deste fluxo de luz disposta ao longo de uma série temporal, seja de lista ou em um gráfico, se configura em uma curva de luz, da qual, através de modelos, determina-se parâmetros como, o instante de maior aproximação aparente entre os objetos e o valor desta distância. Os resultados que se obtêm com esta técnica estão entre os mais precisos que se consegue por qualquer método astrométrico, por isto são de grande importância para a modelagem dos sistemas de satélites.

Quando o Sol e a Terra cruzam o plano orbital dos satélites principais de um planeta, tem-se eclipses e ocultações, respectivamente. Portanto, os eventos mútuos ocorrem próximos aos equinócios dos planetas, quando o Sol cruza o plano equatorial desses objetos, já que os satélites principais orbitam quase sobre o plano do equador e, vista dos gigantes gasosos, a Terra sempre está muito próxima ao Sol. Isto acontece duas vezes durante uma órbita, para Júpiter a cada 6 anos, Saturno a cada 15 anos e Urano somente a cada 42 anos (Netuno só tem Tritão como satélite principal). Recentemente, em 2007, o Sol cruzou o equador de Urano, em 2009 cruzará o de Júpiter e em 2010 o de Saturno.

Por sua raridade e importância, campanhas internacionais são realizadas para a observação dos fenômenos mútuos. Com duas observações distintas de dois dados satélites, é possível calcular as informações astrométricas pertinentes. Se alguns eventos são observados, o resultado de suas reduções são de grande utilidade para o ajuste dos modelos dinâmicos teóricos [veja Arlot *et al.* (2008)].

A última vez em que fenômenos mútuos entre os satélites de Urano ocorreram foi em 1966. Neste ano, a tecnologia do CCD (dispositivo de carga acoplada) ainda não estava disponível. O pequeno brilho das luas e sua proximidade ao relativamente brilhante Urano, tornou impossível a observação dos eventos aos astrônomos da época. Em 2007, pela primeira vez na história, pôde-se observar tais eventos. Por isto Christou (2005) e

Arlot *et al.* (2006) publicaram previsões de fenômenos a serem observados a partir da Terra. Utilizaram modelos de efemérides (GUST86 e LA06, maiores detalhes no capítulo 5), considerando as posições e os discos aparentes dos satélites, e forneceram: previsões para os instantes dos eventos, satélites envolvidos, tipo de cada evento (se ocultação ou eclipse, parcial ou total), distância ao centro do planeta, a queda de fluxo, entre outros parâmetros.

Urano foi oficialmente descoberto em 1781 por William Herschell, mas já havia sido observado por outros astrônomos que não perceberam que se tratava de um planeta (figura 1.1). Sendo o sétimo em distância a partir do Sol, a uma distância média de 19,2 UA (unidades astronômicas) com período orbital de 84,02 anos. Seu eixo de rotação é atípico com inclinação de $97,8^\circ$ em relação ao plano orbital. Tem 17 massas terrestres e raio equatorial de 25.600 km. Apresenta um disco de $4''$ de diâmetro (em média) no plano celeste com magnitude visível de aproximadamente 6.

Apresenta um tom esverdeado devido a presença de metano em sua atmosfera, que absorve uma fração da luz vermelha do espectro solar. É constituído majoritariamente por hidrogênio e hélio com traços de água e amônia. Foi visitado pela sonda espacial Voyager 2 em janeiro de 1986 (Stone & Miner 1986), que, além de estudar o planeta, também tomou imagens dos cinco satélites principais e descobriu dez novos. Hoje se conhecem 27 luas ao redor de Urano, além de 11 tênues anéis, quase todos muito estreitos.

Os satélites principais de Urano o orbitam a uma distância aproximada de 129.900 a 583.500 km e com períodos orbitais de 1,41 a 13,46 dias, do mais próximo (Miranda) ao mais distante (Oberon). Nominalmente e na ordem da numeração que recebem, eles são: [1] Ariel, [2] Umbriel, [3] Titânia, [4] Oberon e [5] Miranda. Têm órbitas regulares sobre



Figura 1.1: Urano e seus satélites principais. Imagem obtida em 13 de agosto de 2007, com o telescópio Perkim-Elmer de 1,60 m no Observatório do Pico dos Dias.

o plano equatorial de Urano. Na tabela 1.1 pode-se ver algumas de suas características físicas e orbitais [Laskar & Jacobson (1987); Thomas (1988); Karkoschka (2001)].

	Miranda [5]	Ariel [1]	Umbriel [2]	Titânia [3]	Oberon [4]
Semi-eixo (km)	129.900	190.900	266.000	436.600	583.500
Período (dias)	1,41	2,52	4,14	8,71	13,46
Excentricidade	0,013	0,0012	0,0039	0,0011	0,0014
Inclinação (°)	4,34	0,04	0,13	0,08	0,07
Raio (km)	235,8	578,9	584,7	788,9	761,4
Massa (10^{19} kg)	6,6	135	117	353	301
Albedo médio	0,32	0,39	0,21	0,27	0,23
Magnitude (V)	15,8	13,7	14,5	13,5	13,7

Tabela 1.1: Características dinâmicas e físicas dos cinco satélites principais de Urano. Magnitudes visível na oposição de Urano.

Tem-se como objetivo deste trabalho a observação, redução e análise dos fenômenos mútuos entre estes satélites. Para isto, utilizando as previsões específicas para o Observatório do Pico dos Dias (IAU 874), geradas a partir do site <http://www.imcce.fr/pheura07> (Arlot *et al.* 2006), foram selecionados 22 eventos a serem observados de maio a dezembro de 2007. Destes, 11 foram observados com sucesso, dos quais 7 serão aqui analisados e seus resultados apresentados.

Como apontado por Arlot (2008b), é preciso alguns cuidados especiais para a observação de fenômenos mútuos. Em particular, os de Urano apresentam dificuldades específicas, pela proximidade dos satélites ao planeta e seu pouco brilho frente a ele. Procura-se descrever no capítulo 2 o método observacional utilizado, bem como a escolha de equipamentos e seleção de eventos.

As imagens obtidas são reduzidas utilizando programas do pacote PRAIA – Plataforma de Redução Automática de Imagens Astronômicas – (Assafin 2006). Um problema que será mostrado é a luz difusa do planeta que se espalha por toda a imagem, deixando o fundo de céu com um gradiente luminoso centrado na fonte brilhante. Este gradiente precisa ser retirado e o método utilizado, a ser descrito no capítulo 3, é a "coronografia digital". Após este tratamento será possível aplicar a fotometria diferencial, quando um outro satélite, brilhante e isolado, será utilizado para comparação. Feito isto, os dados serão dispostos em curvas de luz para cada evento.

Num fenômeno mútuo, seis variáveis estão envolvidas e ditam a forma da curva de luz. Três delas são dinâmicas, a velocidade relativa entre os satélites, o instante de maior aproximação e o valor desta distância, medida entre o centro geométrico do satélite mais próximo ao observador e o centro do outro, ou da sua sombra e o centro do outro satélite,

para o caso de ocultação ou de eclipse, respectivamente. As outras três variáveis são: a razão entre seus albedos (medida da refletividade da superfície) e os raios aparentes de cada corpo. Estes parâmetros serão considerados num modelo analítico geométrico a ser desenvolvido no capítulo 4. Suas derivadas serão calculadas, pois são importantes para a implementação deste modelo num programa numérico.

A partir de observações realizadas horas antes ou depois dos eventos, determina-se a razão de albedos entre os satélites. No apêndice A mostra-se como estes valores deverão ser calculados.

Utilizando o método de mínimos quadrados não lineares, uma curva de luz teórica é ajustada às curvas observadas. A partir daí, os parâmetros supracitados são obtidos para cada um dos eventos observados. Estes valores serão explicitados, analisados e comparados às previsões no capítulo 5.

Campanhas observacionais de fenômenos mútuos já são realizadas há mais de 35 anos. Em 1973 foram realizadas as primeiras previsões de tais eventos para os satélites galileanos de Júpiter [Arlot (1973) ; Aksnes & Franklin (1976)] e assim seguiu nos anos de 1979, 1985, 1991, 1997 e 2003. Fenômenos entre os satélites de Saturno já foram observados em 1980 (Aksnes *et al.* 1984) e 1995 (Thuillot *et al.* 2001). Em Aksnes & Franklin (1976), os eventos de Júpiter são modelados e discrepâncias nas posições de satélites são encontradas. Mais tarde elas foram associadas ao deslocamento do fotocentro do satélite ao seu centro geométrico, devido ao ângulo de fase solar (Aksnes *et al.* 1986). Fenômenos mútuos observados no infravermelho já foram utilizados, até mesmo, para estudar a atividade vulcânica de Io – lua de Júpiter – (Descamps 1992). Reduções astrométricas dos eventos de Saturno são desenvolvidas em Noyelles *et al.* (2003). A aplicação de mapas de albedos é incorporada à modelagem das curvas de luz por Vasundhara (2002). Todos estes trabalhos, entre diversos outros, desenvolveram o conhecimento de eventos mútuos, preparando a comunidade científica para a rara oportunidade de estudo dos fenômenos mútuos de Urano.

Até o momento, a observação e análise de cinco eventos já foram publicadas. Os fenômenos aqui apresentados, com uma análise preliminar, também já foram publicados no periódico *The Astronomical Journal* no volume 137 de abril de 2009 (veja o apêndice B). Um segundo artigo está em andamento e terá as análises contidas nesta dissertação bem como astrometria intersatélites das imagens obtidas na época dos fenômenos.

Hidas *et al.* (2008) relataram uma ocultação de Umbriel por Oberon, em 4 de maio de 2007. Utilizando o *Faulkes Telescope South* (Austrália) de 2 m de diâmetro e filtro *I*, obtiveram imagens de 3 segundos de exposição a cada 13 s. Com um modelo geométrico, igual ao desenvolvido na seção 4.3.2, e utilizando razões de albedos calculadas de Karoschka (2001), estimaram a menor distância entre os satélites em 500 ± 80 km (o que equivale a 36 ± 6 mas), e seu instante para $19h09m52 \pm 4$ s UT.

A observação de uma ocultação, prevista para ocorrer entre Miranda e Oberon em 30 de julho de 2007, é apresentada em Birlan *et al.* (2008). Utilizaram o telescópio de 3 metros de diâmetro IRTF no Mauna Kea (Havaí) com filtro infravermelho *K*. No entanto, o evento não foi detectado. Realizaram então uma análise fotométrica para determinar a precisão em fluxo observada e comparar com as previsões pelos modelos GUST86 e LA06, concluindo que a última estaria em maior acordo com seus dados.

Em 8 de dezembro de 2007, Arlot *et al.* (2008) observaram um eclipse de Titânia por Umbriel, com o telescópio ESO-VLT (Chile) de 8 m de diâmetro, no filtro *K*, obtendo 166 imagens de 2 s a cada 8,5 s. Para o instante central às 19h58m03 ± 6 s UTC, determinaram a maior aproximação entre o centro de Titânia e a sombra de Umbriel em 635 ± 30 km (45,7 ± 2 mas).

Dois eventos são apresentados em Miller & Chanover (2009) que, em agosto de 2007, utilizaram o telescópio de 3,5 m no *Apache Point Observatory* (EUA) com filtro *I*, para realizar as observações com 0,5 s por imagem. Com um modelo parecido ao apresentado em 4.3.2, ajustaram suas curvas de luz, fixando as respectivas razões de albedos calculadas de Karkoschka (2001). O primeiro evento foi uma ocultação de Titânia por Umbriel no dia 15, quando mediram a maior aproximação entre os satélites em 71,0 ± 4.4 km (5,11 ± 0,32 mas), no instante 09h26m39,2 ± 0,1 s UT. O segundo evento é uma ocultação de Ariel por Umbriel, fenômeno que também observamos e será apresentado na seção 5.3. Mediram a menor distância entre os centros dos satélites em 476,9 ± 0,3 km (34,31 ± 0,02 mas) para o instante 19h59m49,4 ± 0,15 s.

Esta dissertação é uma síntese dos trabalhos desenvolvidos pelo grupo (Roberto Vieira Martins, Marcelo Assafin, Julio Camargo, Dario da Silva Neto, Alexandre Andrei e Felipe Braga Ribas) para a campanha observacional dos fenômenos mútuos entre os satélites de Urano. O autor desta dissertação participou ativamente das observações dos eventos e foi responsável pelas reduções das imagens e análises dos dados obtidos.

Referências Bibliográficas

AKSNES, K.; FRENKLIN, F.; MAGNUSSON, P. The longitude discrepancy for mutual satellite phenomena resolved **The Astronomical Journal**, v. 92, p. 1436-1444, 1986.

AKSNES, K. *et al.*. Mutual phenomena of the galilean and saturnian satellites in 1973 and 1979/1980 **The Astronomical Journal**, v. 89, p. 280-288, 1984.

AKSNES, K.; FRENKLIN, F. A. Mutual phenomena of the galilean satellites in 1973. III. Final results from 91 light curves **The Astronomical Journal**, v. 81, p. 464-481, 1976.

ARLOT, J. E. Les occultations et les éclipses mutuelles des satellites galiléens de Jupiter **L'Astronomie**, v. 87, p. 287-293, 1973.

ARLOT, J. E. Les phénomènes mutuels des satellites galiléens de Jupiter en 1979 **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 34, p. 195-197, 1978.

ARLOT, J. E. Astrometry of the solar system: the ground-based observations **Proceedings IAU Symposium**, v. 248, p. 66-73, 2007.

ARLOT, J. E. Predictions of the mutual events of the galilean satellites of Jupiter occurring in 2009-2010 **Astronomy and Astrophysics**, v. 478, p. 285-298, 2008.a

ARLOT, J. E. Astrometry through photometry: mutual events. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.imcce.fr/astrom-beijing08>. Arquivo: arlot-phenomena-sat-V3.pdf. Arquivo capturado em 08 de fevereiro de 2009.b

ARLOT, J. E.; DUMAS, Ch.; SICARDY, B. Observation of an eclipse of U-3 Titania by U-2 Umbriel on december 8, 2007 with ESO-VLT **Astronomy and Astrophysics**, v. 492, p. 599-602, 2008.

ARLOT, J.-E.; LAINEY, V.; Thuillot W. Predictions of the mutual events of the uranian satellites occurring in 2006-2009 **Astronomy and Astrophysics**, v. 456, p. 1173-1179, 2006.

ARLOT, J. E.; STAVINSCHI, M. Past and future mutual events of the natural planetary satellites: need of a network of observation **ASP Conference Series**, v. 370, p. 58-67, 2007.

- ARLOT, J. E.; THUILLOT, W. Predictions of the events of the satellites of Saturn during the 2009 equinox **Astronomy and Astrophysics**, v. 485, p. 293-298, 2008.
- ASSAFIN, M. PRAIA: Plataforma para redução autom'ática de imagens astronômicas **Boletim da Socienda Astronômica Brasileira**, v. 26, p. 189, 2006.
- ASSAFIN, M. *et al.*. Instrumental and digital coronagraphy for the observation of the Uranus satellites' upcoming mutual events **Planetary and Space Science**, v. 56, p. 1882-1887, 2008.
- BIRLAN, M. *et al.*. Photometric and astrometric analysis of a mutual event between the uranian satellites Miranda and Oberon **Astron. Nachr.**, v. 329, p. 567-572, 2008.
- BOURGET, P. *et al.*. Hg-mask coronagraph **EAS Publications Series**, v. 12, p. 205-211, 2004.
- BURATTI, B. J.; GIBSON, J.; MOSHER J. A. CCD photometry of the uranian satellites **The Astronomical Journal**, v. 104, p. 1618-1622, 1992.
- CHRISTOU, A.A. Mutual events of the uranian satellites 2006-2010 **Icarus**, v. 178, p. 171-178, 2005.
- DESCAMPS, P. *et al.*. Observations of the volcanoes of Io, Loki and Pele, made in 1991 at the ESO during an occultation by Europa **Icarus**, v. 100, p. 235-244, 1992.
- DESCAMPS, P.; *et al.* BRAGA-RIBAS, F.; *et al.*. New insights on the binary asteroid 121 Hermione . **em submissão** 2009
- DOURNEAU, G.; LE CAMPION, J. F.; BARATCHART, S. Mutual events of Jupiter's satellites observed in 1997 at the bordeaux obsevatory **Astronomy and Astrophysics**, v. 437, p. 711-716, 2005.
- EMELYANOV, N. V. A method for reducing photometric observations of mutual occultations and eclipses of planetary setellites **Solar System Research**, v. 37, p. 314-325, 2003.
- EMELYANOV, N. V.; GILBERT, R. Astrometric results of observations of mutual occultations and eclipses of the galilean satellites of Jupiter in 2003 **Astronomy and Astrophysics**, v. 453, p. 1141-1149, 2006.
- EVERETT, M. E.; HOWELL, S. B. A technique for ultrahigh-precision CCD photometry **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 113, p. 1428-1435, 2001.
- GIORGINI, J.D. *et al.*. JPL'S online Solar Sistem data service **Bulletin of the American Astronomical Society**, v. 28, p. 1158, 1996.
- GUYON, O. *et al.*. Theoretical limits on extrasolar terrestrial planet detection with coronagraphs **The Astronomical Journal Supplement Series**, v. 167, p. 81-99, 2006.

- HIDAS, M. G.; CHRISTOU, A. A.; BROWN, T. M. An observation of a mutual event between two satellites of Uranus **Mon. Not. R. Astron. Soc.**, v. 384, p. 38-40, 2008.
- HOWELL, S. B. Two-dimensional aperture photometry: signal-to-noise ratio of point-source observations and optimal data-extraction techniques **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 101, p. 616-622, 1989.
- HOWELL, S. B. 3 Characterization of charge-coupled devices **Handbook of CCD Astronomy**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 208p.
- JACOBSON, R. A. Astrographic observations of the major Uranian satellites from Voyager 2 **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 96, p. 549-563, 1992.
- KAAS, A. A. *et al.*. Astrometry from mutual phenomena of the galilean satellites in 1990-1992 **The Astronomical Journal**, v. 117, p. 1933-1941, 1999.
- KAASALAINEN, M. *et al.*. Interpretation of lightcurves of atmosphereless bodies I. general theory and new inversion schemes **Astronomy and Astrophysics**, v. 259, p. 318-332, 1992.
- KARKOSCHKA, E. Methane, Ammonia, and temperature measurements of the jovian planets and Titan from CCD-spectrophotometry **Icarus**, v. 133, p. 134-146, 1998.
- KARKOSCHKA, E. Comprehensive photometry of the rings and 16 satellites of Uranus with the Hubble Space Telescope **Icarus**, v. 151, p. 51-68, 2001.
- KJELDSEN, H.; FRANDBSEN, S. High-precision time-resolved CCD photometry **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 104, p. 413-434, 1992.
- LAINNEY, V. A new dynamical model for the uranian satellites **Planetary and space science**, v. 56, p. 1766-1772, 2008.
- LANDOLT, A. U. UBVRI Photoelectric standard stars around the celestial equator **The Astronomical Journal**, v. 88, p. 439-460, 1983.
- LASKAR, J.; JACOBSON, R. A. Gust 86. An analytical ephemeris of the uranian satellites **Astronomy and Astrophysics**, v. 188, p. 212-224, 1987.
- LINDEGREN, L. Meridian observations of planets with a photoelectric micrometer **Astronomy and Astrophysics**, v. 57, p. 55-72, 1977.
- Laboratório Nacional de Astrofísica. Manual do Telescópio 1,60m - Procedimentos Gerais. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.lna.br/opd/instrum/instr.html>. Arquivo: Manual_160mOPD_Cap1.pdf. Arquivo capturado em 28 de janeiro de 2009.
- MACKAY, C. D. Charge-coupled devices in astronomy **Astronomy and Astrophysics**, v. 24, p. 255-283, 1986.

- MALLAMA, A. Models for planetary eclipses of the uranian satellites **Icarus**, v. 192, p. 576-581, 2007.
- MILLER, C.; CHANOVER, N.J. Resolving dynamic parameters of the august 2007 Titania and Ariel occultations by Umbriel **Icarus**, v. 200, p. 343-346, 2009.
- NEWBERRY, M. V. Signal-to-noise considerations for sky-subtracted CCD data **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 103, p. 122-130, 1991.
- NOYELLES, B.; VIENNE, A.; DESCAMPS, P. Astrometric reduction of lightcurves observed during the PHESAT95 campaign of saturnian satellites **Astronomy and Astrophysics**, v. 401, p. 1159-1175, 2003.
- POLINSKA, M.; *et al.* RIBAS, F. B.; *et al.* CCD observations and modeling of 4492 Debussy eclipsing asteroid **Lunar and Planetary Institute Contribution**, v. 1405, p. 8134, 2008.
- SEAL, D. Solar System Simulator. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: <http://maps.jpl.nasa.gov/uranus.html>. Arquivos capturados em 19 de janeiro de 2009.
- STONE, E. C.; MINER, E. D. The Voyager 2 encounter with the uranian system **Science**, v. 233, p. 39-43, 1986.
- STONE, R. C. Digital centering algorithms for the Sun, Moon, and planets **The Astronomical Journal**, v. 99, p. 424-430, 1990.
- THOMAS, P.C. Radii, shapes, and topography of the satellites of Uranus from limb coordinates **Icarus**, v. 73, p. 427-441, 1988.
- THUILLOT, W.; ARLOT, J.-E.; RUATTI, C.; *et al.* The PHESAT95 catalogue of observations of the mutual events of the saturnian satellites **Astronomy and Astrophysics**, v. 371, p. 343-349, 2001.
- THUILLOT, W.; ARLOT, J.-E.; VIENNE, A. International year of astronomy: a special project in planetary sciences, the equinox on Jupiter in 2009 **Bulletin of the American Astronomical Society**, v. 40, p.1804, sept., 2008 .
- TRINIDAD, M. A.; COZIOL, R. CCD description and characteristics. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: http://www.astro.ugto.mx/cursos/Laboratorio/Lab_menu.htm. Arquivo: CCDReduccion_p1.pdf. Arquivo capturado em 08 de fevereiro de 2009.
- VASUNDHARA, R. Astrometry from CCD photometry of mutual events of jovian satellites from VBO durig 1997 **Astronomy and Astrophysics**, v. 389, p. 325-333, 2002.
- VASUNDHARA, R. Modeling uranian mutual event light curves **Planetary and space science**, v. 56, p. 1791-1796, 2008.

- VASUNDHARA, R. *et al.*. Astrometry from mutual events of jovian satellites in 1997 **Astronomy and Astrophysics**, v. 410, p. 337-341, 2003.
- VEIGA, C. H.; VIEIRA MARTINS, R.; CCD astrometric observations of Uranian satellites: 1995-1998 **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 138, p. 247-251, 1999.
- VEILLET, C.; RATIER, G. Astrometric study of the Uranus satellite Miranda **Astronomy and Astrophysics**, v. 89, p. 342-344, 1980.
- VIEIRA MARTINS, R. *et al.*. Systematic astrometric observations of Proteus **Astronomy and Astrophysics**, v. 425, p. 1107-1111, 2004.
- VIENNE, A. Dynamical objectives of observation of mutual events **Planetary and Space Science**, v. 56, p. 1797-1803, 2008.
- WASSERMAN, L. H.; ELLIOT, J. L.; VEVERKA J. Galilean satellites: observations of mutual occultations and eclipses in 1973 **Icarus**, v. 27, p. 91-107, 1976.

Capítulo 2

Artigo

Neste anexo é reproduzido o artigo publicado no periódico *The Astronomical Journal*, na edição do mês de Abril de 2009, volume 137, páginas 4046 à 4053, com parte da análise apresentada nesta dissertação.

Seu título é:

Observations and analysis of mutual events between the Uranus main satellites.