



OBSERVATÓRIO NACIONAL
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

ESTUDOS DE OBJETOS DO SISTEMA SOLAR
EXTERIOR COM O USO DO TELESCÓPIO
ESPACIAL HUBBLE E ATRAVÉS DE
OCULTAÇÕES ESTELARES

GUSTAVO BENEDETTI ROSSI

ORIENTADOR: DR. ROBERTO VIEIRA MARTINS
CO-ORIENTADOR: DR. BRUNO SICARDY

RIO DE JANEIRO - RJ
2016

ESTUDOS DE OBJETOS DO SISTEMA SOLAR EXTERIOR COM O USO DO
TELESCÓPIO ESPACIAL HUBBLE E ATRAVÉS DE OCULTAÇÕES
ESTELARES

Gustavo Benedetti Rossi

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Doutor em Astronomia.

Orientador: Roberto Vieira Martins

Co-orientador: Bruno Sicardy

Rio de Janeiro
Março de 2016

ESTUDOS DE OBJETOS DO SISTEMA SOLAR EXTERIOR COM O USO DO
TELESCÓPIO ESPACIAL HUBBLE E ATRAVÉS DE OCULTAÇÕES
ESTELARES

Gustavo Benedetti Rossi

TESE SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL/MCTI COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ASTRONOMIA EM ASTRONOMIA.

Examinada por:

Dr. Roberto Vieira Martins, D.Sc.

Dr. Bruno Sicardy, D.Sc.

Dr. Jorge Carvano, D.Sc.

Dra. Yolanda Jimenez, D.Sc.

Dr. Felipe Braga Ribas, D.Sc.

Dr. Othon Cabo Winter, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2016

Benedetti Rossi, Gustavo

Estudos de Objetos do Sistema Solar exterior com o uso do telescópio espacial Hubble e através de ocultações estelares/Gustavo Benedetti Rossi. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2016.

XVII, 195 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Roberto Vieira Martins

Co-orientador: Bruno Sicardy

Tese (doutorado) – ON/MCTI/Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 84 – 97.

1. Transnetunianos. 2. TNOs. 3. Centauros. 4. Ocultações Estelares. 5. Telescópio Espacial Hubble. 6. HST. 7. Chariklo. 8. Chiron. 9. 2007 UK126. I. , Bruno Sicardy. II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Título.

*À todos aqueles que buscam
desvendar mistérios e que se
encantam com a imensidão e
toda a diversidade do Universo,
os quais fazem sermos um
pequeno gigante no infinito.*

Agradecimentos

Durante os últimos 4 anos tive a oportunidade de conhecer pessoas especiais que tornaram o processo de desenvolvimento desta tese mais fácil, seja diretamente na elaboração do trabalho ou participaram pessoalmente em minha vida. Por isso, peço desculpas se esqueci de alguém. Algumas pessoas merecem um agradecimento em especial:

Ao meu orientador, Roberto Martins: que sempre me apresentou uma direção para seguir no trabalho, esteve à disposição para sanar dúvidas e me ensinou muita coisa, sendo crucial para minha evolução e desenvolvimento profissional.

Ao meu co-orientador, Bruno Sicardy: que me recebeu no Observatório de Paris durante meu sanduíche e esteve sempre presente na elaboração deste trabalho. Agradeço também por oferecer a oportunidade de passar e participar de um dos melhores anos de minha vida pessoal e profissional.

Ao meu grupo de trabalho, Julio, Marcelo, Felipe, Alex, Altair, Bruno e Carlos: que sempre estiveram dispostos a enfrentar desafios e encontrar solução de problemas; pelas respostas rápidas nos e-mails; por passar noites (muitas vezes chuvosas) em observação no OPD; pelas reuniões de grupo sempre cansativas mas, de alguma forma, divertidas; pelos papos descontraídos em congressos ou pelos corredores.

To Marc Buie, who offered me a lot of his professional experience during the elaboration of the HST proposal and also offered all the 2007 UK_{126} occultation data from the RECON project used in this work. Thank you for sharing your time, experience and knowledge, essential for the development of this thesis.

À minha família, pelo apoio que sempre ofereceram em todas as situações.

A ma famille française, Laurent, Sandrine, Joe, Pitchoune et Phlox, qu'on fait mon année a Paris plus agréable, m'a accueilli avec l'amour d'un enfant et m'a inspiré et soutenu ma carrière et ma vie.

Aos meus amigos do ON: (para não ser injusto, não citarei nomes pois são muitos, mas tenho certeza que vocês se encaixam em alguma das situações a seguir) pelas discussões e ajudas nos problemas encontrados no trabalho; pelas dúvidas resolvidas em programas; pelos papos descontraídos, almoços e cafés na copinha; pelos almoços na 'Feira dos Paraíbas'; pela companhia em passeios, bares e bebedeiras (algumas vezes) 'sem lei'; por tornar a vida no Rio de Janeiro mais fácil.

Aos meus amigos de Itatiba, que há muito me inspiram e participam de minha vida.

To my friends I've made during my stay in France, in special to Anna Bondarenko, Anna Zharkova, Cateline, Clement, Diane, Davide, Erick, Jean Loup, Leo, Luca, Oriane, Rodrigo, Tadeáš and Vincent. For the coffees, travels, chats and talks, parties, works, for the company and, mainly, to make my time in France VERY special and unforgettable.

Ao Pedrinho e ao Lupa, grandes amigos e companheiros que foram essenciais para tornar a vida mais fácil e divertida pelo mundo.

A todos que de alguma forma ajudaram, colaboraram ou participaram do desenvolvimento do trabalho ou passaram comigo algum momento descontraído.

Resumo da Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Astronomia (D.Sc.)

ESTUDOS DE OBJETOS DO SISTEMA SOLAR EXTERIOR COM O USO DO
TELESCÓPIO ESPACIAL HUBBLE E ATRAVÉS DE OCULTAÇÕES
ESTELARES

Gustavo Benedetti Rossi

Março/2016

Orientador: Roberto Vieira Martins

Co-orientador: Bruno Sicardy

Programa: Astronomia

Após quase 25 anos da descoberta do primeiro objeto trans-Netuniano (TNO), além de Plutão, mais de 1930 outros objetos foram descobertos no Sistema Solar exterior. O estudo destes corpos pode fornecer informações preciosas sobre a origem e evolução química, dinâmica e térmica do nosso sistema planetário. Entretanto, devido às suas grandes distâncias heliocêntricas, estes objetos são difíceis de se observar diretamente sem a ajuda de telescópios espaciais e, por isso, apenas cerca de 140 TNOs e Centauros têm seus diâmetros e albedo determinados, através de observações no infra-vermelho realizadas pelos telescópios *Spitzer* e *Herschel*, e somente 16 possuem suas densidades conhecidas.

Para contornar a dificuldade de observação direta, a técnica de ocultações estelares é uma das mais precisas e acuradas para se obter informações sobre os objetos do Sistema Solar exterior. Tamanhos da ordem de quilômetro, atmosferas com pressões a níveis de nano-bar e até sistemas de anéis podem ser detectados com esta técnica. Através dela, cerca de 10 TNOs tiveram seus diâmetros e albedo determinados além de colocar dois Centauros em destaque nos últimos anos: Chariklo, por possuir um sistema de anéis descoberto em 2013, e Chiron, por apresentar estruturas em seu entorno que suspeita-se serem anéis, jatos ou uma casca de material, também descobertos recentemente, além de ter apresentado atividade cometária após sua última passagem pelo perihélio.

A fim de comprovar a existência e orientação dos anéis de Chariklo, determinar qual melhor explicação para o material detectado ao redor de Chiron e realizar uma procura por outras estruturas e satélites no entorno destes corpos, estes dois centauros foram os alvos escolhidos para observações diretas com o Telescópio Espacial Hubble, cujos pedidos de tempo e seus resultados preliminares são apresentados neste trabalho.

Além disso, uma ocultação estelar por um TNO nomeado 2007 UK_{126} , ocorrida em 2014, foi observada por astrônomos profissionais e amadores em diversos locais nos Estados Unidos. Com telescópios pequenos (~ 30 cm de diâmetro) e câmeras de vídeo, foram obtidas 7 cordas positivas das quais foi possível obter um diâmetro de 628^{+34}_{-52} km e albedo $< 0,194^{+0,018}_{-0,009}$ para o corpo. Neste trabalho também são apresentados em detalhes os procedimentos da redução e análise dos dados deste evento.

Abstract of Thesis presented to Observatório Nacional/MCTI as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Astronomy (D.Sc.)

STUDY OF THE OUTER SOLAR SYSTEM OBJECTS USING THE HUBBLE SPACE TELESCOPE AND THROUGH STELLAR OCCULTATIONS

Gustavo Benedetti Rossi

March/2016

Advisor: Roberto Vieira Martins

Co-advisor: Bruno Sicardy

Department: Astronomy

After almost 25 years of the discovery of the first trans-Neptunian object (TNO), besides Pluto, more than 1930 other objects were discovered at the outer solar system. The study of those bodies can provide precious information about the origin and chemical, dynamical, and thermal evolution of our planetary system. However, due to their large heliocentric distances, those objects are hard to observe directly without the aid of space telescopes and so only about 140 TNOs and Centaurs have their diameters, determined through infrared observations by *Spitzer* and *Herschel* space telescopes, and only about 16 have their densities known.

To bypass the difficulties of direct observations, stellar occultation is one of the most precise and accurate technique to obtain information on the outer solar system objects. Sizes measurements to the order of kilometers, atmosphere pressures at nanobar levels and even ring systems can be detected with this technique. By using this method, about 10 TNOs had their diameter and albedo determined and it highlighted two Centaurs in the last years: Chariklo, that has a ring system discovered in 2013, and Chiron, that presents structures around the main body which is suspected to be rings, jets or a shell, discovered recently, and also it presented a cometary activity after its last passage to its perihelium.

In order to prove the existence and orientation of the Chariklo's rings, determine which is the best explanation for the material around Chiron and search for other structures and putative satellites orbiting those bodies, those two centaurs were the targets chosen to be observed directly by using the Hubble Space Telescope, whose time proposal and its preliminary results are presented on this work.

Also, a stellar occultation by a TNO named 2007 UK_{126} , occurred in 2014, was observed by professional and amateur astronomers in several sites in the United States. By using small telescopes (~ 30 cm diameter) and video cameras, it was obtained 6 positive chords from which it was possible to obtain a diameter of 628^{+34}_{-52} km and albedo $< 0,194^{+0,018}_{-0,009}$ for the body. This work also presents in details the procedures for the reduction and analysis of this event.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Siglas e Abreviações	xvi
1 Introdução	1
2 Observação de Chariklo e Chiron com HST	7
2.1 Objetivos e Estratégias das observações	11
2.1.1 Detecção dos anéis de Chariklo	13
2.1.2 Fotometria diferencial de Chariklo	17
2.1.3 Procura de satélites ao redor de Chariklo	18
2.1.4 Procura de outras estruturas ao redor de Chariklo	19
2.1.5 Detecção de material confinado ao redor de Chiron	21
2.1.6 Fotometria diferencial de Chiron	23
2.1.7 Procura de satélites ao redor de Chiron	23
2.1.8 Observação da coma e procura de outras estruturas ao redor de Chiron	24
2.2 Equipamentos utilizados	24
2.2.1 Características e Performance da câmera WFC3/UVIS	26
2.2.2 Filtros	31
2.3 Restrições	32
2.3.1 Zona Contínua de Observação	32
2.3.2 Anomalia do Atlântico Sul	33
2.3.3 Predição da posição do HST	33
2.3.4 Apontamento e manobras	33
2.3.5 Objetos brilhantes	35
2.3.6 Alvos do Sistema Solar	35
2.3.7 Duplicidade	35
2.4 Observações	36
2.4.1 Redução dos dados e calibração	37

2.5	Resultados preliminares	38
2.5.1	Observações com SPHERE	40
3	Ocultação estelar pelo TNO 2007UK₁₂₆	46
3.1	Predição e Observação	49
3.1.1	RECON	55
3.2	Análise de dados	55
3.2.1	Funcionamento da aquisição de imagens com câmera de vídeo	57
3.2.2	Extração de imagens a partir do vídeo	61
3.2.3	Obtenção das curvas de luz	67
3.2.4	Obtenção dos instantes de tempo e das cordas	69
3.2.5	Ajuste da elipse	74
3.2.6	Propriedades físicas do TNO 2007 UK ₁₂₆	77
4	Conclusão	82
	Referências Bibliográficas	84
A	Pedidos de tempo para o HST	98
A.1	Fase 1: Observação dos anéis de Chariklo e arredores de Chiron (Observation of Chariklo's rings and the surroundings of Chiron)	99
A.2	Notificação de aceite de pedido de tempo para o Ciclo 22 - Observação dos anéis de Chariklo	109
A.3	Fase 2: Observação dos anéis de Chariklo (Observation of Chariklo's rings)	114
A.4	Fase 1: Busca por Material ao Redor de Chiron (Search for material around Chiron)	127
A.5	Notificação de aceite de pedido de tempo para o Ciclo 23 - Busca de material ao redor de Chiron	137
A.6	Fase 2: Busca por Material ao Redor de Chiron (Search for material around Chiron)	141
B	Artigos publicados em revistas indexadas	154
C	Participação em reuniões internacionais com apresentação de trabalho oral	157
D	Velocidade de Escape e Velocidade de ejeção de matéria	159
E	Artigo sobre o TNO 2007 UK₁₂₆	161

Lista de Figuras

1.1	Objetos do Sistema Solar Exterior	4
2.1	Orientação de Chariklo e Chiron com respeito aos pixels do HST	12
2.2	PSF real observada do HST	15
2.3	Modelo de Chariklo amostrado para a WFC3	15
2.4	Simulação para detecção dos anéis e possíveis satélites de Chariklo utilizando o HST	16
2.5	Variação temporal do espectro de Chariklo	17
2.6	Anéis de Urano observados pelo HST	20
2.7	Simulação para detecção dos anéis e possíveis satélites e jatos de material ao redor de Chiron utilizando o HST	22
2.8	Eficiência das câmeras a bordo do HST	25
2.9	Matriz do CCD da câmera WFC3/UVIS e seus <i>subarrays</i>	27
2.10	Eficiência quântica da câmera UVIS	28
2.11	Filtros a bordo do HST utilizados	32
2.12	Configuração do HST	34
2.13	Imagem individual exemplo de Chariklo obtida com o filtro F350LP do HST	39
2.14	Imagens de Chariklo combinadas das visitas 1 e 2 obtidas com o filtro F350LP	40
2.15	Imagem resultante da subtração das imagens das Visitas 1 e 2 de Chariklo	41
2.16	Imagem resultante da subtração das imagens das Visitas 1 e 2, 2 e 3 e também 1 e 3 para Chariklo	42
2.17	Imagem resultante da subtração das imagens das Visitas 1 e 2 de Chariklo e simulação da presença de satélite	43
2.18	Imagem de Chariklo obtida com o SPHERE/VLT e PSF para estrela	44
2.19	Imagem de Chariklo obtida com o SPHERE/VLT subtraída da PSF estelar	45
3.1	Caminho aparente do TNO 2007 UK126 entre 2013 e 2015	49

3.2	Mapa de predição da ocultação	50
3.3	Mapa de predição da ocultação	51
3.4	Mapa pós ocultação	54
3.5	Mapa dos sítios da RECON	56
3.6	Aquisição de vídeo: integração	58
3.7	Aquisição de vídeo: coletor de frames	59
3.8	Aquisição de vídeo: funcionamento	60
3.9	Frames entrelaçados	62
3.10	Curva de luz com frames intermediários	63
3.11	Frames (Correto, entrelaçado, duplicado e com <i>glitch</i>)	66
3.12	Imagem para fotometria com estrelas de calibração e ocultada	67
3.13	Curvas de luz normalizadas	68
3.14	Cordas positivas e negativas da ocultação	71
3.15	Curva de luz de Reno	72
3.16	Curva de χ^2 para o instante de entrada da ocultação de Reno	73
3.17	Ajuste da Elipse com a solução nominal	75
3.18	Ajuste da Elipse com a solução MWB	78
3.19	Curva de equilíbrio de Maclaurin para um corpo com período de rotação igual a 11.05 horas	80

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros Orbitais dos centauros observados pelo HST.	8
2.2	Parâmetros Físicos dos centauros observados pelo HST.	8
2.3	Algumas especificações técnicas da câmera WFC3/UVIS.	26
2.4	Sequência de imagens distribuidos por filtro para uma visita ^a individual utilizando a WFC3/UVIS.	36
2.5	Data das observações dos centauros com o HST.	38
3.1	Parâmetros Orbitais do SDO 2007 UK ₁₂₆	48
3.2	Parâmetros Físicos do SDO 2007 UK ₁₂₆	48
3.3	Estações participantes da ocultação que obtiveram dados.	52
3.4	Estações participantes da ocultação sem dados obtidos.	53
3.5	Parâmetros para cálculo do diâmetro da estrela.	69
3.6	Instantes de imersão e emersão da ocultação.	70
3.7	Parametros físicos do TNO 2007 UK ₁₂₆ para as duas soluções estudadas.	81

Lista de Siglas e Abreviações

ACS - Equipamento do Telescópio Espacial Hubble, do inglês *Advanced Camera for Surveys*

COS - Equipamento do Telescópio Espacial Hubble, do inglês *Cosmic Origins Spectrograph*

CTE - Eficiência de Transferência de Carga de um CCD, do inglês *Charge Transfer Efficiency*

CVZ - Zona Contínua de Observação, do inglês *Continuous Viewing Zone*

ESO - Observatório Europeu do Hemisfério Sul (do inglês *European Southern Observatory*)

FGS - Equipamento do Telescópio Espacial Hubble, do inglês *Fine Guidance Sensor*

fps - Frames por segundo

FOV - Campo de visão, do inglês *Field of View*

HST - Telescópio Espacial Hubble (do inglês *Hubble Space Telescope*)

ICRF - Sistema de Referência Celeste Internacional (do inglês *International Celestial Reference Frame*)

IOTA - instituição internacional para determinação de instantes de tempo utilizados em ocultações estelares (do inglês *International Occultation Timing Association*)

IR - infra-vermelho (do inglês *infrared*)

JFC - Cometa da família de Júpiter (do inglês *Jupiter Family Comets*)

JWST - Telescópio Espacial James Webb (do inglês *James Webb Space Telescope*)

KBO - Objeto do Cinturão de Kuiper (do inglês *Kuiper Belt Object*)

mas - Milissegundos de arco (ou milissegundos de grau)

LNA - Laboratório Nacional de Astrofísica

MPC - *Minor Planet Center*

OPD - Observatório do Pico dos Dias

PSF - Função de Espalhamento Pontual (do inglês *Point Spread Function*)

RECON - Rede de Colaboração de Observação de ocultações para Pesquisa e Educação (do inglês *Research and Education Collaborative Occultation Network*)

ROI - Região de Interesse (do inglês *Region of Interest*)

SDO - Objeto do Disco Espalhado (do inglês *Scattered Disc Object*)

SPHERE - Equipamento instalado no VLT (da sigla em inglês *Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research*)

STIS - Equipamento do Telescópio Espacial Hubble, do inglês *Space Telescope Imaging Spectrograph*

TNOs - Objetos Trans-Netunianos (do inglês *Trans-Neptunian Objects*)

UA - Unidade Astronômica

UAI - União Astronômica Internacional (em inglês IAU - *International Astronomical Union*)

UV - Ultravioleta

UVIS - Câmera de imageamento no ultravioleta e visível, acoplada à WFC3 (do inglês *Ultra-violet and Visible channel*)

VLT - Telescópio pertencente ao ESO, instalado no Chile (do inglês *Very Large Telescope*)

VTI - Inserir de tempo em vídeo (do inglês *Video Time Inserter*)

WFC3 - Câmera de Campo Grande instalada no Telescópio Espacial Hubble (do inglês *Wide Field Camera 3*)

WFI - Câmera de Campo Grande instalada no Telescópio de 2,2m no ESO (do inglês *Wide Field Imager*)

Capítulo 1

Introdução

No Sistema Solar exterior, além dos planetas gigantes, encontram-se diversos pequenos corpos¹ que orbitam em torno do Sol. De acordo com sua distância heliocêntrica e parâmetros orbitais, tais objetos são separados em diversos grupos como, por exemplo, centauros e objetos trans-Netunianos (TNOs).

Os centauros estão localizados entre Júpiter (5 Unidades Astronômicas - UA) e Netuno (30 UA). Suas órbitas cruzam órbitas de um ou mais dos planetas gigantes e por isso são bastante instáveis, implicando em uma vida dinâmica de apenas alguns milhões de anos (HORNER *et al.*, 2004). A origem destes objetos ainda é incerta, mas acredita-se que eles foram ejetados da região trans-Netuniana por perturbações planetárias ou colisões mútuas (DI SISTO e BRUNINI, 2007; DUNCAN *et al.*, 1995). Alguns ainda podem ter origem na Nuvem de Oort (LEVISON *et al.*, 2001). Hoje são conhecidos cerca de 470 centauros (MPC, 2016a; ROBERT JOHNSTON, 2016) e estima-se que existam cerca de 44.000 outros objetos nesta região do Sistema Solar que são maiores que 1 km (HORNER *et al.*, 2004). Dentre os maiores representantes deste grupo, destacam-se dois objetos denominados (2060) Chiron, que apresenta características tanto de asteroides como de cometas, e (10199) Chariklo que apresenta um sistema de anéis. Chiron (também denominado 95P/Chiron ou ainda 1977 UB) foi descoberto há quase 40 anos (KOWAL *et al.*, 1977). Em 1988 apresentou um aumento em 75% de seu brilho (HARTMANN *et al.*, 1990) e o desenvolvimento de uma coma (MEECH e BELTON, 1989), por isso recebeu também a denominação ‘95P’, que corresponde a um cometa. Além disso, ORTIZ *et al.* (2015) e RUPRECHT *et al.* (2015) reportaram a existência de material ao redor do objeto que podem indicar a presença de anéis. Chariklo (ou 1997 CU₂₆), o maior Centauro conhecido, foi descoberto em 1997 por James Scotti (TICHA *et al.*, 1997). Em 2013, através de uma ocultação estelar, foram detectados dois anéis em sua órbita (BRAGA-RIBAS

¹De acordo com a resolução B5 da União Astronômica Internacional (UAI) (IAU, 2016), um pequeno corpo do Sistema Solar é qualquer objeto em órbita ao redor do Sol e que não é um planeta, planeta anão ou satélite.

et al., 2014), cuja composição é de aproximadamente 20% de gelo de água, 40 a 70 % de silicatos e 10 a 30 % de tolinas e pequenas quantidades de carbono amorfo (DUFFARD *et al.*, 2014).

Além da órbita de Netuno, os TNOs podem ser subdivididos basicamente em dois grupos²: objetos do Cinturão de Kuiper (KBOs) e objetos do Disco Espalhado (SDOs). O primeiro grupo contém objetos que se encontram entre 30 UA e 55 UA e pode ser subdividido em (i) ‘Ressonantes’ - cujos objetos estão em ressonância de movimento médio com Netuno - e (ii) ‘Clássicos’ - objetos com excentricidade baixa, que não cruzam a órbita de Netuno e sofrem menor influência de ressonâncias (MORBIDELLI e LEVISON, 2007). Objetos em ressonância foram provavelmente capturados devido à migração e circularização da órbita de Netuno (DUNCAN *et al.*, 1995; LEVISON *et al.*, 2008), mas a origem destes objetos e o modo de captura ainda é altamente debatido. Nesta região encontram-se por exemplo os Plutinos, objetos que estão na ressonância 2:3 com Netuno e recebem este nome devido ao primeiro objeto descoberto nesta região e principal representante, Plutão (TOMBAUGH, 1946). Cerca de 270 Plutinos são conhecidos atualmente (MPC, 2016b; ROBERT JOHNSTON, 2016), que aparenta ser a ressonância mais populosa (CHIANG e JORDAN, 2002; FERNÁNDEZ *et al.*, 2002; SHEPPARD *et al.*, 2011). Outras ressonâncias com Netuno que apresentam um número significativo de objetos conhecidos são 5:3, 7:4, 2:1 e 5:2 (ELLIOT *et al.*, 2005; GLADMAN *et al.*, 2008; HAHN e MALHOTRA, 2005).

Os objetos clássicos são também conhecidos como Cubewanos devido ao primeiro objeto descoberto nesta região, (15760) 1992 QB₁ (MARSDEN, 1992; MURDIN, P., 2000) (do inglês ‘Q-B-1 = cue - bee - wan’) e apresentam maiores inclinações e excentricidades que inicialmente previsto (FERNANDEZ e IP, 1981). Eles podem ser subdivididos em duas populações: ‘Fria’ - com excentricidades em relação à eclíptica menores que 0,1 e inclinações em relação à eclíptica de até 10° - e ‘Quente’ - com inclinações entre 10° até 40°. Estas populações foram nomeadas pela analogia a partículas num gás, que aumentam sua velocidade quando são aquecidas (LEVISON e MORBIDELLI, 2003). A população Fria apresenta objetos menores e mais avermelhados que a população Quente (BROWN, 2001; LEVISON e STERN, 2001; PEIXINHO *et al.*, 2008; TEGLER e ROMANISHIN, 2000), indicando que foram formados em diferentes regiões e chegaram onde estão hoje através de migração e/ou espalhamento dos planetas gigantes em épocas diferentes da formação do Sistema

²Na literatura é possível encontrar diversas classificações. Para alguns autores o disco espalhado e o cinturão de Kuiper são populações distintas; para outros, o disco espalhado é parte do Cinturão de Kuiper. Alguns autores ainda utilizam nomenclatura ambígua, adotando as duas classificações. Neste trabalho, apesar de ser apenas um termo de classificação e não implicar mudanças no desenvolvimento e resultados, foi escolhido utilizar a separação entre as populações de KBOs e SDOs.

Solar (BATYGIN *et al.*, 2011; GOMES, 2003; LEVISON e MORBIDELLI, 2003; SHEPPARD *et al.*, 2012). (136472) Makemake, (50000) Quaoar e (20000) Varuna são exemplos dos quase 1450 objetos clássicos conhecidos (ROBERT JOHNSTON, 2016).

Por último, o Disco Espalhado contém os objetos que estão entre 30 UA e 100 UA e possuem órbitas irregulares que podem ter excentricidade até 0,8, inclinação até 40° (MORBIDELLI, 2005) e com perihélio próximo à órbita de Netuno ($q \sim 30-45$ UA). Acredita-se que estes objetos chegaram em suas órbitas através de interações com Netuno (GOMES *et al.*, 2008). Devido à natureza instável de sua órbita, acredita-se que SDOs dão origem à cometas periódicos da Família de Júpiter (JFCs) e os centauros seriam um estágio intermediário de migração do disco para o Sistema Solar interior (HORNER *et al.*, 2003; MORBIDELLI e LEVISON, 2007). Além disso, espera-se que objetos desta região tenham baixas densidades e sejam compostos principalmente de voláteis congelados como água e metano, apresentando uma cor aparente mais branca acinzentada (TEGLER, 2007), diferente da cor mais avermelhada dos objetos clássicos (DORESSOUNDIRAM *et al.*, 2002). Aproximadamente 250 objetos pertencentes à esta região são conhecidos atualmente (MPC, 2016a). Dentre eles, o maior representante é Eris, objeto que instigou uma grande discussão sobre a classificação de ‘planeta’ (BROWN, 2012; SICARDY *et al.*, 2011). Sedna também pode ser classificado como SDO, embora normalmente seja incluído como participante da nuvem de Oort interior (BROWN *et al.*, 2004; LYKAWKA e MUKAI, 2007; MORBIDELLI, 2005). Um outro membro deste grupo denomina-se 2007 UK₁₂₆. Descoberto em 2007 por Schwamb *et al.* (SCHWAMB *et al.*, 2008), este objeto possui um raio estimado de 295 ± 38 km (THIROUIN *et al.*, 2014) e um satélite, descoberto em 2011 (GRUNDY *et al.*, 2011). A Figura 1.1 apresenta a distribuição dos objetos conhecidos do Sistema Solar exterior.

Devido principalmente às suas grandes distâncias heliocêntricas e baixa taxa de colisão mútua (DELL’ORO *et al.*, 2013), acredita-se que estes objetos do Sistema Solar exterior sejam remanescentes químicos, térmicos e dinâmicos relativamente inalterados do disco proto-planetário primordial. As diferentes populações indicam ainda que este disco primordial apresenta uma história dinâmica complexa (GLADMAN *et al.*, 2008), envolvendo corpos que sofreram perturbações e ejeções através de interações gravitacionais dos planetas gigantes durante os primeiros milhões de anos da formação do Sistema Solar (GOMES *et al.*, 2005; HAHN e MALHOTRA, 2005; LEVISON e MORBIDELLI, 2003; LEVISON *et al.*, 2008; MORBIDELLI *et al.*, 2005; TSIGANIS *et al.*, 2005) e outros que aparentam ser remanescentes praticamente intocados durante toda a história (DAWSON e MURRAY-CLAY, 2012;

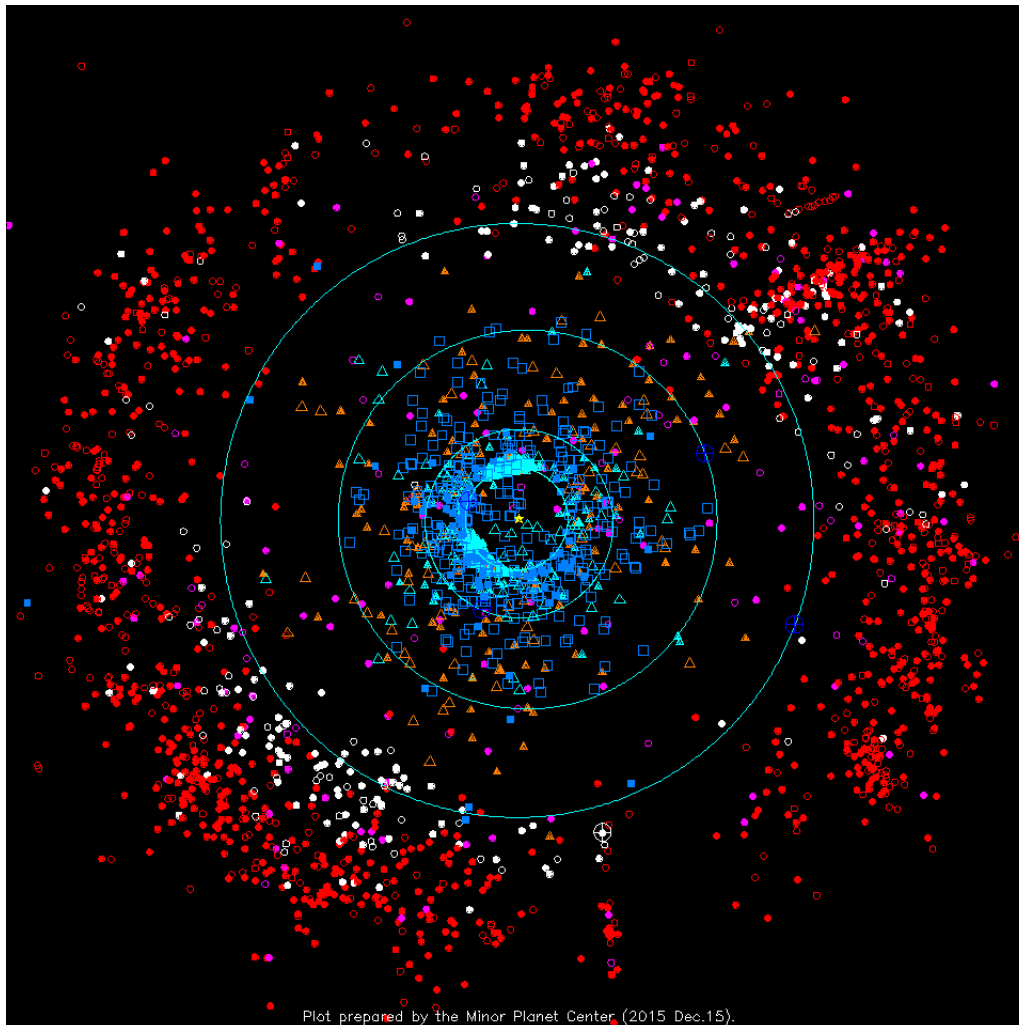


Figura 1.1: Objetos do Sistema Solar Exterior. As órbitas dos planetas gigantes são mostradas em ciano e suas posições estão marcadas com um círculo azul. Cada classe de objeto é apresentada com uma cor diferente: objetos com altas excentricidades são representados por triângulos em ciano; centauros como triângulos laranja; os Plutinos são os pontos em branco (Plutão é o símbolo branco maior); SDOs estão em círculo magenta e os cubewanos como círculos vermelho. Objetos observados em apenas uma oposição são apresentados pelas figuras não preenchidas enquanto objetos observados em mais de uma oposição são as figuras cheias. Os quadrados azuis preenchidos são cometas periódicos; quadrados não preenchidos são outros cometas. A maioria dos objetos deste plot são prógrados, com as órbitas se movendo no sentido anti-horário. A posição dos objetos é dada para o dia 15 de Dezembro de 2015. Fonte: MPC (MPC, 2016c)

PARKER e KAVELAARS, 2010). Conhecer e entender propriedades dos TNOs podem, então, fornecer informações importantes sobre esta história e evolução, além de apresentar restrições e condições a modelos cosmológicos de formação e evolução planetária (PARKER *et al.*, 2015). Entretanto, embora um cenário geral sobre estes objetos venha se tornando mais evidente, muitas questões ainda permanecem sem resposta. A distribuição de tamanho dos TNOs e centauros ainda é incerta e o conhecimento de informações como propriedades superficiais, presença de atmosfera, densidade e estrutura interna ainda são insuficientes ou muitas vezes inexistentes. Além disso, obter características físicas dos TNOs é um desafio pois as populações se sobrepõem, eles são tipicamente pequenos e normalmente possuem superfícies escuras o que, somado à suas distâncias, os torna pouco brilhantes, com magnitudes aparente maiores que 19 (PETIT *et al.*, 2008; SPOHN *et al.*, 2014), dificultando a observação direta destes objetos a partir do solo.

A observação de TNOs pode ser feita na faixa do visível a fim de se derivar propriedades espectro-fotométricas e na obtenção de curvas de luz de rotação (PERNA *et al.*, 2010, 2013; THIROUIN *et al.*, 2014). Observações no infra-vermelho (através de telescópios espaciais como NASA/Spitzer ou ESA/Herschel) podem fornecer uma estimativa de tamanho, combinando os brilhos no visível e de emissão térmica. Entretanto, os resultados são dependentes de modelos e, por isso, acurácias nos diâmetros equivalentes chegam a, no máximo, 10-20% (MÜLLER *et al.*, 2009; STANSBERRY *et al.*, 2008). Com o lançamento do telescópio espacial James Webb (JWST), será possível obter informações mais precisas que servirão na caracterização e diversificação das composições superficiais destes objetos distantes (PARKER *et al.*, 2015). Os centauros, como uma população transiente e por estarem mais próximos, são tipicamente mais brilhantes que os TNOs e podem servir como seus representantes, inferindo propriedades gerais dos objetos mais distantes (FERNÁNDEZ *et al.*, 2002). Por este motivo, a observação com o telescópio espacial Hubble (HST) é uma ótima opção para obter imageamento direto, propriedades fotométricas, limites para detecção da presença de possíveis satélites ou outro tipo de material ao redor de um determinado corpo, além de outras informações preciosas sobre estes objetos.

Uma outra técnica observacional da qual é possível derivar resultados importantes é a ocultação estelar. Através dela é possível obter tamanhos e formas da ordem de km, pressões atmosféricas a nível do nano-bar (ORTIZ *et al.*, 2012; SICARDY *et al.*, 2011) e até detectar jatos de matéria ou anéis (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014; ORTIZ *et al.*, 2015). Desde 2009, após a primeira observação de uma ocultação estelar por um TNO (além do sistema de Plutão) (ELLIOT *et al.*, 2010), muitos objetos foram medidos por esta técnica. Alguns exemplos são Varuna (SICARDY *et al.*, 2010), Eris (SICARDY *et al.*, 2011), 2003 AZ₈₄ (BRAGA-RIBAS

et al., 2011; BRAGA RIBAS *et al.*, 2012), Quaoar (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2013; PERSON *et al.*, 2011; SALLUM *et al.*, 2011), Makemake (ORTIZ *et al.*, 2012), 2002 KX₁₄ (ALVAREZ-CANDAL *et al.*, 2014), 2007 UK₁₂₆, entre outros, e Centauros como Chariklo (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014) e Chiron (ORTIZ *et al.*, 2015) - que também foi observado em ocultações antes de 2009 (BUS *et al.*, 1996; ELLIOT *et al.*, 1995).

Neste trabalho é apresentado em detalhes a preparação de dois pedidos de tempo de observação dos centauros Chariklo e Chiron utilizando o HST. Com o objetivo de confirmar as estruturas observadas ao redor destes objetos, através de ocultações estelares, e estudar os arredores dos dois centauros, as observações de Chariklo já foram realizadas em junho e agosto de 2015 enquanto que as observações de Chiron foram realizadas parcialmente, tendo uma última visita agendada para o segundo semestre de 2016. Os resultados preliminares das observações são apresentadas no Capítulo 2. Os pedidos submetidos são apresentados no Apêndice A. No Capítulo 3, são apresentados a redução, análise e resultados de uma ocultação estelar pelo TNO 2007 UK₁₂₆. Esta ocultação, ocorrida em 15 de novembro de 2014, foi observada por diversos astrônomos profissionais e amadores dentre os quais se destacam os participantes do projeto RECON, coordenado pelo Dr. Marc Buie, que obtiveram 6 dentre as 7 cordas positivas observadas no evento. Finalmente no Capítulo 4 são apresentados alguns comentários finais e a conclusão.

Capítulo 2

Observação de Chariklo e Chiron com HST

Chariklo (ou 1997 CU₂₆) é o maior Centauro conhecido atualmente, com um diâmetro de $\sim 248 \pm 18$ km (FORNASIER *et al.*, 2013). Descoberto em 1997 por James Scotti (TICHA *et al.*, 1997), sua órbita elíptica encontra-se entre Saturno e Urano. As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam seus parâmetros físicos e orbitais. Em 3 de junho de 2013, através de uma ocultação estelar, foram detectadas estruturas interpretadas como dois anéis em sua órbita com larguras de 7 e 3 km, espessura óptica 0,4 e 0,06, raios orbitais de 391 e 405 km, respectivamente, e separados entre si por uma distância de 9 km (espessura óptica $\tau < 0,004$ (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014)). Esta foi a primeira vez que anéis foram observados ao redor de corpos pequenos que, até então, era exclusividade dos planetas gigantes. Tal descoberta sugere que anéis são mais comuns do que se pensava e também mostra que há uma grande diversidade de estruturas entre os pequenos corpos.

De acordo com Braga-Ribas *et al.* (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014), a posição dos polos observada em 2013 implica que as observações em 2007-2008 estavam com um ângulo de visada na borda dos anéis (*edge-on*), o que resulta numa explicação simples da diminuição de brilho entre 1996 e 2008 (BELSKAYA *et al.*, 2010), além de explicar o desaparecimento gradual, durante este período, da banda de gelo de água em $2\mu m$ e o declive abaixo de $0,5\mu m$. Isto é uma evidência direta de que gelo de água está presente nas partículas dos anéis (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014; DUFFARD *et al.*, 2014). Braga-Ribas *et al.* ainda estimaram a reflectividade do anel I/F sendo aproximadamente 0,1, cerca de três vezes maior que o albedo geométrico de Chariklo ($p = 0,035$ - veja Tabela 2.2). Com isto, estima-se que a massa dos anéis corresponde

Tabela 2.1: Parâmetros Orbitais dos centauros observados pelo HST.

Elemento ^a	Objeto	
	Chariklo	Chiron
a ¹ (UA)	15,777	13,637
e ²	0,172	0,382
i ³ (°)	23,409	6,942
q ⁴ (UA)	13,059	8,421
nodo ⁵ (°)	300,385	209,253
peri ⁶ (°)	241,987	339,404
M ⁷ (°)	65,999	138,356
período (anos)	62,67	50,36
Q ⁸ (UA)	18,495	18,853

^a Dados extraídos do banco de dados NASA/JPL (NASA/JPL, 2016); ¹ Semi-eixo maior; ² Excentricidade; ³ Inclinação; ⁴ Distância do perihélio; ⁵ Longitude do Nodo Ascendente; ⁶ Argumento do perihélio; ⁷ Anomalia média; ⁷ Distância do afélio.

Tabela 2.2: Parâmetros Físicos dos centauros observados pelo HST.

Parâmetro	Objeto	
	Chariklo	Chiron
H* (mag)	7,40 ^a	5,92 ^a
Diâmetro (km)	248 ± 18 ^b	218 ± 20 ^a
Período Rotação (h)	7,004 ^c	5,918 ^d
Albedo	0,035 ^a	0,16 ^a

* Magnitude Absoluta ^a FORNASIER *et al.* 2013; ^b BRAGA-RIBAS *et al.* 2014; ^c FORNASIER *et al.* 2014; ^d WARNER *et al.* 2009

à de um corpo de gelo de raio aproximado de 1 km. Outra característica dos aneis é que eles são bastante confinados, tais como os aneis de Urano. Por isso, espera-se que tal confinamento em Chariklo tenha uma causa física similar ao confinamento que ocorre nos aneis de Urano e, se for gerado por satélites ‘pastores’, estes devem ter um tamanho de alguns quilômetros para balancear o espalhamento viscoso dos aneis (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014).

O segundo maior Centauro, Chiron (também denominado 95P/Chiron ou ainda 1977 UB) possui um diâmetro de 218 ± 20 km (FORNASIER *et al.*, 2013). Descoberto há quase 40 anos (KOWAL *et al.*, 1977), possui uma órbita similar à de Chariklo, entre Saturno e Urano. As Tabelas 2.1 e 2.2 também apresentam seus parâmetros físicos e orbitais. Em 1988 apresentou um aumento em 75% de seu brilho (HARTMANN *et al.*, 1990) e o desenvolvimento de uma coma (MEECH e BELTON, 1989), por isso recebeu também a denominação ‘95P’, correspondente a um cometa. Alguns anos depois, em 1993 e 1994, duas ocultações estelares apresentaram a existência de material ao redor do objeto, interpretados como jatos colimados de matéria além da presença de uma coma (BUS *et al.*, 1996; ELLIOT *et al.*, 1995). Numa outra ocultação mais recente, em 2011, Chiron apresentou, a ~ 300 km de seu centro, estruturas simétricas e confinadas em duas regiões a aproximadamente 3 e 7 km, separadas por uma distância de 10 a 14km (RUPRECHT *et al.*, 2015). Combinando resultados das três ocultações com dados fotométricos, espectrométricos e variações de amplitude de curvas de luz, Ortiz *et al.* (ORTIZ *et al.*, 2015) propuseram um modelo de anel orbitando a 325 km de Chiron que poderia explicar as observações. Entretanto, mais dados são necessários para prevenir conclusões ambíguas sobre a exata natureza do material detectado. Além disso, as observações existentes requerem que o possível anel seja inomogêneo em azimute (como os arcos de anel em Netuno), exigindo então mais explicações de quais são os mecanismos que estabilizam¹ tais estruturas.

Em ambos os casos, está estabelecido que tanto Chariklo como Chiron estão circundados por material confinado. É interessante notar algumas coincidências entre os dois corpos. Ambos os corpos se movem em órbitas entre Saturno e Urano, sugerindo que ambos passam, ou passaram, por algum processo em comum. Eles possuem tamanhos similares e são massivos suficiente ($\sim 10^{19}$ kg para um corpo de

¹Mecanismos para estabilizar e confinar os aneis só são necessários caso se assuma que estas estruturas não são transientes. Entretanto, como apontado por BRAGA-RIBAS *et al.* (2014), aneis confinados como os de Chariklo devem durar ao menos alguns milhares de anos, fazendo com que eles sejam sejam ou muito jovens ou estejam confinados por algum mecanismo ativo. Note que a mesma situação é observada nos aneis de Urano ou em alguns dos aneis de Saturno: mecanismos de satélites pastores confinando as bordas externas dos aneis A e B em Saturno e o anel ϵ é confinado por Cordelia e Ophelia em Urano. Portanto um cenário com satélites pastores é bastante interessante, principalmente quando estão próximos do limite de Roche, misturando dinâmica de aneis e satélites, sendo uma das propostas para explicar os confinamentos.

gelo de água com 110-125 km de raio) para que a velocidade de escape na superfície seja comparável com velocidades típicas de ejeção de matéria ($\sim 100m \cdot s^{-1}$)² (LUU e JEWITT, 1990), permitindo jatos gravitacionalmente ligados (por exemplo, na forma de arcos). Portanto, a dinâmica do material ao redor destes centauros deve ser diferente daquela típica de cometas, onde praticamente todo material é ejetado para o infinito. Estes corpos são também massivos o suficiente para reter parte do material ejetado e formar um disco (e posteriormente possivelmente formar anéis), mas não tão massivos para forçar o material a voltar para a superfície. Além disso, às distâncias heliocêntricas que se encontram, a aceleração por radiação solar, γ_{RP} , é desprezível quando comparada à gravidade do corpo central, γ_C , para partículas micrométricas. De fato,

$$\frac{\gamma_{RP}}{\gamma_C} = \frac{M_{\odot}}{M_C} \left(\frac{r}{a}\right)^2 \beta \quad (2.1)$$

onde M_{\odot} é a massa solar, M_C a massa do corpo, a a distância heliocêntrica, r a distância da partícula ao centro do corpo e β a razão da aceleração pela radiação solar em relação à aceleração gravitacional. Tomando $M_{\odot} \simeq 2 \cdot 10^{30}$ kg, $M_C = 10^{19}$ kg, $a = 15$ UA e uma partícula orbitando a $r = 300$ km, obtém-se $\frac{\gamma_{RP}}{\gamma_C} = 5 \cdot 10^{-3}\beta$, com $\beta \simeq \frac{1}{\rho s}$ (ρ é a densidade da partícula em $g \cdot cm^{-3}$ e s é o raio da partícula em microns) (BURNS *et al.*, 1979). Ou seja, para partículas de gelo de alguns microns de tamanho ($\beta=1$), a pressão de radiação só vai ter alguma influência em partículas distantes alguns milhares de quilômetros do corpo principal.

Entretanto, apesar das similaridades, enquanto em Chiron foram observadas diversas atividades e até desenvolveu uma coma pouco antes de sua passagem pelo perihélio, a mais de 18 UA (BUS *et al.*, 1996)³, Chariklo não apresentou nenhuma atividade cometária desde sua descoberta. Além disso, a origem deste material no entorno dos centauros, principalmente de Chariklo, ainda é um mistério. Ela pode ser exógena (por exemplo, provenientes de material ejetado depois de um ou mais impactos com o corpo) ou endógena (por exemplo, de material ejetado da superfície ou do interior do corpo, formando um disco e posteriormente anéis), mas nenhum destes cenários foi descrito em detalhe ainda⁴.

Neste contexto, o telescópio espacial Hubble foi escolhido por ser um instrumento único para fornecer informações para melhor entender os arredores destes dois centauros. Um pedido de tempo para o Ciclo 22 do HST foi preparado e aceito para as observações dos dois objetos mas somente foram aceitas as observações de Chariklo.

²Veja no Apêndice D uma análise da velocidade típica de ejeção de matéria comparado com a velocidade de escape.

³Como é mostrado em BUS *et al.* (1996), o desenvolvimento do coma não está relacionado à passagem pelo perihélio.

⁴Uma publicação mais recente de PAN e WU (2016) apresenta estudos sobre diferentes cenários de formação dos anéis.

No ano seguinte, novas informações foram publicadas a respeito de Chiron (ORTIZ *et al.*, 2015; RUPRECHT *et al.*, 2015) e, então, foi preparado um novo pedido de tempo somente para este objeto o qual foi aceito para o Ciclo 23. Os objetivos das observações são similares para ambos os centauros. Para Chariklo foram:

1. Detectar as ‘asas’ do anel, confirmando sua existência e o ângulo de posição;
2. Obter as primeiras medidas fotométricas diretas, em diferentes comprimentos de onda, a fim de restringir a composição dos anéis (em particular verificar a presença de gelo de água);
3. Procurar por satélites ou prover limites superiores para a presença deles dentro da esfera de Hill de Chariklo;
4. Detectar ou fornecer limites superiores para outros materiais e estruturas ao redor de Chariklo;

enquanto que para Chiron:

1. Obter imagens direta do Centauro a fim de distinguir entre os diversos modelos propostos: anéis (ORTIZ *et al.*, 2015), jatos colimados (ELLIOT *et al.*, 1995), casca de poeira (RUPRECHT *et al.*, 2015);
2. Obter as primeiras medidas fotométricas diretas, em diferentes comprimentos de onda, a fim de restringir a composição do material ao redor do objeto (em particular verificar a presença de gelo de água);
3. Procurar por satélites ou prover limites superiores para a presença deles dentro da esfera de Hill de Chiron;
4. Obter imagens da coma e procurar por possíveis discos de partículas muito tênues para serem detectadas através de ocultações estelares;

Neste Capítulo, serão apresentados mais detalhes de cada objetivo e os procedimentos utilizados na investigação nas seções 2.1.1 a 2.1.8, a escolha de equipamentos e filtros na seção 2.2, além dos resultados preliminares obtidos das observações já realizadas nas seções 2.4 e 2.5.

2.1 Objetivos e Estratégias das observações

Em junho de 2015, durante sua oposição (época para a qual foi elaborado o pedido de tempo no Ciclo 22), Chariklo encontrava-se a aproximadamente 14,1 UA da Terra e possuía uma magnitude visual aparente de 18,5. Com um diâmetro de aproximadamente 250 km, o Centauro possuía um tamanho aparente de cerca de

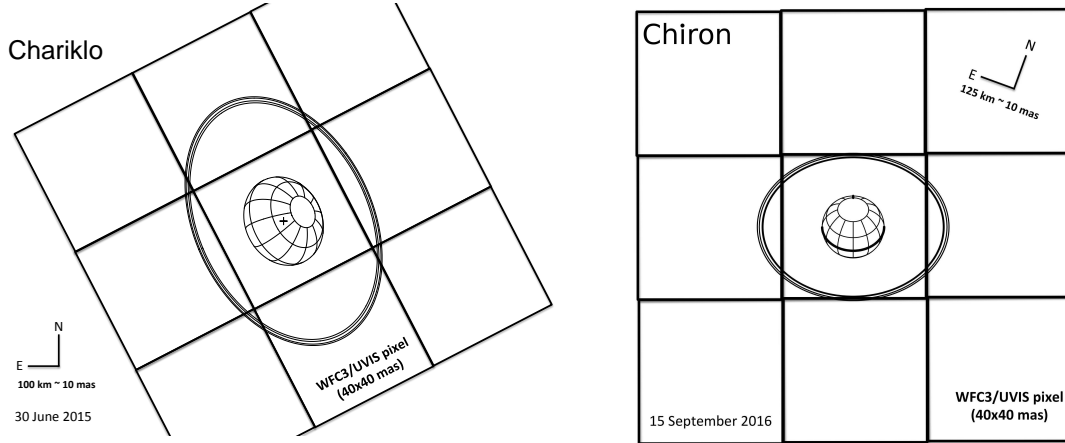


Figura 2.1: Tamanho e orientação esperados para Chariklo na oposição em junho/2015 (esquerda) e Chiron em setembro/2016 (direita). As caixas representam o tamanho do pixel da câmera WFC3/UVIS (40x40mas). As orientações são as esperadas de Braga-Ribas et al. (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014) para Chariklo e de Ortiz et al. (ORTIZ *et al.*, 2015) com as larguras dos anéis de Ruprecht et al. (RUPRECHT *et al.*, 2015) para Chiron.

25 milissegundos de arco (mas) no céu e seus anéis, com um diâmetro de cerca de 800 km, 80 mas. Além disso, a geometria esperada para os anéis em sua oposição correspondia a um ângulo de abertura $B = 43^\circ$ e ângulo de posição $P = -64^\circ$, como mostrado na Figura 2.1.

Chiron, por outro lado, estará a 17,3 UA da Terra e terá uma magnitude visual aparente de 18,6 em sua oposição em setembro de 2016 (época para a qual foi elaborado o pedido de tempo no Ciclo 23). Com um diâmetro aproximado de 220 km, terá tamanho aparente de 17 mas, enquanto seus supostos anéis que se estendem por 750 km, ~ 51 mas. A geometria esperada corresponde a um ângulo de abertura $B = 50^\circ$ e ângulo de posição $P = 20^\circ$, como mostrado na Figura 2.1.

Um outro ponto importante a se considerar é a grande quantidade de estrelas no campo de Chariklo. O Centauro tem como plano de fundo o plano da galáxia e, com isso, uma quantidade enorme de estrelas com brilho maior ou compatível com o brilho do próprio alvo. Para minimizar a contaminação destas estrelas devido às longas exposições necessárias, a observação do objeto próxima à sua oposição é crucial pois as estrelas se moverão rápido o suficiente para que afetem uma exposição simples, mas não um conjunto de imagens que serão co-adicionadas posteriormente. Este mesmo procedimento foi utilizado nas observações do sistema de Plutão⁵. Além

⁵Em comunicação privada com Marc Buie, Investigador Principal dos pedidos de tempo do HST para observação de Plutão e co-investigador dos pedidos de tempo para Chariklo e Chiron.

disso, foram verificados intervalos de tempo para os quais Chariklo respeitava as seguintes condições:

1. Qualquer estrela mais brilhante que mag. 13 esteja distante ao menos 50" (para um observador no geocentro);
2. Qualquer estrela com magnitude entre 13 e 19 esteja distante ao menos 6" (para um observador no geocentro).

Para encontrar estes períodos, o catálogo USNO-B (MONET *et al.*, 2003) sem movimento próprio foi utilizado. Quanto às magnitudes, foram consideradas primeiramente magnitudes R; caso não houvesse informação desta magnitude no catálogo, foram consideradas Mag I e, em seguida, caso também não houvesse informação desta magnitude, Mag B. No caso de Chiron, apesar de não ter o plano da galáxia como plano de fundo, a mesma verificação foi realizada a fim de evitar quaisquer imprevistos desta natureza nas observações.

Os melhores intervalos de tempo foram então selecionados para que todas as imagens de ciência em cada visita fossem tomadas numa única órbita do HST.

Como dito anteriormente, para cada um dos dois centauros foram estabelecidos 4 objetivos para as observações. Cada um deles é apresentado em detalhes a seguir.

2.1.1 Detecção dos anéis de Chariklo

Detectar as alças dos anéis permitirá determinar o ângulo de posição e, desta forma, confirmar com imagens diretas a geometria deduzida a partir das ocultações. A partir dos dados de Braga-Ribas *et al.*, pode-se estimar que a área total aparente dos anéis representa cerca de 25% da área de Chariklo, enquanto reflete $\sim 75\%$ mais, já que são 3 vezes mais brilhantes. Consequentemente, cada alça tem um fluxo estimado que representa cerca de 20% do fluxo de Chariklo na região do visível.

A estratégia para se observar as alças é feita da seguinte maneira: primeiro toma-se uma sequência de imagens com as colunas do CCD alinhadas com o eixo maior aparente dos anéis (veja Figura 2.1) e fazendo com que o fotocentro de Chariklo recaia no mesmo píxel do detector. Este píxel não deve estar localizado no centro do CCD pois existe uma coluna com pixeis mortos nesta região. Por isso, foi escolhido um *offset* (chamado de *POST TARG*) de 3", ou 75 colunas de pixeis. Esta mesma centragem (e o *offset*) foi aplicada para todos os objetivos da observação e é válido tanto para Chariklo quanto para Chiron. A centragem num mesmo pixel evita que a sensibilidade de diferentes pixeis sejam consideradas, podendo afetar os resultados ao combinar as imagens. O *offset* evita a coluna com pixeis mortos existente no centro do subset C512C do CCD (ver seção 2.2.1). Em seguida, gira-se o telescópio 90° e toma-se uma nova sequência de imagens. As imagens de cada visita são então

combinadas de forma a se obter uma imagem equivalente de $\sim 25,4$ minutos de tempo de exposição. Subtraindo as imagens resultantes das duas visitas, a contribuição de Chariklo será eliminada e, assim, serão reveladas as alças dos anéis e o ângulo de posição. Note que este procedimento não necessita utilizar um modelo de Função de Espalhamento Pontual (PSF), apenas considerar a diferença de brilho de Chariklo para as diferentes visitas.

Considerando Chariklo como uma fonte pontual com $V_{\text{mag}} = 18,5$, cada uma das alças dos anéis corresponde também a uma fonte pontual com $V_{\text{mag}} = 20$ que deverá aparecer claramente, como na simulação da Figura 2.4. Nesta simulação para testar os limites de detecção, um modelo de Chariklo com e sem os anéis foi criado com resolução perfeita e subamostrado em três vezes para gerar uma imagem equivalente da câmera WFC3. Em seguida, o modelo foi convoluído com uma PSF sobreamostrada e escalonada para o tempo de exposição do filtro. A PSF foi obtida de uma biblioteca de PSFs observadas do HST para o filtro F350LP⁶ (banda larga) com foco nominal e uma cor $B-V = 0,75$ para Chariklo e considerando as distorções do instrumento na posição do pixel esperada para o alvo (nas coordenadas do CCD $x=350$ e $y=250$). Uma subamostragem foi então aplicada para incluir as distorções e obter uma imagem equivalente à resolução da câmera WFC3. A PSF real obtida a partir de observações com o HST do sistema de Plutão está apresentada na Figura 2.2. O modelo de Chariklo com os anéis convoluído com a PSF está mostrado na Figura 2.3. Um satélite de aproximadamente 2 km de raio e refletividade similar à dos anéis foi também adicionado a 2 arcsec do centro de Chariklo. Para gerar a Fig. 2.4, duas imagens foram combinadas: a primeira imagem é o modelo de Chariklo com os anéis convoluído com a PSF (Figura 2.3 esquerda); a segunda imagem é o modelo rotacionado em 90° de Chariklo com os anéis convoluído com a PSF sem rotação (Figura 2.3 direita). Note que a rotação do telescópio não altera a orientação do ângulo de posição Chariklo. Portanto, para obter a diferença entre as elipses aparentes entre as visitas é necessário que o CCD esteja na mesma orientação, fazendo com que Chariklo esteja 90° rotacionados com respeito a ele mesmo e, desta forma, a contribuição da PSF é irrelevante e as estruturas do anel tornam-se evidentes. Note ainda que como o modelo de Chariklo é ideal e simétrico, as partes claras e escuras na Figura 2.4 aparentam ser simétricas.

⁶Biblioteca particular de Marc Buie obtida a partir de mais de 20 anos de observações do sistema de Plutão.

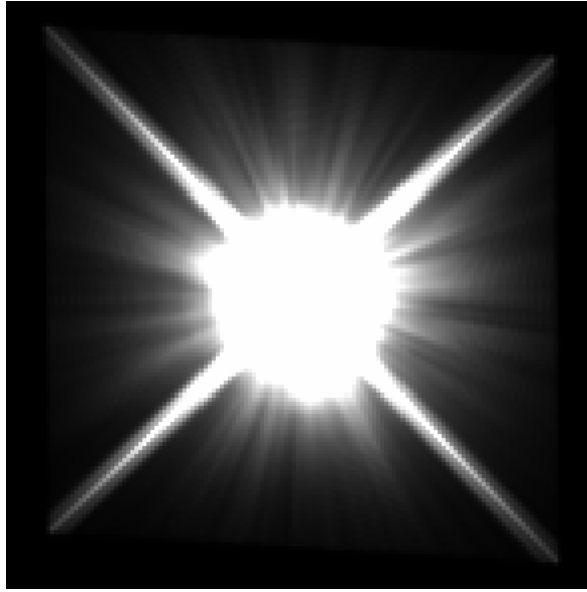


Figura 2.2: PSF real observada do HST para a região de interesse do CCD obtida a partir de mais de 20 anos de observações do sistema de Plutão. A PSF está sobreamostrada em 52 vezes o tamanho do pixel da câmera WFC3.

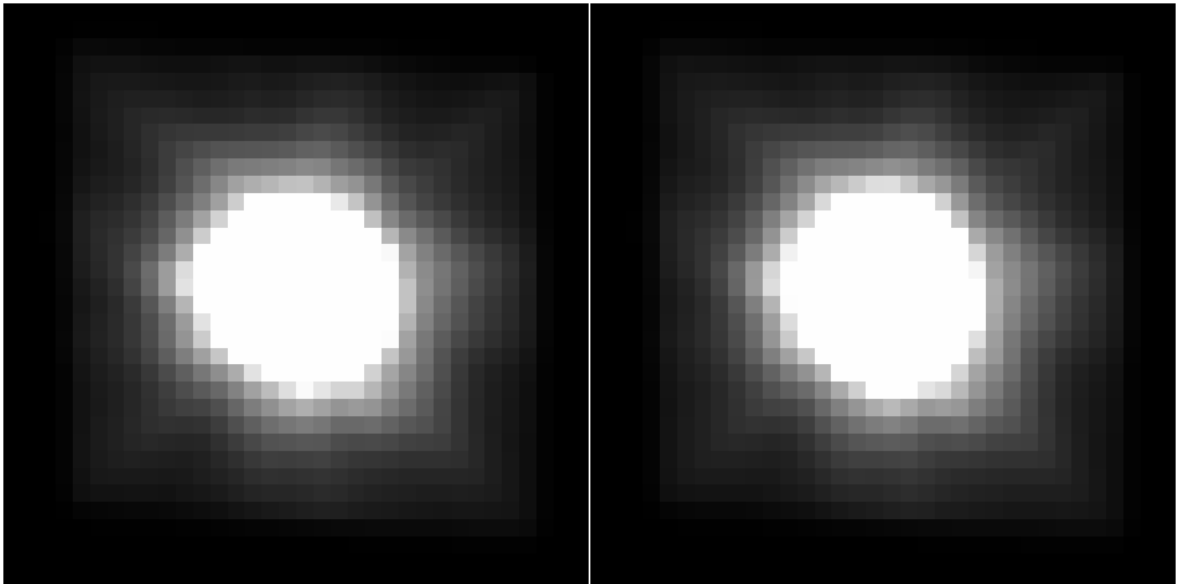


Figura 2.3: Modelo de Chariklo para a WFC3 considerando o efeito do dither e convoluído com a PSF (ver Figura 2.2). A figura da direita foi obtida rotacionando apenas o modelo em 90° e mantendo a orientação da PSF.

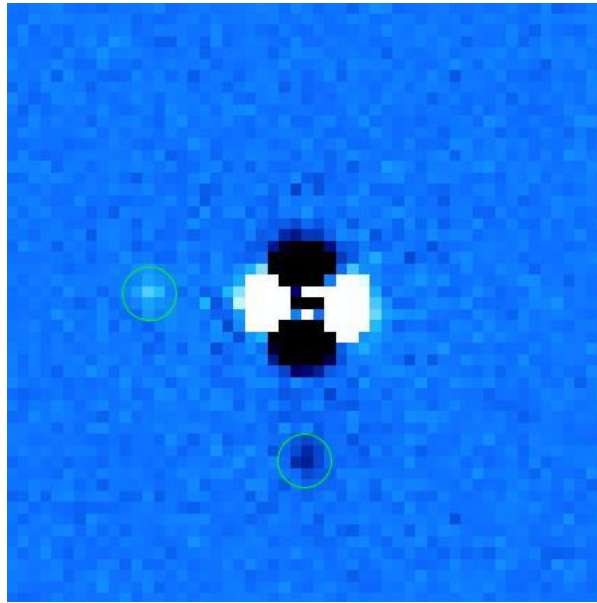


Figura 2.4: Dados de simulação mostrando a detecção dos anéis de Chariklo usando a diferença entre dois conjuntos de exposições de 170 segundos. Os anéis aparecem como um excesso de sinal quando a contribuição de Chariklo é removida. Usando uma rotação entre duas épocas de observação, a primeira data aparece como um excesso de luz (em branco) e na segunda data, rotacionado de 90° , como um excesso negativo (em preto). Um satélite de magnitude $V = 27$ (correspondendo a um corpo de alguns km de diâmetro) também foi incluído e aparece a 2 segundos de arco à esquerda de Chariklo (ponto claro dentro do círculo verde) e a 2 segundos de arco abaixo (ponto escuro no círculo verde).

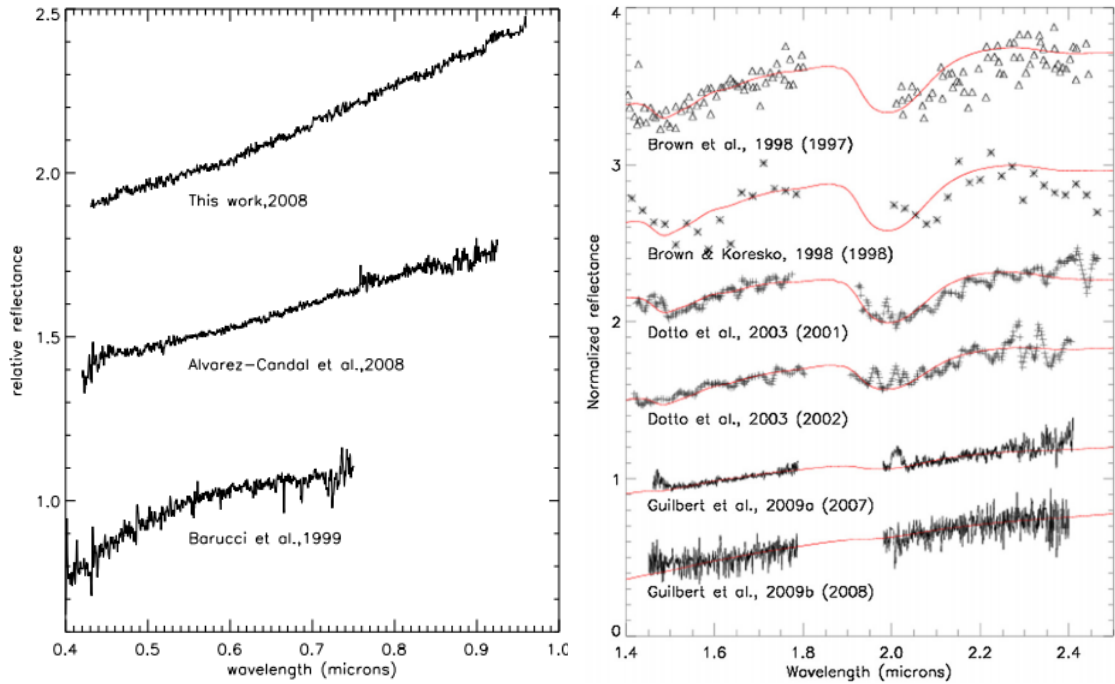


Figura 2.5: Variação temporal do espectro de Chariklo em diferentes comprimentos de onda. **Esquerda:** A variação da inclinação medidas em três trabalhos entre 1999 e 2008 (ALVAREZ-CANDAL *et al.*, 2008; BARUCCI *et al.*, 1999) (‘This work’ refere-se ao trabalho de BELSKAYA *et al.* (2010)) para comprimentos de onda entre 0,4 e 0,7 microns. **Direita:** Variação e desaparecimento da banda de absorção em ~ 2 microns entre 1997 e 2008. (BROWN e KORESKO, 1998; BROWN *et al.*, 1998; DOTTO *et al.*, 2003; GUILBERT *et al.*, 2009) Ambas as variações são indícios da presença de gelo e água na composição dos anéis e podem ser explicados por uma simples variação no ângulo de posição dos anéis, como explicado em BRAGA-RIBAS *et al.* (2014).

A sequência de imagens é tomada fazendo um pequeno deslocamento (cerca de meio pixel) entre cada uma delas - processo conhecido com *dither*. Desta forma, cria-se pixels virtuais, aumentando a resolução e evitando alguns problemas como a existência de algum pixel quente ou morto. O padrão e orientação utilizadas no dither é um procedimento fundamental no HST e será explicado com mais detalhes na seção 2.2.

2.1.2 Fotometria diferencial de Chariklo

Através da orientação aparente dos anéis de Chariklo, Braga-Ribas *et al.* (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014) apresentaram uma explicação simples para a diminuição de brilho entre 1996 e 2008 (BELSKAYA *et al.*, 2010), do desaparecimento gradual, durante este período, da banda de gelo de água em $2\mu\text{m}$ e o declive abaixo de $0,5\mu\text{m}$ como mostra a Figura 2.5.

Observando também o espectro de Chariklo (GUILBERT *et al.*, 2009; GUILBERT-LEPOUTRE, 2011), acredita-se que na composição dos anéis contenha gelo de água com alguns contaminantes. Observações mais recentes feitas por DUFFARD *et al.* (2014) comprovam que tanto gelo de água quanto alguns outros materiais como silicatos, tolinas e carbono amorfo estão presentes nos anéis. Estudos recentes indicam que a presença de partículas pequenas (grãos menores que micrômetros) podem afetar significativamente as bandas de absorção do gelo de água (CLARK *et al.*, 2012). Partículas de gelo contaminadas com carbono ou ferro, por exemplo, podem agir como potenciais absorvedores na banda do ultravioleta (ou até agirem em banda-larga, caso estejam em maior concentração) (CLARK *et al.*, 2012). Portanto, apesar do gelo de água ter uma banda de absorção típica próximo a 1,9 microns, uma assinatura típica de contaminantes neste gelo pode ser observada abaixo de 0,6 microns. Portanto, realizar uma fotometria diferencial com filtros nas bandas próximas de 0,3 microns e 0,5 microns pode indicar uma inclinação na curva e evidenciar os contaminantes no gelo de água apresentados por DUFFARD *et al.* (2014).

Utilizando observações do HST de Chariklo com três filtros diferentes, um centrado na parte visível, um filtro banda larga (visível e infra-vermelho) e outro correspondente ao ultra-violeta, e analisando a diferença de brilho nos filtros, espera-se então confirmar a presença de água e contaminantes na composição do material do anel, da mesma maneira que foi realizado para os anéis de Saturno (HEDMAN *et al.*, 2013). Para mais detalhes sobre os filtros escolhidos, veja a seção 2.2.

2.1.3 Procura de satélites ao redor de Chariklo

A existência (ou ausência) de um ou mais satélites ao redor de Chariklo pode nos dizer mais sobre os cenários da formação e confinamento de seus anéis (entre outros: impacto, ejeção de matéria, quebra de um satélite por forças de maré). Além disso, a presença de um satélite com período orbital conhecido pode prover a massa de Chariklo e sua densidade e, com isso, fornecer uma ideia melhor de onde estão os anéis relativos ao limite de Roche de Chariklo.

Detectar satélites com tamanho de alguns quilômetros próximo aos anéis ainda não é possível. Isso porque com a resolução das imagens sua presença será indistinguível de possíveis variações de brilho longitudinais. Entretanto, satélites mais distantes podem ser detectados. Considerando uma massa típica para Chariklo de 10^{19} kg (supondo um corpo de gelo de água com raio = 125 km), sua esfera de Hill, considerando o Sol, é $r_{HC} \sim 230.000$ km. Como satélites podem sobreviver a tipicamente 30% deste valor, poderia se observar a presença de satélite a aproximadamente 75.000 km ($\sim 7,5$ arcsec do corpo principal). Satélites com raios orbitais

menores que 20.000 km (~ 2 arcsec do corpo principal) também não poderiam ser detectados por estar muito próximos do corpo principal, sofrendo altos efeitos de maré e tendo grandes chances de ser rompido.

Além disso, deve-se considerar a influência de Urano, já que a órbita de Chariklo é controlada pelo planeta gigante (HORNER *et al.*, 2004). Para que um satélite a ~ 70.000 km ser retirado da órbita de Chariklo, um encontro mais próximo que $2,1 \cdot 10^7$ km com Urano deve ocorrer. A probabilidade de um evento como este é de apenas alguns por cento (NOGUEIRA *et al.*, 2011). Logo, uma órbita entre 20.000 km e 70.000 km é razoável de se esperar para um satélite de Chariklo, que sobreviveria tanto a influências do Sol quanto de Urano e do próprio Chariklo.

A magnitude aparente m de um objeto no Sistema Solar é dado por:

$$m = m_{\odot} + 5 \cdot \log(1 \cdot UA_{km}) + 5 \cdot \log(r_{UA} \cdot \Delta_{UA}) - 2,5 \cdot \log(pR_{km}^2) \quad (2.2)$$

onde m_{\odot} é a magnitude do Sol a 1 Unidade Astronômica ($V \sim -26,8$), UA_{km} é o valor de 1 Unidade Astronômica em quilômetros ($1,496 \cdot 10^8$), r_{UA} é a distância geocêntrica do objeto em Unidades Astronômicas e Δ_{UA} a distância heliocêntrica do objeto em UA. É importante notar que a equação não leva em consideração efeitos de fase. Entretanto, este efeito é pequeno para objetos mais distantes no Sistema Solar acaba sendo um fator de pouca importância para esta estimativa.

Considerando Chariklo a uma distância geocêntrica de 14,2 UA e helicêntrica de 15,6 UA em sua oposição em 2015, um satélite com raio R_{sat} (km) e albedo geométrico p_{sat} , terá magnitude $V \sim 25,8 - 2,5 \cdot \log_{10}(p_{sat} \cdot R_{sat}^2)$. Tomando uma magnitude limite $V \sim 28$ e assumindo $p_{sat} \sim 0,1$ (similar à refletividade do anel principal), é possível detectar um satélite com apenas alguns quilômetros de raio utilizando o filtro de banda larga. O movimento do satélite pode ser verificado realizando-se observações espaçadas temporalmente. Um satélite com um raio orbital r_{km} tem um período $T \sim 10^{-4} \cdot r_{km}^{1,5}$ dias. Então, para a massa estimada de Chariklo e as órbitas esperadas, T pode variar entre 8 meses a 5 anos. Durante uma semana, intervalo proposto entre as visitas para as observações, um satélite localizado em cada um dos dois casos extremos considerados move-se 3.500 e 1.900 km, respectivamente, correspondendo a aproximadamente 9 e 5 pixels. Da mesma maneira que na seção 2.1.1, subtraindo as visitas consecutivas espaçadas temporalmente elimina-se a contribuição de Chariklo, realçando a presença dos satélites (Figura 2.4).

2.1.4 Procura de outras estruturas ao redor de Chariklo

Além da confirmação da existência do anel com seu ângulo de posição e composição e a procura de satélites, a observação com o HST tem como objetivo procurar

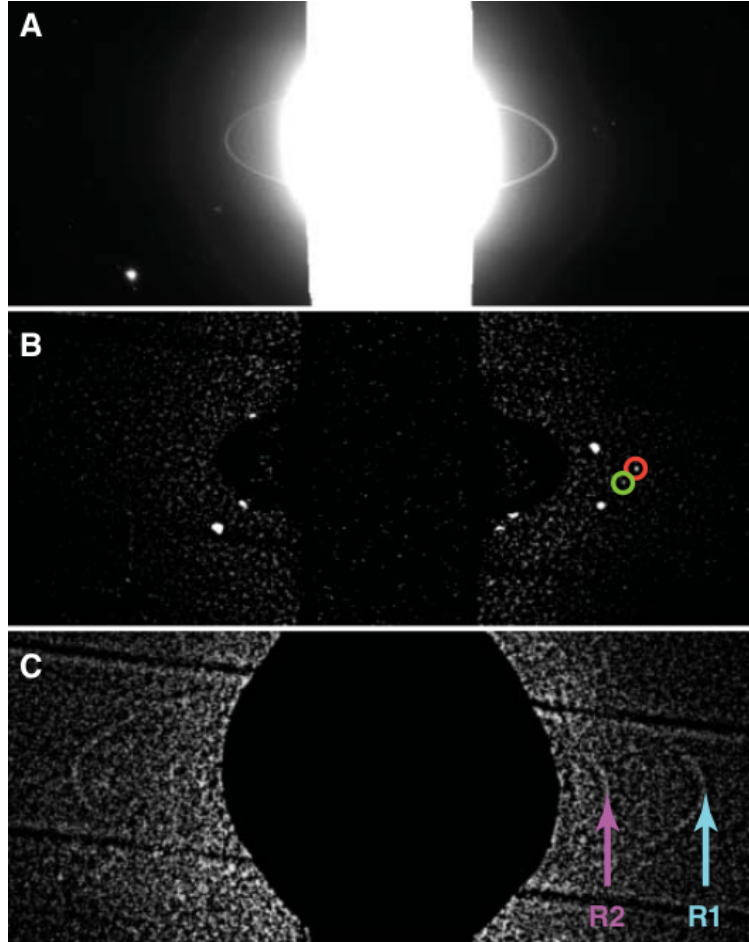


Figura 2.6: Anéis de Urano detectados pelo HST em 2003. No painel superior Urano saturado. No painel central uma filtragem eliminou o gradiente de fundo e ‘apagou’ regiões brilhantes. Um contraste releva duas luas conhecidas Perdita (vermelho) e Cupido (verde). No painel inferior, uma soma de 24 imagens tomadas numa mesma visita revelou dois anéis não conhecidos, R1 e R2, com espessuras ópticas $\tau \sim 10^{-5}$. A escala horizontal é de 210.000 km. Fonte: (SHOWALTER e LISSAUER, 2006)

por outras estruturas ao redor de Chariklo como jatos ou anéis de poeira mais dispersos ou pouco brilhantes. Em Urano, por exemplo, dois anéis tênues (μ e ν) com espessuras ópticas entre $0,5$ e $1 \cdot 10^{-6}$, associados a pequenos satélites, foram observados com o HST (SHOWALTER e LISSAUER, 2006), como mostra a Figura 2.6. Um bombardeio por micrometeoroides nos satélites ou mesmo em Chariklo pode criar e sustentar anéis tênues como estes ao redor do Centauro.

Um anel com espessura óptica τ composto por partículas de albedo p tem uma refletividade $I/F = p \cdot \tau$ e magnitude por píxel

$$V \sim 25,8 - 2,5 \cdot \log_{10}(I/F \cdot A) = 25,8 - 2,5 \cdot \log_{10}(p \cdot \tau \cdot A) \quad (2.3)$$

onde A é a área projetada (em km^2) ocupada pelo anel dentro de um pixel ($40 \times 40 \text{ mas}$). Pode-se estimar $A \sim W \cdot L$, onde $L \sim 400 \text{ km}$ é o lado de um pixel projetado em Chariklo e W a largura do anel. Um limite inferior para W é duas vezes o raio da esfera de Hill r_H do satélite associado, ou seja, para um satélite de $\sim 2 \text{ km}$ de raio orbitando a $\sim 20.000 \text{ km}$ (2 arcsec) tem-se $W \sim 400 \text{ km}$. Então, tomando-se $p \sim 0,1$ e uma magnitude limite $V \sim 27$ por pixel, tem-se o limite de detecção da espessura óptica de um anel de poeira como sendo $\tau \sim 2 \cdot 10^{-5}$ por pixel. Entretanto, este limite pode ser reduzido integrando-se o fluxo por todas as longitudes ao redor de Chariklo, por exemplo, um anel de poeira com raio 20.000 km de raio será distribuído em cerca de 100 pixels, reduzindo o limite de detecção em uma ordem de grandeza, valor similar às espessuras ópticas dos anéis μ e ν de Urano.

As observações, neste caso, necessitam de grande quantidade de fluxo de luz, portanto necessitando de um filtro de banda larga. A observação na oposição, como discutido na seção 2.3.4, é um fator importante a se considerar também para este objetivo.

2.1.5 Detecção de material confinado ao redor de Chiron

É fato que há material ao redor de Chiron. Entretanto, ainda há uma grande dúvida de como este material se comporta e qual a melhor interpretação de sua natureza: a presença de anéis (ORTIZ *et al.*, 2015), jato de matéria colimado (ELLIOT *et al.*, 1995) ou uma casca de poeira (RUPRECHT *et al.*, 2015). A observação direta deste Centauro utilizando o HST pretende obter indícios de qual a melhor (ou melhores) explicação. Contudo que o material ao redor não seja simétrico rotacionalmente, o HST é um instrumento único para detectar, por exemplo, jatos radiais a mais de 2.000 km do corpo central.

Aneis seriam mal resolvidos como extensões ao redor do corpo principal e, dado o tamanho aparente de Chiron, seriam extremamente difíceis de serem detectados. Jatos, arcos de matéria ou cascas esféricas de poeira dariam origem a estruturas maiores, pois podem se expandir, e seriam facilmente detectados. A Figura 2.7 (esquerda) mostra uma simulação da geometria esperada para os possíveis anéis (de acordo com Ortiz *et al.* (ORTIZ *et al.*, 2015)). A simulação foi gerada da mesma maneira que a simulação para Chariklo na seção 2.1.1 e apresentada na Figura 2.4. A diferença da simulação de Chariklo está à direita, com a inclusão de dois jatos de matéria de mesma refletividade de Chiron, com 1% da razão I/F dos supostos anéis, correspondendo a um jato de aproximadamente 100 m de largura e com 0,1% da razão I/F, correspondendo a um jato de 10 metros de largura, ambos se estendendo até $\sim 12.000 \text{ km}$ do centro de Chiron. Com um raio de $\sim 325 \text{ km}$ e largura 10 km , o

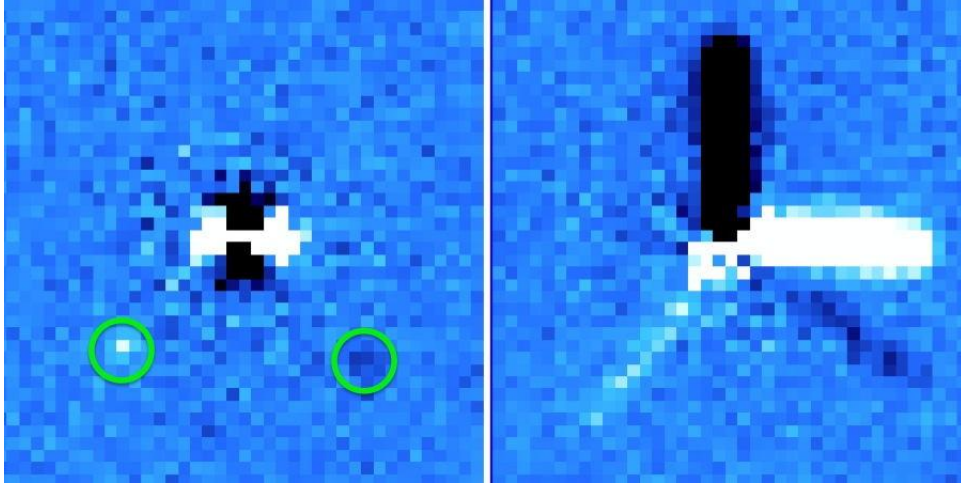


Figura 2.7: Dados de simulação mostrando, à esquerda, a detecção de um objeto com magnitude $V=27$, circulado em verde, e com a presença de um anel com 10 km de largura e I/F comparável à superfície de Chiron. Esta imagem é resultante da subtração de duas imagens rotacionadas 90° , que suprime a presença do corpo principal. As partes mais claras (ou escuras) correspondem aos excessos positivos (e negativos) da subtração da contribuição de Chiron, revelando a presença dos anéis. À direita, uma simulação incluindo Chiron com dois jatos: o mais brilhante (representados à direita e acima) possui uma largura de 100m e um valor I/F igual a 1% do suposto anel; o mais fraco, com a parte clara visível a 135° (sentido horário a partir da direita), possui uma largura de apenas 10m, próximo ao limite de detecção das observações. As imagens simuladas estão numa área de 160×160 pixels, correspondendo a uma distância de ~ 43.000 km ($3,2''$) de Chiron.

sistema de anéis teria uma área aparente que representa cerca de 50% da área de Chiron (e também 50% do fluxo, pois eles possuem albedo similares (FORNASIER *et al.*, 2013; ORTIZ *et al.*, 2015)). Detectar as alças dos anéis pode confirmar seu ângulo de posição e apoiar a interpretação dada pelos eventos secundários observados nas ocultações. A estratégia de observação é exatamente igual para detecção dos anéis de Chariklo, dada na seção 2.1.1.

A Figura 2.7 (direita) mostra a detecção de um jato radial de 10 metros de largura com a mesma refletividade dos anéis de Chariklo. É interessante notar que Ruprecht *et al.* (RUPRECHT *et al.*, 2015) reportaram um jato muito mais largo, com cerca de 10 km, que seria então facilmente detectado.

Além disso, material colisional ejetado de Chiron pode criar um disco ao redor do corpo. Fazendo a mesma análise da seção 2.1.4, com Chiron a 17,3 UA da Terra e 18,3 UA do Sol, um material com espessura óptica τ , composto por partículas de albedo p tem uma refletividade $I/F = p \cdot \tau$ e magnitude por píxel

$$V \sim 27,8 - 2,5 \cdot \log_{10}(I/F \cdot A) = 27,8 - 2,5 \cdot \log_{10}(p \cdot \tau \cdot L^2) \quad (2.4)$$

onde A é a área projetada em Chiron (em km^2) ocupada pelo material dentro de um pixel de lado L ($40 \times 40 \text{mas}$).

Tomando $L \sim 500 \text{ km}$ e $p \sim 0,17$ (ORTIZ *et al.*, 2015) e uma magnitude limite $V \sim 27$ por píxel, temos um limite de $\tau \sim 5 \cdot 10^{-5}$ por píxel, que pode ser reduzido integrando o fluxo por todas as longitudes ao redor de Chiron. Por exemplo, um anel de poeira com 20.000 km de raio será distribuído em cerca de 100 pixels, reduzindo o limite de detecção em uma ordem de grandeza. Note que cascas esféricas (rotacionalmente simétricas) ou uma coma mais próxima serão difíceis de detectar pois ao fazer a diferença entre as imagens não haverão as partes claras/escuras.

Como Chiron possui uma magnitude aparente e tamanho angular na oposição similares ao de Chariklo, as mesmas estratégias e equipamentos utilizados para Chariklo foram utilizadas para Chiron. No geral, a proposta das novas observações terá uma sensibilidade muito maior do que a obtida nas observações anteriores por Meech *et al.* (MEECH *et al.*, 1997) com o HST⁷.

2.1.6 Fotometria diferencial de Chiron

Acredita-se que o material ao redor de Chiron tenha uma certa quantidade de gelo de água, tanto de observações mais antigas (FANALE e SALVAIL, 1997; HARTMANN *et al.*, 1981; PRIALNIK *et al.*, 1995) como inferido mais recentemente a partir de estruturas espectrais (ORTIZ *et al.*, 2015). Realizando uma fotometria com três filtros diferentes e com a mesma estratégia utilizada nas observações de Chariklo (Seção 2.1.2), pode-se restringir a composição do material e, em particular, mostrar a presença de gelo de água com contaminantes no seu entorno (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014).

2.1.7 Procura de satélites ao redor de Chiron

Satélites ao redor de Chiron podem fornecer informações sobre possíveis cenários implicando em um impactor externo, por exemplo, que deixou um disco de detritos dos quais os anéis podem ter se formado. Eles podem sobreviver até a $\sim 30.000 \text{ km}$ ($\sim 2 \text{ arcsec}$) do corpo principal, o que corresponde a $\sim 30\%$ da esfera de Hill de Chiron. Considerando Chiron a $17,3 \text{ UA}$ em sua oposição em 2016, um satélite com raio R_{sat} (km) e albedo geométrico p_{sat} , terá magnitude $V \sim 26,6 - 2,5 \cdot \log_{10}(p_{sat} \cdot R_{sat}^2)$. Tomando a magnitude limite $V \sim 28$ e assumindo um albedo similar ao de Chiron, é possível detectar um satélite com apenas alguns quilômetros de raio utilizando o filtro de banda larga. O movimento do satélite pode ser verificado realizando-se observações espaçadas temporalmente. Um satélite com um raio orbital r_{km} tem um período $T \sim 10^{-4} \cdot r_{km}^{1,5}$ dias. Então, para a massa estimada de Chiron (10^{19}

⁷Estas observações serão discutidas com mais detalhes na seção 2.3.7

kg, correspondente a um corpo de gelo com raio = 110 km, similar à de Chariklo), T pode ser no máximo 1,4 anos. Logo, em uma semana, o satélite terá se movido ~ 2.600 km, correspondendo, ao menos, ~ 5 pixels.

O plano de fundo de Chiron não é tão ocupado de estrelas como o de Chariklo, entretanto as mesmas estratégias e restrições (ver seção 2.1.3) foram utilizadas nas observações.

2.1.8 Observação da coma e procura de outras estruturas ao redor de Chiron

Além da observação nos arredores próximos de Chiron, à procura da existência do anel, jatos e satélites, a observação com o HST tem como objetivo procurar por outras estruturas mais distantes e fracas ao redor de Chiron como anéis de poeira mais dispersos ou pouco brilhantes. Como discutido para Chariklo na seção 2.1.4, um bombardeio por micrometeoroides nos satélites ou mesmo em Chiron pode criar e sustentar anéis tênues ao redor do Centauro. Espera-se detectar esse tipo de material com espessuras óticas que podem chegar até $\tau \sim 10^{-6}$, para uma magnitude limite de $V \sim 27$ por pixel.

As observações, também neste caso de Chiron, necessitam de grande quantidade de fluxo de luz, portanto necessitando de um filtro de banda larga. A observação na oposição, como discutido na seção 2.3.4, é um fator importante a se considerar também para este objetivo.

2.2 Equipamentos utilizados

O telescópio Hubble foi lançado em órbita em 1990 e continua em operação até hoje. Seu funcionamento será estendido, pelo menos, até o lançamento (previsto para 2018) e funcionamento de seu substituto, o telescópio espacial James Webb (JWST). Além de um espelho de 2,4m de diâmetro e distância focal de 57,6m, ele conta com uma série de instrumentos a bordo, entre eles estão as câmeras e espectrógrafos mais utilizados como ACS (Advanced Camera for Surveys), STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph), COS (Cosmic Origins Spectrograph), Fine Guidance Sensor (FGS) e WFC3 (Wide Field Camera 3). Acoplada à WFC3 ainda estão duas câmeras com sensibilidades para o Infravermelho (IR) ou Ultravioleta e visível (UVIS). Alguns dos instrumentos mais antigos já sofrem severamente devido ao ambiente com alta radiação. Estes efeitos de exposição à radiação são inevitáveis, independente se o instrumento está em uso ou não. Exatamente por isso, a equipe do HST desenvolveu algumas rotinas para diminuir estes efeitos.

Baseado no comprimento de onda, campo de visão (FOV), resolução espacial,

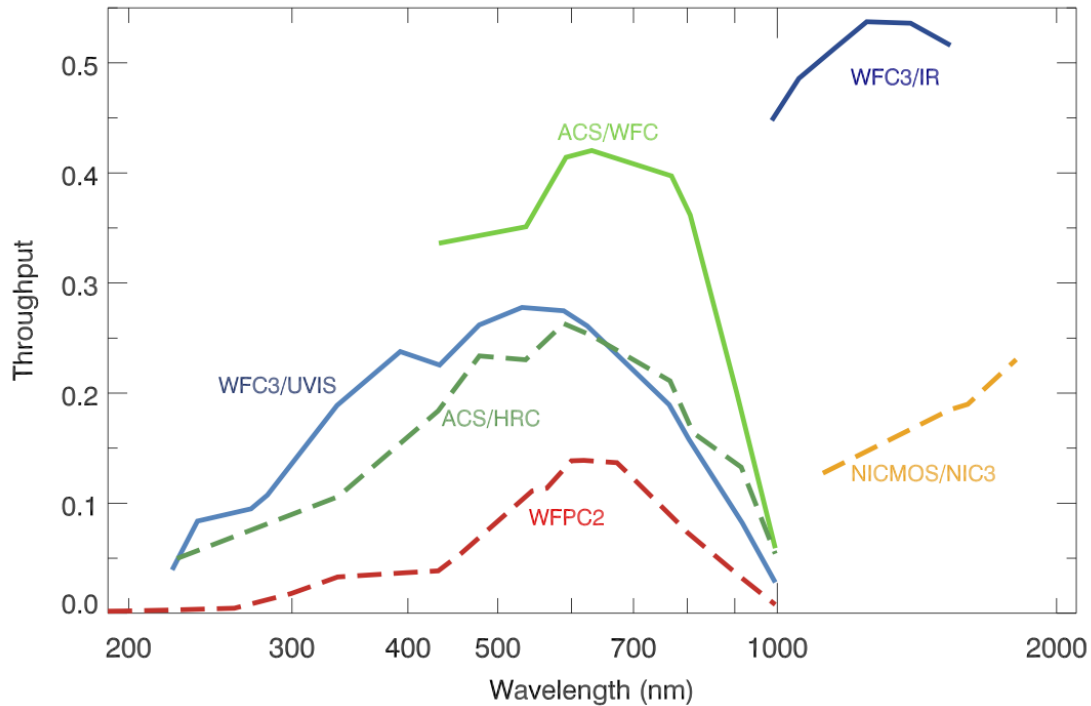


Figura 2.8: Eficiência de algumas câmeras a bordo do HST. A câmera escolhida para as observações dos centauros foi a WFC3/UVIS, representada pela linha azul, por ter diversas vantagens em comparação aos outros equipamentos. No eixo x tem-se o comprimento de onda em nm na escala logarítmica; no eixo y a eficiência do detector. Fonte: STScI/HST (STSCI, 2016a).

sensibilidade e disponibilidade do instrumento, foi escolhido para o imageamento dos centauros a câmera WFC3/UVIS, por ter pixels cerca de 20% menores, 25% menos ruído de leitura, pequenas correções de transferência de carga do CCD (CTE) e menor corrente de escuro (*dark current*), além de sua eficiência ser centrada em 400 - 700 nm, mas atingindo até 200 nm no azul e 1000 nm no vermelho, como mostra a Figura 2.8. Além disso, a WFC3 foi instalada em maio de 2009, sendo um dos instrumentos mais novos a bordo do HST. Algumas especificações técnicas da Câmera WFC3/UVIS encontram-se na Tabela 2.3.

Nas próximas seções são apresentados mais detalhes técnicos da câmera e dos filtros utilizados.

Tabela 2.3: Algumas especificações técnicas da câmera WFC3/UVIS.

	WFC3/UVIS
FOV (” x ”) (arcsec ²)	162 x 162 26.183
Escala de placa (mas)	40
Número de pixels	4k x 4k
Ruído eletrônico (e^-)	3,1
Corrente de Escuro (e^- /pixel/h)	7
Número de filtros	63

2.2.1 Características e Performance da câmera WFC3/UVIS

A câmera WFC3/UVIS é composta por dois CCDs de 4096×2051 pixels colocados juntos com uma separação de ~ 31 pixel (1.2 arcsec), formando uma matriz de 4096×4102 pixels. Além disso, sub-matrizes (subarrays) podem ser utilizadas para ler e guardar apenas uma parte do campo de visão inteiro. Com isso, o tempo morto para descarregar o CCD e armazenar os dados é menor. Considerando os objetivos das observações dos centauros, a região de interesse (ROI) é pequena (~ 7 arcsec) e por isso foi utilizado a abertura UVIS2-C512C-SUB (Figura 2.9) para permitir mais imagens por visita. É importante salientar que existe no meio desta sub-matriz uma coluna com pixels mortos. Por isso, é preciso realizar um pequeno offset no apontamento, para que o alvo não caia no centro e acabe afetado por esta coluna defeituosa.

Algumas características da câmera devem ser consideradas, embora as imagens disponibilizadas (pós observações) já venham corrigidas e calibradas (ver seção 2.4.1). Aqui são apresentados alguns destes efeitos mais relevantes que influenciaram na realização do pedido de tempo ou para atingir os objetivos da observação.

2.2.1.1 Eficiência Quântica

A Eficiência Quântica (EQ) é definida pela quantidade de elétrons gerados por fóton incidente. A Figura 2.10 apresenta a EQ da câmera UVIS para comprimentos de onda do UV (~ 200 nm) ao IR (~ 1000 nm).

Por ser uma câmera mais nova, com alta eficiência para toda a faixa do visível (incluindo partes do UV e IR), esta câmera mostrou-se ideal para realizar as observações.

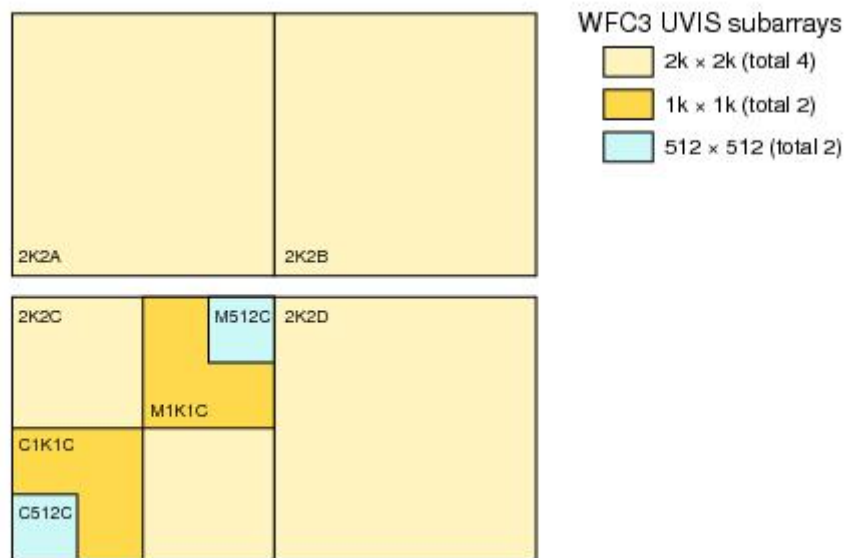


Figura 2.9: Divisão da matriz do CCD a bordo do HST. O CCD inferior pode ser dividido em partes menores, diminuindo o tempo morto para descarregar o CCD e salvar os dados e, com isso, aumentando o número de imagens (ou tempo de integração) possíveis para cada visita. Os nomes dos *subarrays* são dados nos quadrados que os representam em diferentes cores. Quatro dos *subarrays* são maiores e possuem 2k x 2k píxeis. Outros dois *subarrays* possuem 1k x 1k e os dois menores 512 x 512 píxeis. O *subarrays* utilizado nas observações foi o inferior esquerdo nomeado 'C512C'. Fonte: STScI/HST (STSCI, 2016a).

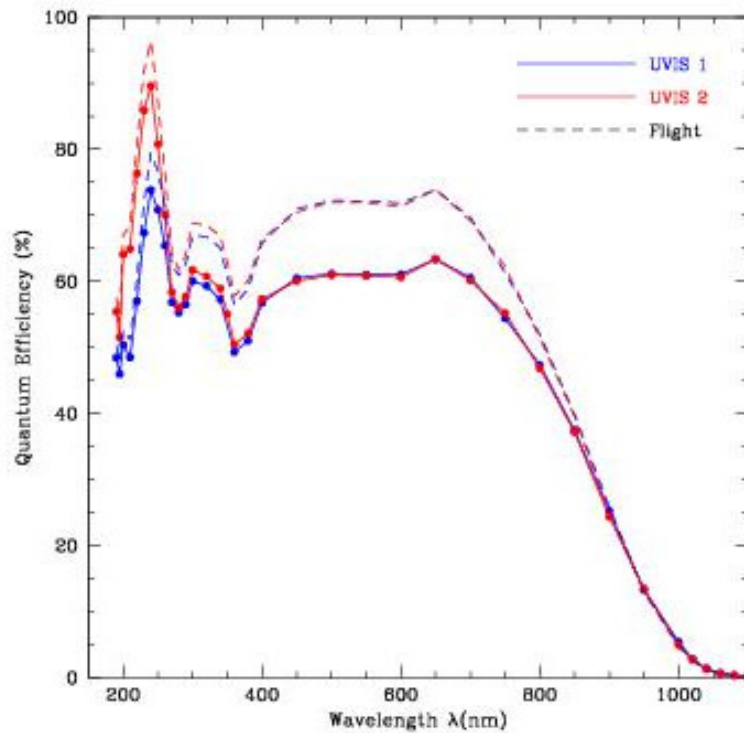


Figura 2.10: Eficiência Quântica (EQ) da câmera UVIS. A UVIS2 substituiu a UVIS1 na manutenção do HST em 2009. As linhas cheias ilustram as EQs medidas em laboratório (Detector Characterization Laboratory (DCL) localizado no Goddard Space Flight Center). As medidas foram tomadas com os detectores na perpendicular ao eixo incidente mas uma perda de, no máximo, $\sim 6\%$ pode ser considerada já que o CCD está deslocado no HST cerca de 21° com respeito à Normal. Fonte: STScI/HST (STSCI, 2016a).

2.2.1.2 Eventos de Múltiplos-Elétrons em baixos comprimentos de onda

No silício, fótons com energia maiores que 3.65 eV (isto é, comprimentos de onda menores que ~ 340 nm) podem produzir múltiplos pares elétron-lacuna quando elétrons energéticos na banda de condução colidem com outros da banda de valência, isto é, os elétrons incidentes podem extrair diretamente mais de um elétron da banda de valência. Este efeito (chamado ‘quantum yield’) deve ser levado em consideração ao estimar o ruído para observações em baixos comprimentos de onda, como realizado para um dos filtros selecionados (a fim de observar a banda de água nos anéis). Teoricamente, a correção é aproximadamente $1,7 e^-/\text{fóton}$ a 200 nm, diminuindo linearmente até 340 nm. Medidas de solo, entretanto, mostram que esse efeito é menor: $1,07 e^-/\text{fóton}$ para 218 nm e $1,03$ para 275 nm. Como a causa disso é incerta e o efeito é pequeno, este efeito não deve ser considerado no cálculo de tempo de exposição. Entretanto, é importante saber da existência e uma possível interferência para fontes observadas com alta magnitude.

2.2.1.3 Franjas, Flat-Fields e Linearidade

Reflexões múltiplas em diferentes camadas do CCD podem dar origem às chamadas franjas, onde a amplitude é uma função da largura da camada de silício e a distribuição espectral da fonte de luz. Como muitos CCDs, a WFC3/UVIS exhibe franjas tipicamente para comprimentos de onda acima de 700 nm. O padrão das franjas aparenta ser bastante estável, desde que o comprimento de onda da luz incidente em uma parte particular do CCD seja constante. Com isso, as franjas são facilmente corrigidas com as imagens Flat-Field.

Antes do lançamento, foram preparados Flat-Fields com os filtros da câmera UVIS com uma razão Sinal/Ruído (S/R) ~ 200 por píxel. Entretanto, os padrões de iluminação de solo não são compatíveis com a iluminação de órbita. Esses erros foram medidos e corrigidos ao realizar fotometria de campos estelares ricos com padrões de *dither* de larga escala.

Quanto à linearidade, a câmera UVIS2 apresenta uma diferença de apenas $\sim 1\%$ para grandes distâncias, consistente com a eficiência de transferência de carga (CTE), isto é, não apresenta problemas de linearidade. As imagens fornecidas (pós observação) já são corrigidas dos efeitos acima.

2.2.1.4 Pixeis Ruins

Existem dois tipos de pixeis ruins: os pixeis ‘quente’ (ou ‘*hot*’, com corrente de escuro maior que o normal) e pixeis ‘mortos’ (ou ‘*dead*’, com eficiência quântica extremamente baixa). Em órbita, o número de pixeis quente aumenta com o tempo devido ao dano da radiação, embora seja periodicamente reduzido por um processo

chamado ‘*annealing*’, quando o detector UVIS é aquecido a ~ 20 °C. Então, deve-se ter cuidado para que o tempo de exposição não seja suficientemente longo e ocasione em um aumento de píxeis quente na imagem, principalmente quando se utiliza filtros de banda larga.

A população de píxeis mortos, geralmente localizado ao longo das colunas, é relativamente constante e é facilmente indentificável. Na parte do CCD utilizada (UVIS2-C512C-SUB) há uma coluna aproximadamente no centro com píxeis mortos. Para evitá-los, foi pedido para que o alvo (um dos centauros) não ficasse exatamente no centro do CCD, mas deslocado alguns píxeis para o canto.

2.2.1.5 Raios Cósmicos

Raios cósmicos ocorrem de forma aleatória e podem atingir qualquer parte do CCD em todos os ângulos. Entretanto, a fração de píxeis atingidos por raios cósmicos varia entre 5% e 9% para uma exposição de 1800s. Desta forma, entre 4-5 imagens serão necessárias para assegurar que menos de 100 píxeis sejam atingidos em todas as imagens de uma série. Como o tempo de exposição proposto para as observações é pequeno (seção 2.4), a probabilidade de um raio cósmico atingir e afetar as imagens é menor que 0,5%. Porém, como é um efeito aleatório, para evitar ‘surpresas desagradáveis’, um mínimo de duas imagens similares para configuração instrumental foi proposto.

2.2.1.6 Thermal Breathing

Como o HST está em uma órbita baixa, ele sofre com variações de temperatura, que afeta o foco dos instrumentos a bordo do satélite devido às contrações e dilatações durante o período orbital. Este efeito é conhecido como *Thermal Breathing* (ou *focus breathing*, ou ainda *HST breathing*). Variações na PSF da câmera WFC3/UVIS devido à este efeito, para uma única órbita, podem chegar a até 8% para comprimentos de onda de 200 nm, 3% para 400 nm e 0.3% para 800 nm.

Apesar de ser um efeito pequeno para a resolução da câmera, para contornar este problema, o mesmo modelo de correção de foco utilizado nas observações dos satélites de Plutão foi utilizado⁸. Neste modelo são considerados variações do foco devido à mudança de temperatura e de atitude do satélite, posição do Sol e orientação do HST.

⁸Em comunicação privada com o colaborador Marc Buie, responsável também pelas observações dos satélites de Plutão nos últimos 15 anos.

2.2.1.7 Drizzle

As imagens na câmara WFC3 são afetadas por uma distorção geométrica causada devido à uma pequena inclinação da câmara (o que afeta a superfície da imagem) com respeito ao raio principal. O efeito é ainda agravado por termos não lineares que produzem mudanças ao longo do campo de visão, tanto na escala de placa quanto na área subtendida pelos pixels.

As correções pelo processo chamado *drizzling* remove estas distorções geométricas e deixa o céu plano. Este processo está incluso no pipeline de redução e calibração (ver seção 2.4.1). Com esta correção pelo pipeline, imagens para fotometria tomadas com a câmara WFC3/UVIS são corrigidas.

2.2.2 Filtros

Como apresentado na Tabela 2.3, um conjunto de 63 filtros está disponível para a câmara WFC3/UVIS. Entre eles estão filtros estreitos e de banda larga. Os três filtros escolhidos para as observações denominam-se F300X (ocupando a região entre ~ 220 e ~ 350 nm), F475X (ocupando a região entre ~ 380 e ~ 650 nm) e F350LP (ocupando a região entre ~ 300 nm e ~ 1000 nm), como mostra a Fig. 2.11.

O uso do filtro F475X é utilizado para detectar os anéis no visível, complementando as imagens na região do UV com o filtro F300X. Em particular, o uso dos filtros F300X e F475X é para confirmar, através de uma fotometria diferencial, a presença de gelo de água com contaminantes (como partículas de carbono), indiretamente inferida do espectro de Chariklo (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014; GUILBERT *et al.*, 2009; GUILBERT-LEPOUTRE, 2011), a qual apresenta uma inclinação acentuada abaixo dos 550 nm. Basicamente, observando a diferença de brilho nos dois filtros, é possível verificar se há uma inclinação na curva entre 0,3 e 0,6 microns e, desta forma, indiretamente inferir a composição dos anéis (observadas por (DUFFARD *et al.*, 2014)) e restringir sua composição, assim como foi feito nos anéis de Saturno (HEDMAN *et al.*, 2013).

O filtro de Banda larga F350LP foi escolhido para a procura de satélites e outros materiais no entorno dos centauros. Com a grande quantidade de fluxo de luz possível de ser obtida com este filtro, será possível atingir limites a magnitudes até $V \sim 28$ para detecção de material. A Figura 2.11 apresenta a eficiência de transmissividade de alguns filtros em função do comprimento de onda.

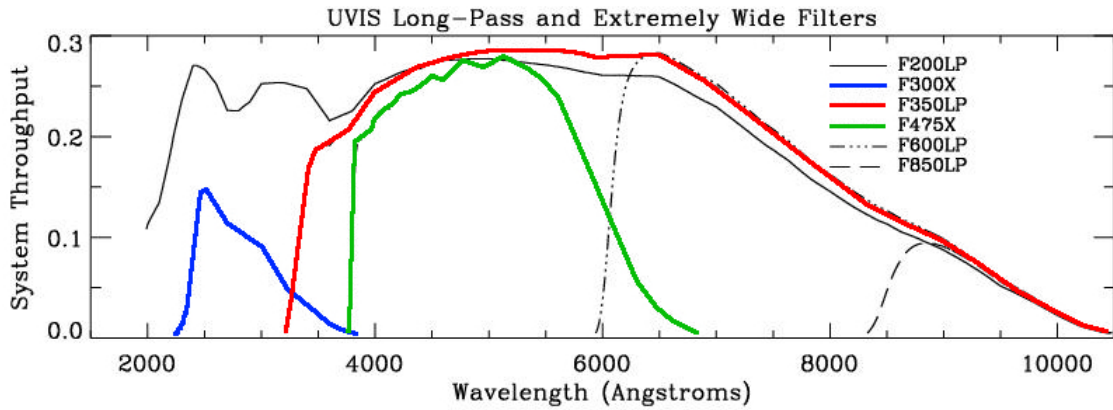


Figura 2.11: Alguns dos filtros a bordo do HST e sua eficiência de transmissividade em função do comprimento de onda. As linhas em cores (vermelho, azul e verde) representam os três filtros escolhidos (F300X, F475X e F350LP) para as observações dos Centauros. Fonte: STScI/HST (STSCI, 2016a).

2.3 Restrições

Para realizar observações com o HST, uma série de procedimentos deve ser previamente preparada e verificada. Após determinar o tipo de pedido de tempo e realizar a escolha do equipamento, deve-se verificar algumas restrições orbitais, de apontamento, de objetos brilhantes ou ainda outras restrições especiais. O HST está em uma órbita baixa, isto é, abaixo de 600km da superfície, impondo uma série de restrições em suas observações.

2.3.1 Zona Contínua de Observação

Do ponto de vista do telescópio, muitos alvos são ocultados pela Terra por diferentes períodos durante sua órbita de ~ 96 minutos. Alvos que estão em seu plano orbital, por exemplo, chegam a ficar 44 minutos ocultados por órbita. Na prática, este tempo é ainda maior, considerando que é necessário evitar o limbo terrestre, o tempo para obter uma estrela de guiagem, além do próprio movimento para apontamento do telescópio. A duração da ocultação diminui conforme se afasta do plano orbital do satélite. Alvos a 24° dos polos orbitais não são geometricamente ocultados em nenhum período da órbita. Este tempo de ‘não ocultação’ é chamado de Zona Contínua de Observação (CVZ). Como a inclinação orbital do HST é de $28,5^\circ$, qualquer alvo com declinação próxima de $61,5^\circ$ estará na CVZ em algum tempo durante seu período de 56 dias de precessão, mas serão inobserváveis na época do ano que o Sol está próximo desta região.

2.3.2 Anomalia do Atlântico Sul

A Anomalia do Atlântico Sul, uma extensão do cinturão de radiação de Van Allen, localiza-se na América do Sul e numa parte ao sul do Oceano Atlântico. Quando o HST passa por esta área, nenhuma imagem de calibração ou de observação é possível de ser obtida devido à grade interferência eletro-magnética nos aparelhos a bordo do satélite. Como a órbita do HST precessa e a Terra gira, durante 7 a 9 dias seguidos do seu período de precessão, o HST passa por esta região. Durante essas passagens, as observações do HST são interrompidas por ~ 30 minutos.

Esta é uma restrição que é apenas contornada pela equipe de controle do telescópio e afeta observações que necessitam longos períodos de observação. No caso da observação dos centauros, somente 3 órbitas são necessárias, podendo ser encaixadas em qualquer período fora desta região.

2.3.3 Predição da posição do HST

O arrasto atmosférico é um fator importante para o HST devido à sua órbita baixa. Além disso, o arrasto varia de acordo com a orientação do telescópio e a densidade da atmosfera. Consequentemente, é difícil prever onde o HST estará em um dado tempo. Para se ter uma ideia, a posição prevista dois dias antes de um período tem um erro de posição de ~ 33 km e aumenta para ~ 4.000 km para 45 dias antes. Esta restrição afeta observações que necessitam ter uma precisão temporal grande ou para objetos próximos da Terra, que não é o caso das observações dos centauros.

2.3.4 Apontamento e manobras

HST usa um sistema elétrico para realizar todos os giros necessários na aquisição da estrela de guiagem e controle de apontamento. Um conjunto separado de giroscópios fornece informações de atitude para o sistema de controle de apontamento (Pointing Control System, PCS). A taxa de variação de giro do HST é então limitado a cerca de 6° por minuto [de tempo]. Consequentemente, cerca de uma hora é necessário para realizar uma volta completa. Como resultado, grandes manobras são geralmente agendadas durante uma ocultação da Terra ou durante a travessia da Anomalia do Atlântico Sul (ver seção 2.3.2). Além disso, devido às ocultações pela Terra, o HST necessita realizar um novo apontamento para cada órbita. O primeiro apontamento de uma visita leva cerca de 13 minutos, sendo 6 para aquisição de estrela guia e outros 7 para atualizações de atitude do satélite. Em órbitas subsequentes observando um mesmo alvo, o tempo diminui em cerca de 2 minutos. Somado a isso, ainda há uma manobra que o HST deve realizar (ao aplicar um

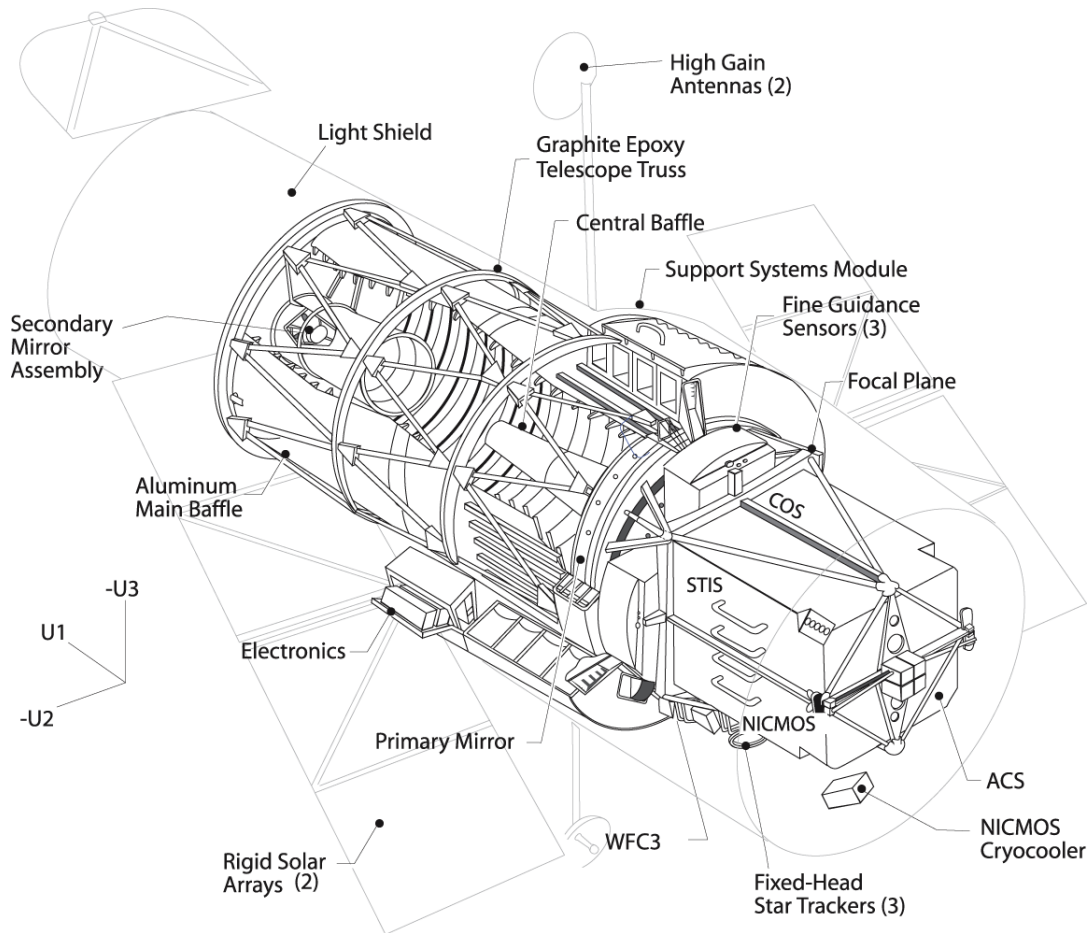


Figura 2.12: Configuração do HST. As posições dos eixos U1, U2 e U3 estão indicadas. A direção de observação é definida pelo eixo U1. O *ORIENT* é o ângulo entre a direção U3 e o Norte. Fonte: HST Primer (STSCI, 2016c)

dither, por exemplo) para ângulos pequenos. Para cada movimento de $0''$ até $1,25''$, cerca de 20 segundos são perdidos, tempo que deve ser considerado na estratégia de observação.

Uma outra manobra que deve ser levado em consideração é a posição do eixo U3, o chamado *ORIENT*. A Figura 2.12 apresenta a configuração do HST com as orientações dos eixos. Definido como o ângulo de posição entre o eixo U3 e o Norte (ficando positivo para Leste), o *ORIENT* tem algumas restrições de rotação devido à posição dos painéis solares.

Em princípio, o HST pode girar ao redor do eixo ótico U1. Entretanto, esta rotação é limitada pela necessidade de manter a luz solar iluminando os painéis (indicados por *Rigid Solar Arrays* na Figura 2.12) e por um design térmico que assume que o Sol sempre ilumina o mesmo lado do telescópio (direção -U1). Para um alvo específico, a orientação que otimiza o posicionamento do telescópio com respeito ao Sol ocorre

em sua oposição. Devido à necessidade de obter imagens rotacionadas 90° a cada visita, a observação do objeto próximo à sua oposição torna-se crucial para se ter mais liberdade no *ORIENT*.

2.3.5 Objetos brilhantes

O sistema de descarga do CCD da WFC3/UVIS é feito de tal maneira que uma exposição com saturação não deixa sinais nas imagens seguintes. Entretanto, como Chariklo está numa posição com um campo muito denso de estrelas de fundo, uma saturação pode prejudicar os dados adquiridos. Por este motivo foi realizado uma busca por instantes de tempo que Chariklo estava, como discutido na seção 2.1.3, distante de:

1. qualquer estrela mais brilhante que mag. 13 a menos de $50''$ (para um observador no geocentro);
2. qualquer estrela com magnitudes entre 13 e 19 a menos de $6''$ (para um observador no geocentro).

2.3.6 Alvos do Sistema Solar

A observação de alvos do Sistema Solar é possível com o HST desde que o ângulo alvo-HST-Sol seja maior que 50° . Mercúrio, por exemplo está sempre bem abaixo deste limite e, por isso, não pode ser observado. Uma outra restrição é a de objetos muito próximos, como a Lua. Ambos Chariklo e Chiron deverão estar próximos de suas oposições na época das observações e são distantes suficiente para que o HST consiga fazer o acompanhamento, não havendo impedimentos do HST.

2.3.7 Duplicidade

Além das restrições físicas, mecânicas ou posicionamento dadas nas seções anteriores, é necessário realizar uma verificação de duplicidade de observações. Isto evita que o HST realize observações 'repetidas' por investigadores diferentes. Para Chariklo não foram encontradas observações anteriores, porém Chiron foi observado com o HST outras 4 vezes. Entretanto, duas delas foram observações espectroscópicas, não sendo relevantes para os objetivos propostos; uma foi observação da coma, indicando uma estrutura de poeira a ~ 1800 km ($0,3''$) mas não restringindo a presença de outras estruturas ou satélites mais fracas (MEECH *et al.*, 1997); a outra observação, realizada com um equipamento diferente (FOC/96), apenas mostra o comportamento fotométrico de Chiron. Portanto, as observações anteriores são bastante diferentes das nossas observações propostas e não atingem os limites de detecção de estruturas mais fracas que se pretende obter.

Tabela 2.4: Sequência de imagens distribuídos por filtro para uma visita^a individual utilizando a WFC3/UVIS.

Filtro	N. de Imagens x T Exposição (s)	S/R esperado
F475X	2 x 7	50
F300X	2 x 200	50
F350LP	9 ^b x 170 = 1530	1,4 (Vmag=28) e 3,5 (Vmag=27) ^c

^a A órbita 2 deve ser girada 90° com relação à órbita 1; a órbita 3 deve ser girada 180° com relação à órbita 1. ^b O número de exposições e o tempo de exposição foi ajustado nas órbitas de Chiron para encaixar na janela de visibilidade do HST, ficando com 8 imagens de 160 segundos. ^c Observações com ~90% de saturação do corpo principal.

2.4 Observações

Após verificar todas as restrições (Seção 2.3), foram obtidas 6 órbitas de ~54 minutos para observação, sendo 3 para cada um dos centauros. Cada uma das órbitas foi proposta para ser observada com uma orientação diferente entre si. Dada uma época para a observação, pode-se obter a orientação dos anéis (de Chariklo a partir da posição dada por Braga-Ribas et al. (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014); de Chiron a partir da posição estimada por Ortiz et al. (ORTIZ *et al.*, 2015)) e, idealmente, a primeira visita seria feita alinhando-se a direção do eixo maior da elipse aparente com a coluna de pixels do CCD. Uma variação desta orientação distribui os fótons nos pixels adjacentes e, como os centauros ocupam uma área menor que 3x3 pixels (Figura 2.1) e a posição aparente dos anéis não é muito elíptica, pode dificultar a obtenção da orientação dos anéis a partir do imageamento direto.

As visitas seguintes seriam rotacionadas 90 e 180 graus, respectivamente. Com a subtração das imagens de visitas consecutivas, espera-se obter as estruturas como nas simulações apresentadas nas Figuras 2.4 e 2.7. Os 54 minutos de cada uma das visitas foram divididos por um número determinado de exposições para cada filtro, como mostra a Tabela 2.4. O tempo de exposição para cada filtro foi calculado a fim de atingir uma razão Sinal/Ruído igual a 50 por exposição para os filtros de banda estreita ou até atingir 90% de saturação no corpo central. Para isso, foi utilizado uma calculadora (STSCI, 2016b), na qual deve-se inserir diversos parâmetros escolhidos de acordo com os objetivos das observações. Para os casos de Chariklo e Chiron, escolheu-se: um espectro similar ao do Sol (Kurucz G2V); luz zodiacal e brilho da Terra padrões.

Entre cada uma das exposições foi realizado um *dither* de meio pixel (20 mas). Com este procedimento, cada pixel do CCD gera 4 pixels virtuais e, consequente-

mente, evita-se pixels quentes, manchas ou deformidades no CCD, além de suavizar a PSF e aumentar a acurácia fotométrica. Além do *dither*, um pequeno deslocamento (*offset* ou o chamado *POSTARG*) de aproximadamente 75 colunas de píxel (~ 3 arcsec) foi aplicado. Com isso, ao realizar o apontamento, o HST deixa o alvo sempre caindo no mesmo píxel, mas não o deixa no centro do CCD, evitando uma coluna com pixels mortos existente nesta região.

2.4.1 Redução dos dados e calibração

Os dados do HST, logo após a aquisição, passam por uma série de processos (*pipeline*) de calibração. Especificamente, os dados da câmera WFC3 passam pelo pipeline chamado STScI OPUS, onde os dados são descarregados do satélite, passam por uma verificação dos valores de telemetria e os dados de ciência são formatados e convertidos em arquivos FITS não calibrados. Essa conversão para FITS é realizada por um processo genérico.

As imagens de ciência WFC3/UFIS são armazenadas em um arquivo FITS como uma matriz de três valores (*triplets*) que consistem em ‘ciência’ (SCI), ‘erro’ (ERR) e ‘qualidade de dados’ (DQ) (STScI, 2015). Normalmente, para cada um dos CCDs da WFC3 é gerado um triplet no arquivo FITS entretanto, como foi utilizado um subframe (C515C - seção 2.2.1), um único triplet foi gerado por exposição.

Em seguida, as imagens FITS não calibradas são processadas por um software (*calwf3*) que calibra os dados para exposições individuais, produzindo as imagens FITS calibradas que são, em seguida, processadas pelo software ‘*STScI AstroDrizzle*’ para remover distorções geométricas e combinar exposições associadas. Os passos do *pipeline* de redução são:

- Identificação de *bad pixel* - ‘*bad pixel flagging*’
- Subtração de nível de Bias
- Subtração de Bias da imagem
- Subtração de corrente de escuro
- Correção de não linearidade (Drizzle)
- Correção de Flat-Field
- Calibração de ganho
- Correção de sombra do obturador
- Combinação de imagens com dither

Tabela 2.5: Data das observações dos centauros com o HST.

Objeto	Visita	Tempo Inicial (UTC)	Tempo Final (UTC)
Chariklo (Ciclo 22)	1	7/6/2015 01:55:01	7/6/2015 02:51:16
	2	17/6/2015 23:18:21	18/6/2015 00:59:32
	3	13/8/2015 19:54:11	13/8/2015 20:50:26
Chiron (Ciclo 23)	1	Em implementação. Previsto entre 24/7 e 2/8/2016	
	2	14/9/2015 12:30:13	14/9/2015 13:25:08
	3	6/11/2015 08:10:00	6/11/2015 09:05:43

A subtração de ‘nível de Bias’ é feita utilizando regiões de ‘overscan’ que existe na WFC3/UVIS, usadas para medir o nível de Bias geral de cada exposição do CCD. A subtração de ‘Bias da imagem’ é realizada para remover variações espaciais do nível de Bias. A correção de sombra do obturador só é necessária (e aplicada) para tempos de exposição muito curtos.

No final são fornecidas pelo STScI os dados da telemetria, as imagens calibradas individuais (não combinadas com dither) e as imagens calibradas (com combinação do dither). Note que todos os efeitos possíveis de afetar as imagens já foram discutidos na seção 2.2

2.5 Resultados preliminares

As visitas de Chariklo, aceitas para o Ciclo 22 (2014-2015), já foram realizadas. Para Chiron, as visitas foram aceitas para o Ciclo 23 (2015-2016), sendo que duas visitas já ocorreram mas a terceira será somente em 2016. A Tabela 2.5 apresenta as datas das observações.

As imagens de Chiron ainda não foram analisadas. Para Chariklo, até o momento, somente foram analisadas as imagens obtidas com o filtro de banda larga (F350LP). A Figura 2.13 apresenta uma das imagens obtidas com cada um dos filtros selecionados, já calibradas. Para cada visita, as 9 imagens tomadas em sequência com o filtro de banda larga (F350LP) foram centradas em Chariklo e combinadas para aumentar o sinal do alvo e remover as estrelas de fundo. A centragem foi feita através de um processo de sobreamostragem, diminuindo virtualmente o tamanho dos pixels para 10x10 mas para a determinação do centroide. Em seguida, os centroides das imagens foram alinhados e combinadas. Com isso, para cada visita, obteve-se uma imagem que representa uma aquisição de 25,4 minutos de tempo de exposição. As imagens resultantes deste processo para as visitas 1 e 2 (que são giradas 90° entre si) são apresentadas na Figura 2.14 (a visita 3 é visualmente similar à visita 1, dado que possui uma rotação de 180°).

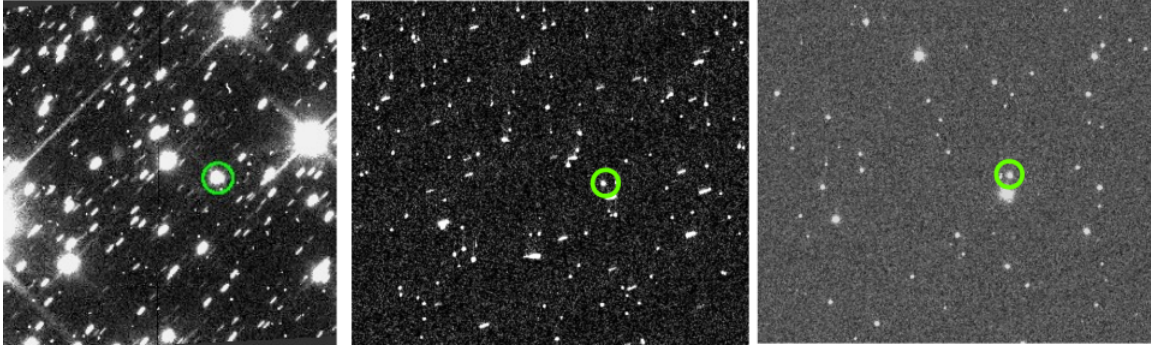


Figura 2.13: Uma das imagens individuais obtida com cada um dos filtros selecionados para as observações no dia 6 de junho de 2015. Chariklo está circulado em verde. As estrelas mais brilhantes no campo possuem magnitudes maiores que 15. À esquerda a imagem obtida com o filtro de banda larga F450LP, com 170 segundos de exposição; no centro a imagem com o filtro F300X (UV) com 200 segundos de exposição; à direita a imagem com o filtro F400X (Visível) com 7 segundos de exposição.

Para verificar a existência dos anéis e confirmar seu ângulo de posição, foi realizado a subtração entre as imagens da Visita 1 e da Visita 2. Um fator ótimo foi determinado integrando o fluxo da Visita 1 e da Visita 2 e ajustando para que o fluxo no centro da imagem ‘Visita 1 - Visita 2’ fosse o mais próximo de zero. Entretanto, na subtração das Visitas 1 e 2, giradas 90° entre si, o resultado não foi como esperado, como mostra a Figura 2.15. As estruturas que supostamente deveriam aparecer (como na simulação apresentada na Figura 2.4) não são evidentes e as imagens mostram estruturas que são incompatíveis com os anéis.

Devido ao resultado inesperado, as diferenças entre as visitas 2 e 3 e também entre as visitas 1 e 3 foram analisadas. Da mesma maneira, um fator ótimo foi determinado para compensar as diferenças de brilho entre as visitas. Estas subtrações mostram a presença de estruturas que podem ser devido à efeitos da centragem não ideal, do fator ótimo determinado entre as visitas para realizar a subtração de Chariklo ou causadas por alguma estrutura real, tal como uma coma. Independente da causa, tanto efeitos da centragem quanto da determinação do fator ótimo não seriam suficientes para apresentarem estruturas que estão com um nível de sinal muito acima do nível de ruído como os valores obtidos. A Figura 2.16 apresenta as imagens com as diferenças entre as visitas.

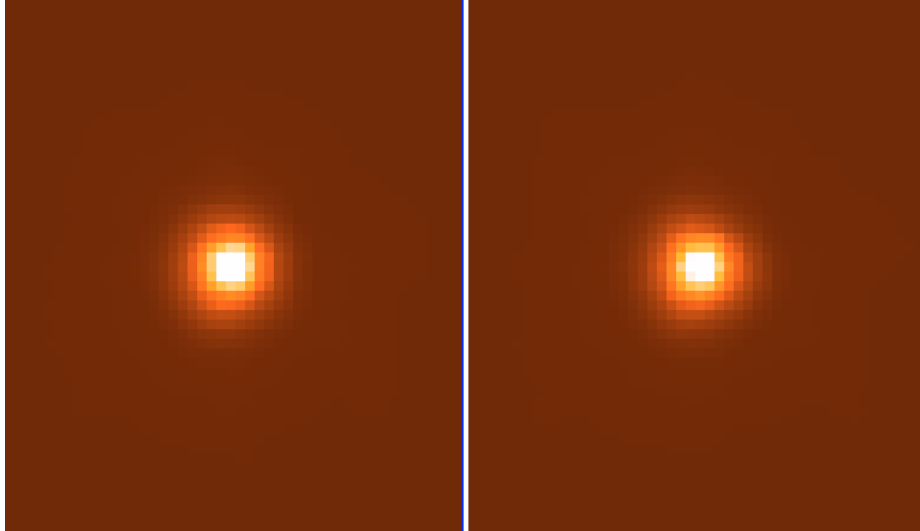


Figura 2.14: Imagens de Chariklo das visitas 1 (esquerda) e 2 (direita) obtidas com o filtro F350LP. As 9 imagens de cada visita foram centradas em Chariklo (através de um processo de sobreamostragem, diminuindo virtualmente o tamanho dos pixels para 10x10 mas), combinadas e ampliadas na região de interesse ao redor do objeto. Cada uma das imagens resultantes representa uma imagem com 25,4 minutos de integração. O tamanho dos pixels nestas imagens são de 10x10 mas, resultado do efeito do *dither* e da sobreamostragem. As duas visitas possuem uma rotação de 90° entre si. Note que visualmente não há muita diferença entre as imagens. A Visita 3 é anti-simétrica à Visita 1, estando rotacionadas 180° entre si.

Um outro resultado obtido é a não detecção de satélites com mag V $\sim 26,1$ a uma distância de aproximadamente 6.400 km (~ 15 vezes o tamanho dos anéis) e nenhum satélite com mag V ~ 27 mais distantes. Estas magnitudes representam corpos de cerca de 6 a 4 km de diâmetro, respectivamente, assumindo $p = 0,1$. Um satélite com estas características seria facilmente detectado, como apresentado na Figura 2.17.

2.5.1 Observações com SPHERE

Para confrontar os dados do HST, observações com o equipamento SPHERE foram realizadas. Instalado no VLT (Very Large Telescope) no Chile, o SPHERE é um equipamento com um sistema de óptica adaptativa extrema e coronografia para imageamento, espectroscopia de baixa resolução e caracterização polarimétrica de sistemas planetários para comprimentos de onda no óptico e infravermelho.

Um pedido de tempo foi realizado pelo Dr. Bruno Sicardy em colaboração com Dra. Maud Langlois (cientista responsável pelo instrumento IRDIS - *InfraRed Differential Imager and Spectrograph* - no SPHERE) além de pesquisadores do Observatoire de Paris e do Observatório Nacional. As observações foram realizadas utili-

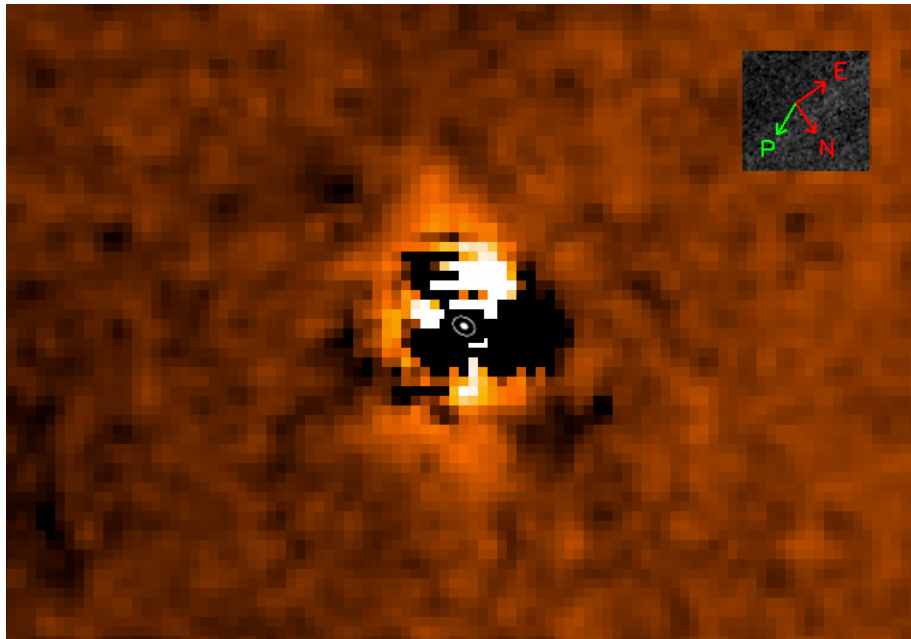


Figura 2.15: Imagem resultante da subtração das imagens das Visitas 1 e 2 (no sentido ‘Visita 1 - Visita 2’). Uma imagem artificial em escala de Chariklo foi incluída no centro (sem prejudicar a visualização) para apresentar a direção dos anéis que tem a orientação dos polos (P) apresentada no canto superior direito (com respeito ao Norte, ‘N’ e Leste, ‘E’). Um fator de 1,2445 foi aplicado na imagem da Visita 2 para que o fluxo no centro da imagem ‘Visita 1 - Visita 2’ fosse o mais próximo de zero. Note que na simulação da Figura 2.4 esperava-se obter estruturas claras e escuras nas direções dos eixos dos anéis, o que não é observado aqui.

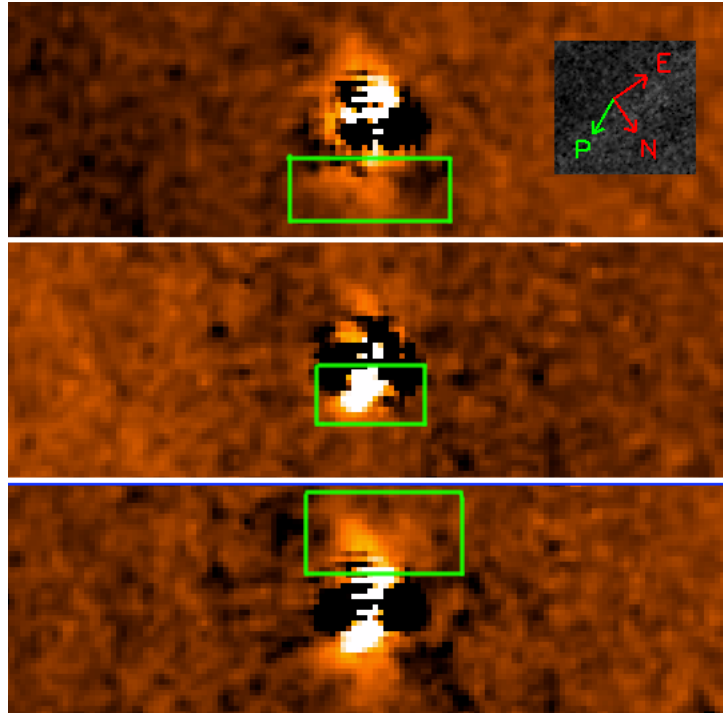


Figura 2.16: Imagem resultante da subtração das imagens das Visitas 1 e 2 (topo), 2 e 3 (meio) e 1 e 3 (baixo). Um fator ótimo foi determinado para compensar as diferenças de brilho entre cada uma das visitas. A direção do polo dos anéis é a mesma nas três imagens, indicada por (P) apresentado no canto superior direito, com a direção Norte (N) e Leste (E). As visitas 1 e 2 possuem um intervalo de 10 dias e uma rotação de 90° entre elas. Entre as visitas 2 e 3 são 57 dias de intervalo e também uma rotação de 90° . Para as visitas 1 e 3, são 67 dias de intervalo e uma rotação de 180° . Nos retângulos em verde estão as estruturas encontradas que necessitam de verificação e uma análise bastante cautelosa. Elas podem ser causadas por efeitos de centragem mal determinada, pelo fator ótimo obtido para subtração das visitas consecutivas (ambas teriam um efeito pequeno e são pouco prováveis de terem influência nas estruturas observadas nas imagens) ou pela presença de estruturas reais, tal como uma coma.

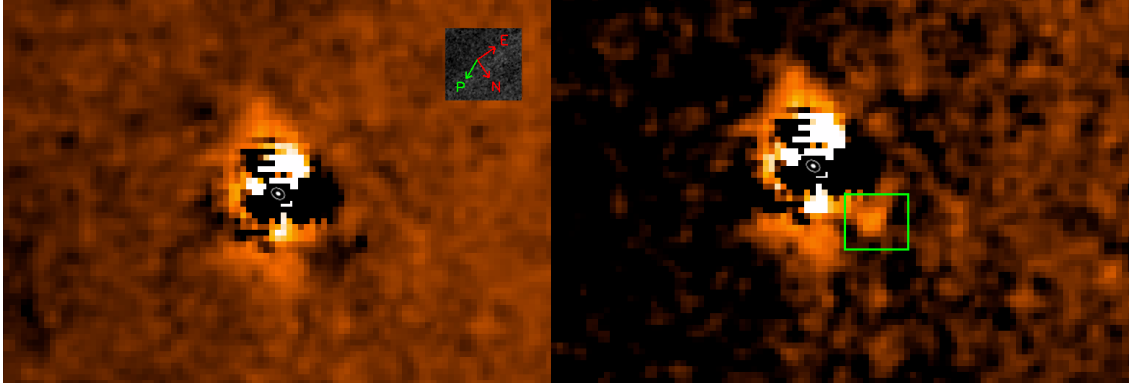


Figura 2.17: Imagem resultante da subtração das imagens das Visitas 1 e 2, adicionado de uma imagem artificial em escala de Chariklo no centro (sem prejudicar a visualização). **Esquerda:** imagem real da diferença das visitas. A direção do polo dos anéis é a mesma para as duas imagens, indicada por (P) apresentado no canto superior direito, com a direção Norte (N) e Leste (E). **Direita:** Imagem simulando a presença de um satélite de 6 km de diâmetro com $p = 0,1$ a uma distância de aproximadamente 6400km do centro de Chariklo (dentro do quadrado verde). Note que mesmo visualmente é fácil de detectar o satélite com magnitude $V \sim 26,1$.

zando óptica adaptativa (AO) sem coronógrafo quando Chariklo estava próximo a uma estrela (menos de $5''$). Uma vantagem deste equipamento com relação ao HST é a resolução espacial, já que o tamanho do pixel é de $12,5 \times 12,5$ mas, enquanto que para o HST é 40×40 mas. O tempo de exposição foi calculado levando em consideração o movimento máximo de $1/4$ da resolução para o movimento de Chariklo, de modo a limitar ‘borrões’ na imagem.

Chariklo foi então observado por 4 noites (25 de Abril e 1, 21 e 28 de julho de 2015) nas bandas BB-Y, BB-J e BB-H ($0.9 \mu\text{m}$, $1.2 \mu\text{m}$, $1.6 \mu\text{m}$). Magnitudes limites para cada uma das imagens e filtro foram estimadas como sendo $Y = J = 20$, $H = 21$, permitindo a detecção individual de Chariklo e assim compensar seu movimento na combinação das imagens. Além disso, uma calibração fotométrica, para estimar o albedo, e uma calibração da PSF, para deconvoluir com o Centauro, foram obtidas. É importante ressaltar que um possível satélite a 20.000 km (2 arcsec) de Chariklo teria se movido cerca de 2 mas durante todo o tempo de integração, isto é, uma pequena fração do tamanho do píxel (12,5 mas), não influenciando no resultado.

Devido principalmente à necessidade da disponibilidade de diversos pesquisadores para realizar a redução e análise de dados, até o momento somente as observações realizadas com a banda H realizadas no dia 21 de julho foram analisadas. Com estas imagens foi obtido uma PSF padrão para uma fonte puntual (Figura 2.18) que foi subtraída de Chariklo (Figura 2.19). O resultado desta subtração mostra que Chariklo não possui uma PSF de uma fonte puntual e ainda apresenta um halo de material que é perpendicular aos anéis. Este halo pode conter material com uma espessura óptica $\tau \sim 4 \cdot 10^{-3}$ e magnitude $\sim 23,3$, representando cerca de $\sim 20\%$ do

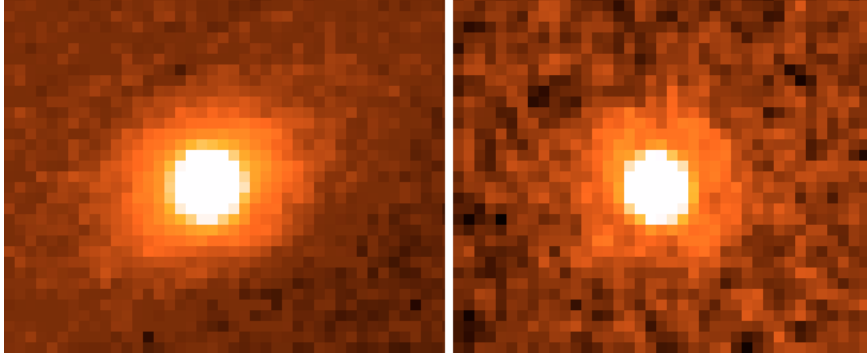


Figura 2.18: **Esquerda:** Imagem de Chariklo obtida com o SPHERE/VLT. A imagem é resultante da coadição de 238 imagens com 4 segundos de exposição cada, num total de 15,9 min de exposição. **Direita:** PSF padrão de uma fonte puntual. Note que mesmo visualmente é fácil observar que Chariklo não possui uma PSF circular, apresentando um alongamento. É importante ressaltar que as imagens foram tomadas acompanhando o movimento de Chariklo, tendo uma variação menor de 1/4 de píxel na centragem.

fluxo ‘Chariklo + Aneis’, ou ainda $\tau \sim 8 \cdot 10^{-4}$ e magnitude $\sim 24,1$, com cerca de $\sim 70\%$.

Portanto, uma análise muito cuidadosa ainda deve ser realizada para entender tanto o comportamento ‘estranho’ obtido com as imagens do HST como do SPHERE. A análise das imagens provenientes das outras noites de observações no VLT ainda são necessárias e um novo pedido de tempo para o período 97A foi proposto (e aceito) para observação com o SPHERE, de modo a confirmar a presença do halo e outras estruturas observadas nas imagens do HST. Com isso, espera-se determinar o que de fato está sendo observado, se é algum fator instrumental ou talvez estejamos observando uma estrutura ao redor de Chariklo muito mais complexa do que se imaginava anteriormente.

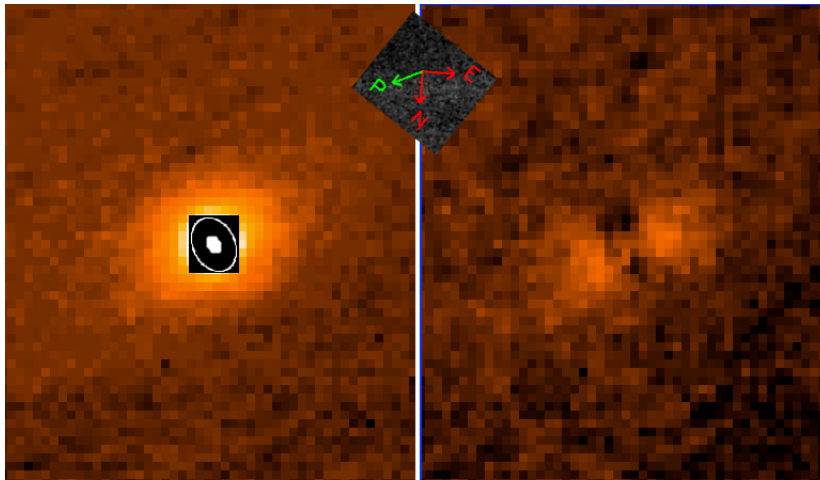


Figura 2.19: **Esquerda:** Imagem de Chariklo obtida com o SPHERE/VLT. A imagem é resultante da coadição de 238 imagens com 4 segundos de exposição cada, num total de 15,9 min de exposição (igual à Figura 2.18 - esquerda). Uma imagem em escala com a orientação modelada dos anéis foi incluída. **Direita:** Imagem de Chariklo subtraída da PSF padrão de fonte puntual. Note a presença de um halo de matéria na direção perpendicular à orientação dos anéis. É importante ressaltar que as imagens foram tomadas acompanhando o movimento de Chariklo, tendo uma variação menor de 1/4 de píxel na centragem. A direção Norte e Leste estão indicadas como 'N' e 'E', respectivamente, bem como a direção do pólo dos anéis 'P'.

Capítulo 3

Ocultação estelar pelo TNO

2007UK₁₂₆

O estudo dos objetos trans-Netunianos pode revelar informações importantes da história química, dinâmica e térmica do Sistema Solar exterior. Determinar a distribuição de tamanhos, albedos, densidades e outras características físicas destes pequenos corpos é crucial para entender as condições dos vários estágios da nebulosa planetária que originou o Sistema Solar, como a formação de planetesimais, o crescimento e evolução orbital, além de mudanças físicas e químicas na superfície dos objetos (LYKAWKA e MUKAI, 2008; SANTOS-SANZ *et al.*, 2016).

Nos últimos 25 anos, cerca de 1930 TNOs e centauros foram descobertos (MPC, 2016a,b), representando apenas uma pequena fração da população total estimada (SANTOS-SANZ *et al.*, 2016). Entretanto, muito pouco se conhece sobre estes corpos: apenas cerca de 140 TNOs e centauros tem seus diâmetros e albedos determinados (LELLOUCH *et al.*, 2013; STANSBERRY *et al.*, 2008) e somente 16 objetos possuem sua densidade estimada (BENECCHI *et al.*, 2010; BRAGA-RIBAS *et al.*, 2013; BROWN, 2012, 2013; BROWN *et al.*, 2010; FORNASIER *et al.*, 2013; GRUNDY *et al.*, 2007, 2012, 2015; LELLOUCH *et al.*, 2013; MOMMERT *et al.*, 2012; NOLL *et al.*, 2008; ORTIZ *et al.*, 2012; SANTOS-SANZ *et al.*, 2012; SICARDY *et al.*, 2011; STANSBERRY *et al.*, 2012; THOLEN *et al.*, 2008; VILENIUS *et al.*, 2012, 2014).

Por estarem muito distantes e apresentarem alta magnitude aparente, estes objetos são dificilmente observados com imageamento direto. Um método para contornar esta situação é a técnica de ocultações estelares. Através dela, pode-se obter tamanhos com precisão da ordem de alguns quilômetros, detectar atmosferas a níveis do nanobar (ELLIOT e YOUNG, 1992; ELLIOT *et al.*, 1989; ORTIZ *et al.*, 2012; SICARDY *et al.*, 2011) e até detectar estruturas como anéis e jatos (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014; ORTIZ *et al.*, 2015).

Desde 2009, após a primeira observação de um TNO (além do sistema de Plutão)

através de ocultação estelar, 16 objetos foram observados utilizando esta técnica. Alguns exemplos são 2002 TX_{300} (ELLIOT *et al.*, 2010), Varuna (SICARDY *et al.*, 2010), Eris (SICARDY *et al.*, 2011), 2003 AZ_{84} (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2011; BRAGA RIBAS *et al.*, 2012), Quaoar (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2013; PERSON *et al.*, 2011; SALLUM *et al.*, 2011), Makemake (ORTIZ *et al.*, 2012), 2002 KX_{14} (ALVAREZ-CANDAL *et al.*, 2014), além dos centauros Chariklo (BRAGA-RIBAS *et al.*, 2014) e Chiron (ORTIZ *et al.*, 2015)¹.

Em novembro de 2014, a observação de uma ocultação estelar por um outro objeto aumenta esta lista, incluindo o TNO (229762) 2007 UK_{126} . Com um semi-eixo maior de 73,81 UA e um período orbital maior que 634 anos, este TNO é classificado como pertencente ao disco espalhado (SDOs) (MPC, 2016a). Ele foi descoberto em Outubro de 2007 (SCHWAMB *et al.*, 2008) e foi dado como binário por NOLL *et al.* (2009) mas somente em 2011 foi anunciado a descoberta de seu satélite (GRUNDY *et al.*, 2011) cuja órbita espera-se ser não circular (THIROUIN *et al.*, 2014). Ele possui um diâmetro estimado de 599 ± 77 km e um albedo $0,167^{+0,058}_{-0,038}$, determinados a partir de observações em 2010 nos comprimentos de onda 70, 100 e 160 μm do telescópio espacial *Herschel* (SANTOS-SANZ *et al.*, 2012) e utilizando um *modelo térmico padrão híbrido (STM)* (MÜLLER *et al.*, 2010; STANSBERRY *et al.*, 2008). Para esta determinação do diâmetro e albedo, foi considerado um valor da magnitude absoluta de $3,69 \pm 0,04$, dado por PERNA *et al.* (2010), valor obtido com observações nos filtros V, R, e I - centrados em 0,554, 0,655 e 0,768 nm, respectivamente - no FORS2, instrumento instalado no ESO Unit Telescope 1 (ANTU) do VLT. Entretanto, deve-se aplicar uma correção de -0,1 devido a um efeito de oposição não considerado em 2010 (PERNA *et al.*, 2013). Além disso, outro valor para sua magnitude absoluta é encontrado na literatura, $H = 3,4$, obtido com observações utilizando filtro R no 3.58 m Telescopio Nazionale Galileo (TNG) (THIROUIN *et al.*, 2014).

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os parâmetros físicos e orbitais deste objeto.

Neste capítulo serão apresentados a observação, redução e resultados da ocultação estelar ocorrida em 15 de Novembro de 2014 por este TNO.

¹Uma tabela mais completa com os eventos observados pode ser encontrada em (SANTOS-SANZ *et al.*, 2016)

Tabela 3.1: Parâmetros Orbitais do SDO 2007 UK₁₂₆.

Elemento ^a	2007 UK126
a (UA)	73,810
e	0,492
i (°)	23,341
q (UA)	37,501
nodo* (°)	131,282
peri** (°)	346,440
M*** (°)	342,509
período (anos)	634,13
Q (UA)	110,119

^a Dados extraídos do banco de dados NASA/JPL (NASA/JPL, 2016); * Longitude do Nodo Ascendente; ** Argumento do perihélio; *** Anomalia média.

Tabela 3.2: Parâmetros Físicos do SDO 2007 UK₁₂₆

Parâmetro	2007 UK126
H* (mag)	3,4 ^a 3,59 ± 0,04 ^b
Diâmetro (km)	599 ± 77 ^c
Período Rotação (h)	11,05 ^d
Albedo	0,167 ^{+0,058} _{-0,038} ^c

* Magnitude Absoluta ^a THIROUIN *et al.* (2014) não apresenta erro para a magnitude absoluta; ^b PERNA *et al.* (2010, 2013); ^c SANTOS-SANZ *et al.* (2012); ^d THIROUIN *et al.* (2014) apresenta este valor como solução com 95% de significância.

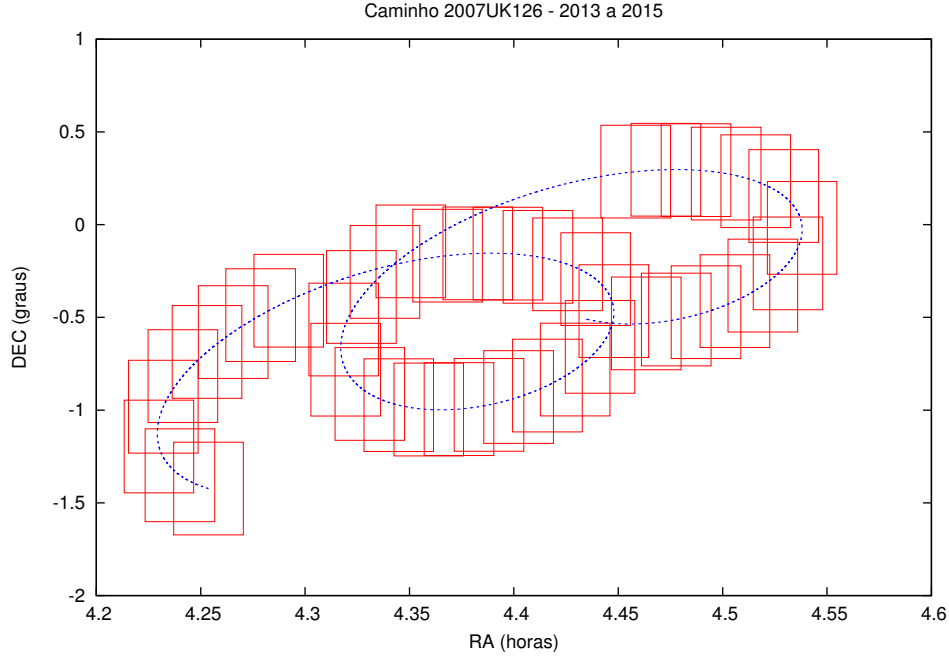
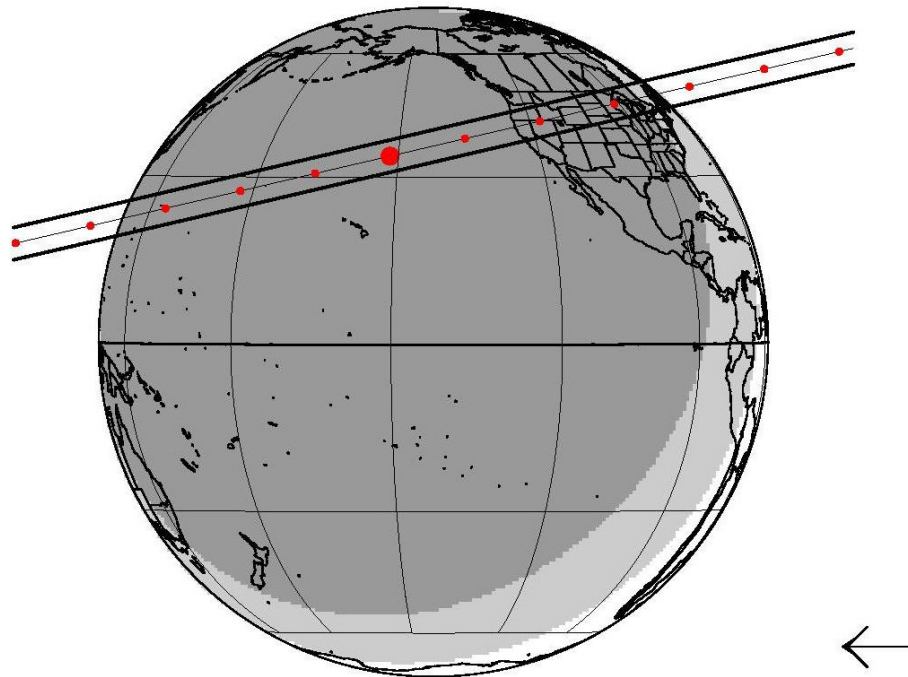


Figura 3.1: Caminho no céu do TNO 2007 UK₁₂₆ entre os anos de 2013 e 2015. No eixo horizontal tem-se os valores para ascensão reta e no eixo vertical a declinação. As caixas vermelhas representam o tamanho do campo de visão do CCD da câmera WFI (34' x 33'), instalada no telescópio de 2.2m no ESO. A região observada foi utilizada para criar uma catálogo de estrelas para previsão de ocultações estelares.

3.1 Predição e Observação

A ocultação de 15 de Novembro de 2014 pelo TNO 2007 UK₁₂₆ foi identificada em uma busca sistemática por estrelas candidatas, realizada no telescópio de 2,2m no ESO equipado com a câmera Wide Field Imager (WFI). Basicamente, para esta busca foram observados caminhos aparentes no céu de 5 centauros e outros 34 TNOs (além de Plutão e suas luas) até o ano de 2015, gerando catálogos astrométricos com estrelas de magnitude até $R = 19$ (ASSAFIN *et al.*, 2010, 2012; CAMARGO *et al.*, 2014). A Figura 3.1 apresenta o caminho percorrido pelo TNO entre 2013 e 2015.

Após a identificação da estrela candidata, com magnitude $R = 15,7$ (também identificada nos catálogos UCAC2 - 31623811 - e UCAC4 - 448-006503), atualizações astrométricas foram realizadas nos telescópios de 60 cm do Observatório do Pico dos Dias, no Brasil (OPD/LNA - Com código UAI 874), e de 77 cm do Observatório de La Hita, na Espanha (código UAI I95). Do OPD foram tomadas, em 19 de Outubro de 2014 com a câmera CCD IkonL 9867, 20 imagens com 45 segundos de exposição cada e utilizando o Filtro I do sistema Johnson (centrado a 800 nm). De La Hita, foram 99 imagens de 400 segundos de exposição tomadas sem filtro com a câmera



d	m	year	h:m:s UT	ra	dec	J2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long
15	11	2014	10 22 45.	04 29 30.6121	-00 28 20.905		0.118	346.90	-24.41	42.57	15.8	13.9	-143.

Figura 3.2: Mapa de previsão da ocultação de 15 de Novembro de 2014 pelo TNO 2007 UK_{126} obtida pelo ‘Grupo do Rio’ utilizando as posições atualizadas da estrela obtidas no OPD.

4kx4k (que possui um campo de visão 47 x 47 arcmin) nos dias 19, 30 e 31 de Outubro de 2014. Ambas as observações foram tomadas com a estrela próxima a meridiano para minimizar possíveis efeitos de refração cromática diferencial. Infelizmente, como a magnitude visual aparente do TNO era de 20,1, a razão sinal/ruído não foi suficiente para determinar uma astrometria para o TNO com estas imagens. Para uma astrometria mais precisa para o TNO, 36 imagens de 400 segundos de exposição foram obtidas nos dias 28 e 29 de Outubro de 2014 com o telescópio de 1,2m em Calar Alto, na Espanha (código UAI 493), utilizando a câmera CCD 4kx4k DLR e sem filtro. Os mapas de previsão de dois grupos são apresentados nas Figuras 3.2 e 3.3.

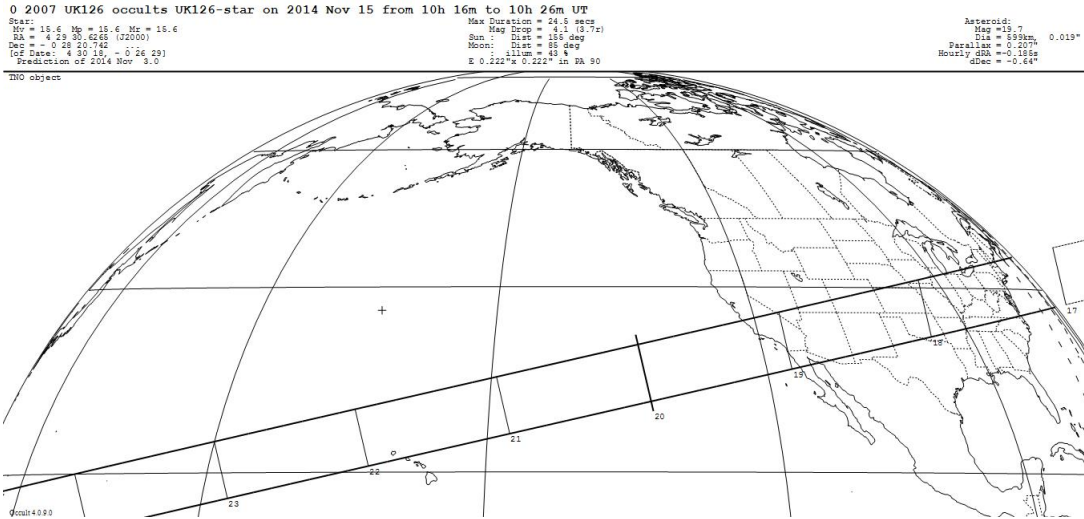


Figura 3.3: Mapa de predição da ocultação de 15 de Novembro de 2014 pelo TNO 2007 UK_{126} obtida pelo ‘Grupo da Espanha’ utilizando as posições atualizadas da estrela obtidas nos telescópios de La Hita e posições da estrela e do TNO obtidos em Calar Alto.

O conjunto de observações permitiu obter *offsets* em ascensão reta e declinação, com respeito às efemérides fornecidas pelo JPL Horizons, e a posição ICRF/J2000 da estrela com uma incerteza da ordem de 20 mas:

$$\begin{aligned} \alpha &= +04^h 29^m 30.^s 610 \pm 0.^{\prime\prime} 022 \\ \delta &= -00^\circ 28' 20.^{\prime\prime} 908 \pm 0.^{\prime\prime} 023 \end{aligned} \quad (3.1)$$

A posição final do caminho da sombra foi determinada para cruzar o território dos Estados Unidos, onde o projeto RECON e outros sítios em potencial foram ativados para observar o evento, num total de 20 estações diferentes. Os detalhes das estações de observações são mostrados nas Tabelas 3.3 e 3.4. Infelizmente, condições meteorológicas desfavoráveis prejudicaram as observações em 11 sítios e dificuldades técnicas não permitiram observações em um outro local. Por outro lado, 6 colaboradores da RECON (BUIE e KELLER, 2016), um IOTA (*International Occultation Timing Association*) e outros dois telescópios em San Pedro Martir obtiveram dados, com um total de 7 detecções positivas e outras duas cordas negativas. A Figura 3.4 apresenta o mapa da ocultação e os sítios que participaram da observação desta ocultação.

Tabela 3.3: Estações participantes da ocultação que obtiveram dados.

Local	Longitude (W) Latitude (N) Altitude (m)	Telescópio Câmera Tempo Exp. (s)	Observador(es) Nota
Reno	119° 45' 53.0" 39° 23' 28.5" 1470.	Celestron CPC1100 28 cm MallinCAM B&W 428 2	Dan Ruby, Brian Crosby, Seth Nuti (RECON)
Carson City (S)	119° 33' 31.4" 39° 16' 26.5" 1332.6	Celestron C11 28 cm MallinCAM B&W 428 2	Red Sumner (RECON)
Jack C. Davis Observatory 'Carson City (B)'	119° 47' 46.8" 39° 11' 08.2" 1548.1	Meade LX-200 30 cm MallinCAM B&W 428 2	Jim Bean, Ethan Lopes (RECON)
Yerington	119° 09' 39.0" 38° 59' 28.3" 1342.7	Celestron CPC1100 28 cm MallinCAM B&W 428 2	Todd Hunt, Scott Darrington, Joanna Kuzia, Les Kuzia, Matt Christiansen (RECON)
Gardnerville	119° 40' 20.3" 38° 53' 23.5" 1534.9	Meade LX-200 30cm MallinCAM B&W 428 2	Jerry Bardecker (RECON)
Tonopah	117° 14' 06.7" 38° 05' 22.1" 1838.7	Celestron CPC1100 28 cm MallinCAM B&W 428 2	Teralyn Blackburn, Clair Blackburn (RECON)
IOTA/Urbana	088° 11' 46.4" 40° 05' 12.5" 227.	Newtonian 50 cm Watec 120N+ 4	Aart Olsen
San Pedro Martir	115° 27' 58.0" 31° 02' 42.0" 2790.	OAN/SPM Harold L. Johnson 1.5 m FLI ProLine PL3041 (PL0212309) 2	Leonel Gutierrez et al.
San Pedro Martir	115° 28' 00.0" 31° 02' 43.0" 2790.	0.84 m SPECTRAL E2V-4240 Mexman 5	Marco Gómez et al.

Tabela 3.4: Estações participantes da ocultação sem dados obtidos.

Local	Longitude (W) Latitude (N) Altitude (m)	Telescópio Câmera	Resultado	Observador(es) Nota
Anderson Mesa	111° 32' 09.0" 35° 05' 49.0" 2163.	42" John Hall	Nuvens	Brian Skiff
Cedarville	120° 09' 9.4" 41° 31' 50.0" 1381.4	Montagem padrão RECON MallinCAM B&W 428	Nuvens	Brian Cain, Terry Miller, David Schulz (RECON)
CPSLO Idyllwild/Astrocamp	116° 42' 48.9" 33° 44' 3.4" 1714.2	Meade LX-200 30 cm MallinCAM B&W 428	Nuvens	John Keller, Melanie Phillips, Eric Hsieh, Ian Mahaffey, Tedd Zel, Jeff Schloetter, Andrew Yoder, Jiawei Simon Qin Jacob Wagner, Adam Eisenbarth
Discovery Channel Telescope	111° 25' 20.0" 34° 44' 40.0" 2360.	4.3m Large Monolith Imager	Nuvens	Stephen Levine
Fall River/Burney	121° 23' 56." 41° 02' 45." 1012.	Montagem padrão RECON	Nuvens	Andrew Mayncsik (RECON)
Fred Lawrence Whipple Observatory	110° 52' 42.0" 31° 40' 52.0" 2606.	MEarth	Nuvens	J. Irwin, D. Charbonneau
Greenville	120° 57' 04" 40° 08' 23." 1098.	Montagem padrão RECON	Nuvens	Bill Gimple, Barclay Anderson (RECON)
Hawthorne	118° 37' 49" 38° 31' 35" 1321.	Montagem padrão RECON	Problemas Técnicos	Kathy Trujillo (RECON)
Portola	120° 34' 03.5" 39° 43' 56.1" 1351.	Montagem padrão RECON	Geadá/Nuvens	Shelley Callahan, Mark Callahan (RECON)
Quincy Feather River College	120° 58' 10.3" 39° 56' 52.7" 1046.	Montagem padrão RECON	Nuvens	Charley Arrowsmith, Lynn Coffman, Levi Kinatader, Colton Kohler, Mystery Brown (RECON)
Susanville	119° 45' 53.0" 39° 23' 28.4" 1470.	Meade LX-200 30 cm MallinCAM B&W 428	Nuvens	Buck Bateson (RECON)
Tulelake	121° 28' 44." 41° 57' 19." 1232.	Montagem padrão RECON	Nuvens	Jason Matkins, Jeannie Smith (RECON)

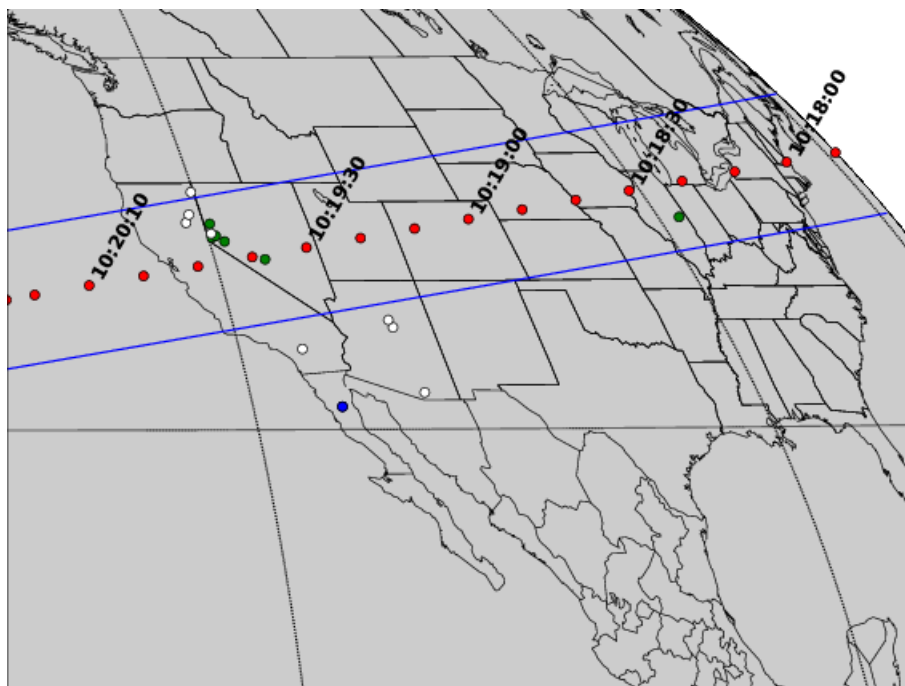


Figura 3.4: Reconstrução do mapa da ocultação de 15 de Novembro de 2014 pelo TNO 2007 UK_{126} . A linha azul mostra o caminho da sombra na Terra, que se move da direita pra esquerda com uma velocidade de $21,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Os pontos vermelhos estão separados a cada 10 segundos. A sombra do TNO cruzou os Estados Unidos em aproximadamente 2 minutos. Os pontos verdes são os locais com detecção positiva e em azul os que obtiveram dados mas não houve detecção do corpo (Tabela 3.3); em branco os locais que tiveram problemas técnicos ou com clima (Tabela 3.4).

3.1.1 RECON

O projeto RECON (acrônimo para *Research and Education Collaborative Occultation Network*) (BUIE e KELLER, 2016) foi idealizado pelos pesquisadores Dr. Marc Buie e Dr. John Keller a fim de, como o próprio nome diz, criar uma rede de colaboração entre pesquisadores e educadores para observação de ocultações estelares.

Através do envolvimento de professores, estudantes e astrônomos amadores o projeto conta hoje com uma rede de 54 locais de observação espalhados pela costa oeste dos Estados Unidos. Cada um destes locais possui um kit com telescópio, câmera de vídeo, localizador e temporizador GPS e notebook. Todos os instrumentos são fornecidos pela organização do projeto ou são instrumentos pessoais ou da comunidade local. A Figura 3.5 apresenta a localização dos sítios de observação da RECON.

A montagem padrão básica dos equipamentos da RECON é dada por um notebook, um telescópio Celestron modelo CPC1100XLT com 28 cm de diâmetro, uma câmera de vídeo MallinCAM B&W 428 e um localizador GPS com insersor de tempo IOTA-VTI. Com isso, numa observação de uma ocultação, tem-se arquivos de vídeo com o tempo de cada frame impresso e não imagens individuais, como é obtido em telescópios profissionais.

3.2 Análise de dados

Os dados obtidos em todos os sítios foram em formato de vídeo, com exceção dos dados de um dos telescópios de San Pedro Martir. Os vídeos, que possuem formato NTSC com frequência de aproximadamente 30 frames por segundo, têm o tempo de cada frame individual estampado por um insersor de tempo em vídeo (VTI). O VTI interage com uma antena GPS para obter o tempo de cada frame, idealmente com uma precisão de alguns milissegundos. Uma vantagem de se utilizar aquisição em formato de vídeo é a não existência de tempo morto, já que a aquisição é contínua. Entretanto, nenhuma informação é inserida no cabeçalho dos frames individuais e é necessário muito cuidado e atenção com alguns detalhes durante o processo de extração das imagens a partir do vídeo, como discutido na seção 3.2.1.

Todos os passos da redução e análise dos dados são discutidos em detalhes nas próximas seções: a partir das imagens extraídas do vídeo (seção 3.2.2) foram obtidas as curvas de luz (seção 3.2.3) e os instantes de tempo para imersão e emersão de cada conjunto de imagens (seção 3.2.4). Em seguida, foi ajustada uma elipse nas

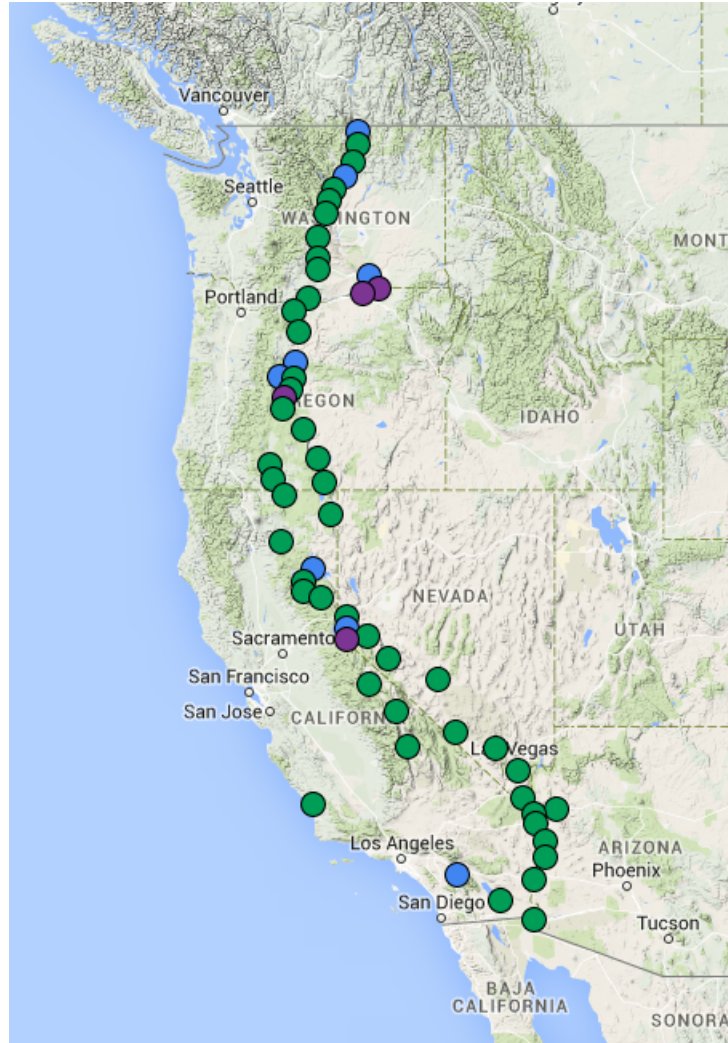


Figura 3.5: Mapa da costa oeste dos Estados Unidos onde estão localizados os 54 sítios de observação da RECON. Em verde estão os locais que receberam o kit de equipamentos completo; em azul os sítios que receberam a câmera mas utilizam telescópios próprio; os locais que utilizam todos os equipamentos próprios são mostrados em roxo. Fonte: (BUIE e KELLER, 2016)

cordas (seção 3.2.5), da qual foi derivado algumas características físicas do TNO (seção 3.2.6.3).

3.2.1 Funcionamento da aquisição de imagens com câmera de vídeo

A aquisição de vídeo não é trivial de se compreender quando se considera a possibilidade de tempos de exposição diferentes da frequência padrão do vídeo. Para facilitar a discussão, devemos imaginar que a câmera trabalha em dois diferentes ‘níveis’:

1. a integração (ou aquisição) da imagem;
2. a coleta de frames;

Estes dois processos são independentes mas funcionam simultaneamente dentro da câmera de vídeo. Cada um dos passos é discutido em detalhes a seguir.

3.2.1.1 Integração da imagem

O CCD inteiro de uma câmera de vídeo é descarregado a cada $1/29,97$ segundos, alternando-se as colunas pares e ímpares, isto é, um conjunto de colunas é descarregado a cada $1/59,94$ segundos enquanto o outro conjunto de colunas está acumulando fótons. Utilizando este processo de carga e descarga de colunas alternadas, o tempo morto de aquisição do CCD da câmera é praticamente nulo.

Por possuir uma frequência de descarga determinada, o tempo mínimo de exposição de uma câmera de vídeo é $1/29,97$ segundos, que é o tempo necessário para descarregar os dois conjuntos de colunas (pares e ímpares) do CCD. Entretanto, é possível obter tempos de exposição maiores. Para uma câmera de vídeo modelo padrão da RECON, o tempo de integração desejado será um fator multiplicativo deste tempo mínimo, até o tempo máximo de 8,542 segundos (ou $256 \times 1/29,97$). Este fator é determinado pelo chamado *SENSEUP* e funciona apenas em potências de 2, isto é, os tempos de integração somente podem ser 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 ou 256 vezes o tempo mínimo² (que correspondem respectivamente a valores de *SENSEUP* iguais a 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 ou 512). O valor do *SENSEUP* determina quanto tempo o CCD vai acumular os fótons e ‘impedir’ a descarga do CCD. Assim que a aquisição termina, o CCD é descarregado na frequência do vídeo (isto é $1/29,97$) e a imagem seguinte. A Figura 3.6 ilustra o funcionamento deste processo para um *SENSEUP* igual a 8x.

²Alguns modelos de câmera permitem uma certa combinação destes valores, tendo uma gama maior de valores de integração possível.

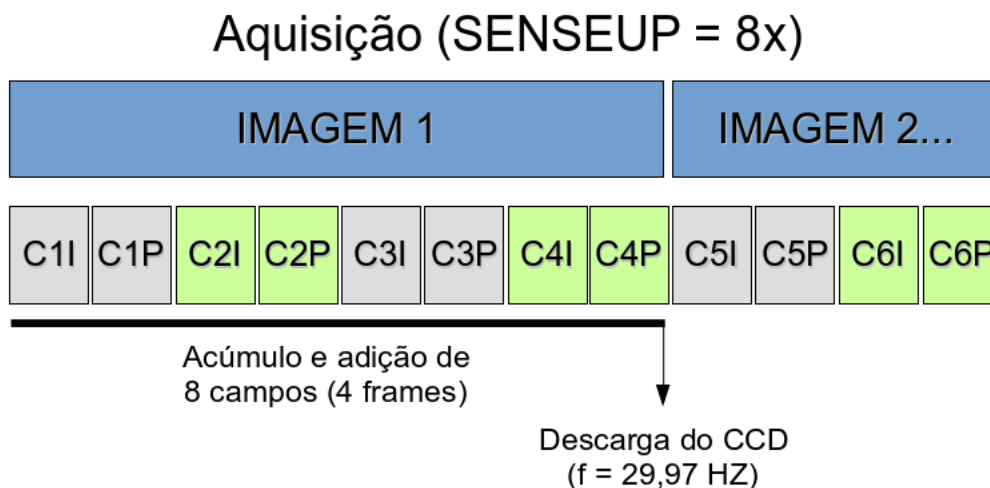


Figura 3.6: Aquisição de imagens com câmera de vídeo. Aqui um exemplo utilizando $SENSEUP = 8x$, isto é, o tempo de integração da imagem (caixas azuis) é de $4 \times / 29,97$ s. Durante o tempo de aquisição da imagem são acumulados 4 campos pares ('CiP') e ímpares ('CiI'), totalizando 4 frames, representados pelas caixas em cinza e verde. Assim que a aquisição termina, apenas um frame é descarregado na frequência do vídeo. Neste exemplo, o frame que representará a 'Imagem 1' será composto por um campo ímpar (que é a acumulação de fótons de 'C1I' a 'C4I') e um campo par (que é a acumulação de fótons de 'C1P' a 'C4P').

3.2.1.2 Coleta de Frames

O segundo processo que ocorre na câmera de vídeo é a coleta de frames. Um *frame* é composto por dois *campos* que são as colunas pares e ímpares do CCD. Assim que os dois conjuntos de campos são descarregados, um coletor de frame é acionado. É importante lembrar que o coletor de frames funciona independentemente do valor de $SENSEUP$, isto é, do tempo de integração. A função do coletor de frames (ou *frame grabber*) é basicamente coletar a informação dos campos descarregados e gerar os frames que serão enviados para o computador e serão exibidos no arquivo de vídeo. O funcionamento do coletor de frames é ilustrado na Figura 3.7

3.2.1.3 Processos simultâneos: Aquisição, descarga e transferência de informação para computador

O próximo é compreender o funcionamento simultâneo das tarefas apresentadas nas seções anteriores e incluir o insersor de tempo (VTI). A Figura 3.8 apresenta um exemplo de aquisição de vídeo para uma exposição utilizando $SENSEUP = 8x$, isto é, o tempo de exposição é de $\sim 2/15$ segundos, representados por 8 campos ou 4 frames³.

'Frame Grabber'

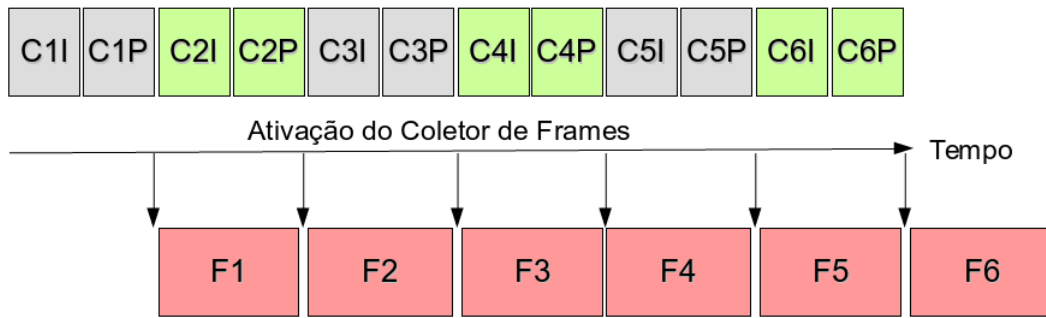


Figura 3.7: Coletor de frames de uma câmera de vídeo. Os campos (caixas em cinza e verde) são descarregados a uma frequência de ~ 60 Hz, mas o coletor de frames é acionado somente quando os dois campos são descarregados, armazenando a informação do frame completo (com campos pares, 'CiP', e ímpares, 'CiI'). Dessa maneira, o frame 'F1' será composto pelos campos 'C1I' e 'C1P', e assim por diante. Note que a primeira vez que o coletor de frames é ativado ocorre depois da descarga do primeiro frame, gerando um 'buraco' de informação entre o tempo inicial e o tempo de 'F1' (que é de $1/29,97$ segundos).

Assim que a câmera entra em funcionamento (em 'T0'), a imagem começa ser integrada. Neste momento, não há nenhuma informação armazenada nos campos, mas o computador precisa ter o início do arquivo. Por isso é criado um frame virtual, 'NULO', sem informação nenhuma, para ser apresentado. Assim que o primeiro frame é concluído em T2 ($1/29,97$ segundos depois do início), o coletor de frame armazena a informação em F1 e passa a informação para o computador, no tempo T2, e gerando uma imagem que corresponde aos campos C1. A integração segue acumulando fótons, o coletor continua seu processo na frequência de vídeo mas não há informação nova, por isso até T10 o frame F1 é repetido.

Em T8 a primeira integração termina e a informação é passada para os campos C5I e C5P. Estes campos são coletados gerando o frame 'F5' que representa a 'Imagem 1'. A informação é passada para o computador em T10. Nos instantes seguintes, a Imagem 2 ainda está sendo processada, então o frame F5 é repetido no arquivo de vídeo quantas vezes for necessário para que a integração termine e seja transferida (no caso, em T16 e T18, respectivamente, não mostrados na figura).

O tempo de cada campo é registrado por um insersor de tempo IOTA-VTI. Os tempos T0-T13, mostrados na Fig. 3.8, são incluídos de forma que cada campo tenha uma 'assinatura' única, isto é, somente o campo C1I terá o tempo T0 registrado, somente o campo C1P terá o tempo T1, e assim por diante. O frame F1, formado

³Para facilitar o entendimento, tenha sempre a Fig. 3.8 ao lado desta explicação.

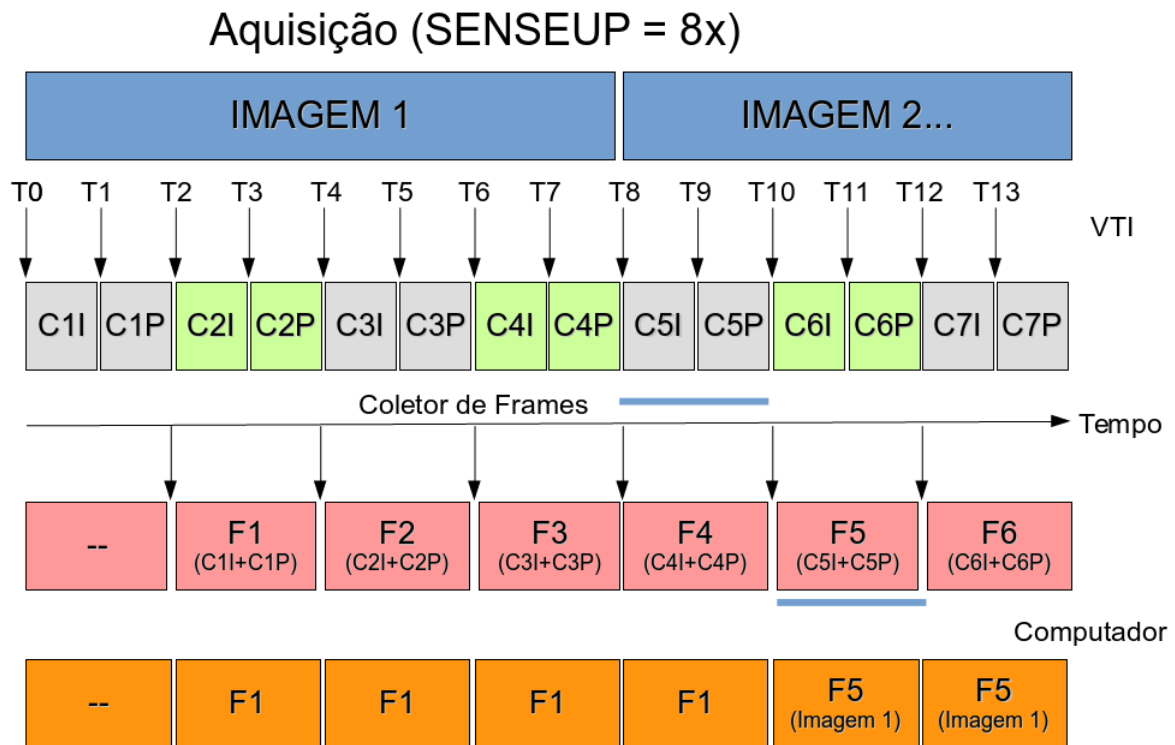


Figura 3.8: Funcionamento da câmera de vídeo. Aqui é apresentado a aquisição para um SENSEUP = 8x. A aquisição da imagem ocorre como explicado na seção 3.2.1.1. O Inserir de tempo (VTI) é ativado em cada campo, inserindo o valor do respectivo tempo de início T, deixando cada campo com uma assinatura única. O coletor de frames funciona independentemente e vai gerar um frame a cada dois campos, como apresentado na seção 3.2.1.2. A informação da 'Imagem 1' está contida nos campos C5I e C5P, que formam o frame F5 (com os tempos T8 e T9 impressos). A informação passada para o computador acontece somente após o término da aquisição da imagem e da coleta do frame, em T10. O frame F5 é repetido quantas vezes forem necessárias até a Imagem 2 estar integrada. Como no início do vídeo não há informação, o primeiro frame do arquivo será nulo, o segundo frame do arquivo conterá a informação do frame F1, que se repetirá até que a informação da Imagem 1 esteja completa em T10. Note que para recuperar o tempo do meio da integração da Imagem 1, basta pegar o tempo impresso no frame F5 (T8) e subtrair metade do tempo de exposição (chegando a T4).

por estes dois campos, apresentará os dois instantes (T0 e T1).

3.2.1.4 Arquivo de vídeo

Assim que a câmera termina todas as aquisições, o arquivo de vídeo é criado contendo um primeiro frame sem informação e vários frames repetidos (até um ciclo de integração) com um frame que contém informação parcial (frame F1 na Fig. 3.8). Em seguida, o frame da Imagem 1 é repetido até completar a integração seguinte e assim por diante até o último frame representando a última integração. Note que o número de cópias do último frame não necessariamente precisa ser igual à uma integração, já que a câmera não está mais fazendo aquisição da imagem.

A repetição de frames deve ser considerada na redução dos dados, já que pode inserir ruído eletrônico entre cada cópia e, por isso, deve ser feita uma média dos valores de cada píxel para remover este ruído. Na seção 3.2.2 será discutido como essa repetição de frames de uma mesma imagem devem ser tratados na redução dos dados. É importante ainda ressaltar que para se obter o tempo da metade da exposição da ‘Imagem 1’ (isto é, T4), pega-se o menor valor mostrado no frame F5 (que é o tempo T8, impresso em C5I) e subtrair metade do tempo de exposição.

Em resumo, o funcionamento de uma câmera de vídeo leva tempo para se compreender principalmente considerando que a aquisição da imagem é um processo independente da transferência de informação para o computador. Além disso, por ser um processo virtual, ainda podem ocorrer diversos defeitos como o entrelaçamento, a duplicação de campos ou a perda de frames, como será discutido na seção 3.2.2.

3.2.2 Extração de imagens a partir do vídeo

A extração das imagens a partir do vídeo, apesar de ser um processo simples, requer uma atenção especial. Muitos problemas podem surgir e algumas precauções e verificações devem ser realizadas para não haver erros na determinação dos instantes de tempo que, por sua vez, é fundamental para a obtenção da forma do objeto. Utilizando o AUDELA (AUDELA, 2016) (um software livre e de código livre desenvolvido para observações astronômicas digitais utilizando câmeras de vídeo, CCDs, *Webcams*, etc.) foram extraídos os frames na frequência de 29,97 frames por segundo (fps), padrão do formato NTSC. Durante este processo, é importante verificar a existência de frames perdidos, campos duplicados (ver seção 3.2.2.1), a existência de interferência eletrônica no próprio vídeo ou ainda alguma incompatibilidade digital com diferentes versões de *softwares*, *drivers* ou *plug-ins*.

Apesar de arquivos de vídeo ter uma frequência aproximada de 30 fps, é possível ter imagens com tempo de exposição maiores, ou seja, a frequência do vídeo e o tempo de aquisição são independentes, como discutido na seção 3.2.1. Para uma

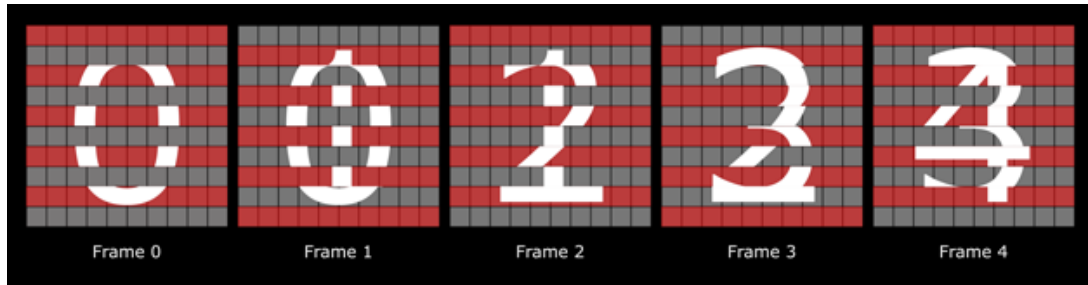


Figura 3.9: Exemplo de frames entrelaçados. O ‘frame 0’ (esquerda) contém informação das colunas pares e nada nas colunas ímpares. O frame seguinte, ‘frame 1’ irá conter a informação do ‘frame 0’ e da coluna par do ‘frame 1’. Esse processo se repete e os frames atuais terão sempre a informação das colunas ímpares do frame anterior junto com a informação das colunas pares do frame atual. Note que ao excluir o primeiro e o último frame, a informação desconsiderada será a coluna par do primeiro frame, ou ‘frame 0’, e a coluna ímpar do último frame, ou ‘frame 4’ neste exemplo. Entretanto, o tempo do meio da imagem será conservado, sendo dado pelo instante impresso no ‘frame 2’.

imagem com tempo de exposição de ~ 2 segundos, como o tempo de integração utilizado nas observações da ocultação do TNO 2007 UK_{126} , 64 frames serão repetidos no vídeo, com tempo de ciclo de 2,135s. Cada um destes 64 frames terão seus tempos individuais estampados. Entretanto, estes 60 frames eles representam uma mesma imagem e, portanto, devem ser combinados após a extração, de modo a se obter a imagem real que representa os 2 segundos expostos e a fim de se eliminar o ruído eletrônico da câmera de vídeo. Somente dois locais utilizaram tempo de exposição diferentes, sendo de 4 segundos em Urbana, ou 128 frames para uma mesma imagem, e 5 segundos com uma câmera CCD para uma das cordas negativas (ver Tabela 3.3).

Um outro ponto a se considerar é a coluna do CCD que o vídeo iniciou a captura da imagem. As colunas pares e ímpares no CCD de uma câmera de vídeo são descarregadas separadamente e a aquisição nem sempre se inicia na mesma coluna. Com isso, cada frame que é composto por uma dupla de campos “ímpar-par” pode ficar como uma dupla “par-ímpar”. Desta forma, os frames resultantes da extração acabam ficando como ‘transicionais’, com parte de dois frames reais entrelaçados (ver Figuras 3.9 e 3.10).

Para contornar este problema, existem duas soluções: (i) pode-se fazer um processo chamado *de-interlace*, no qual será realizado computacionalmente a separação de cada dupla de campos do frame (que representam as colunas pares/ímpares) e reorganizando de maneira correta, ou seja, no conjunto de frames do vídeo deslocar-se um campo (meio frame isto é, uma das colunas pares/ímpares, como mostrado

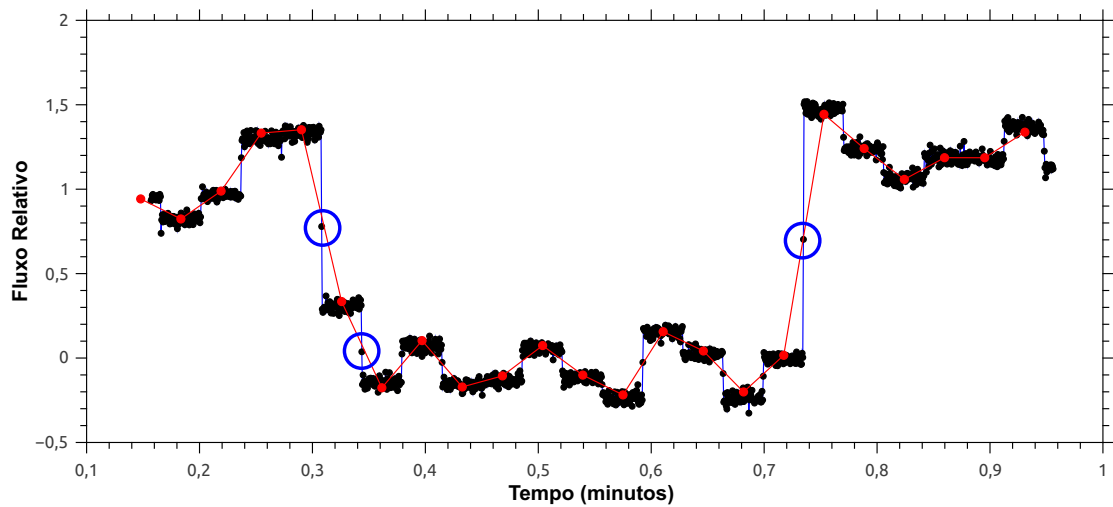


Figura 3.10: Figura exemplificando uma curva de luz obtida por uma fotometria de abertura nos frames extraídos de vídeo. O tempo de integração é de 2 segundos e a extração dos frames foi feita a 29,97 fps. Note os ‘saltos’ entre cada grupo de pontos, representando uma mesma imagem. Cada grupo de 64 frames deve ser combinado para gerar um único ponto na curva de luz, representado pelos pontos em vermelho. A dispersão em cada um dos grupos é dada pelo ruído eletrônico e são mais evidentes quando a estrela ocultada é pouco brilhante. Os círculos azuis apresentam três frames ‘transicionais’. Isto significa que o vídeo iniciou a aquisição numa coluna par e cada frame está entrelaçado com uma parte do frame adjacente. Pontos como este são indícios fáceis de se verificar e saber a necessidade de correção de frames transicionais.

na Figura 3.9) a fim de se ter os frames reais (que serão combinados posteriormente para ter a imagem com o tempo de integração). Embora seja o procedimento mais recomendado pelos fabricantes de câmeras e desenvolvedores de programas, esse procedimento pode gerar defeitos como a perda de frames ou a duplicação de campos (ver seção 3.2.2.1), além de outros problemas de incompatibilidade pelo uso de *softwares*, *drivers* ou *plug-ins* de diferentes versões ou desatualizados; ou (ii) exclue-se o primeiro e o último frame de cada grupo de frames (uma integração) ao agrupá-los para gerar a imagem com o tempo de integração. Como os frames de cada grupo são repetições da mesma imagem, a exclusão de alguns frames de cada grupo não faz diferença na imagem final e também não insere tempo morto. Portanto, pode-se excluir os frames transicionais sem inserir defeitos ou outros problemas. A primeira solução, utilizando o processo de *de-interlace* foi utilizada pelo colaborador Marc Buie, que reduziu os dados para uma análise paralela. Neste trabalho foi utilizado o segundo método, excluindo o primeiro e último frame de cada imagem. Os resultados das duas análises são apresentados nas seções seguintes.

Sabendo que o tempo de exposição foi de ~ 2 segundos (ou ~ 4 para Urbana) e considerando como 64 (ou 128, respectivamente) o número de frames que representa cada imagem, e também levando em consideração a existência de frames transicionais, foi feita uma combinação destes frames, excluindo-se o primeiro e o último frame de cada grupo. Esta combinação consiste em tomar a média do grupo de 62 (ou 126) frames diminuindo o ruído eletrônico na imagem final. A Figura 3.10 apresenta um exemplo de uma curva de luz obtida com os frames extraídos do vídeo e com as imagens agrupadas. Os instantes de tempo de cada imagem foram extraídos dos frames intermediários. Estas imagens foram utilizadas para obter as curvas de luz, as cordas e os parâmetros do TNO.

3.2.2.1 Frames perdidos, campos duplicados e outros defeitos de vídeo

A aquisição de vídeo é feita continuamente pois o descarregamento do CCD, além de ser rápido, é realizado alternando-se as colunas, isto é, enquanto as colunas ímpares estão sendo expostas, está descarregando as colunas pares, e vice-versa. Cada grupo de colunas (pares ou ímpares) é chamado de campo e um frame é composto por uma dupla de campos (uma dupla ‘ímpar-par’). Por ser um procedimento eletrônico, podem ocorrer falhas no processamento e isso gera defeitos que devem ser verificados cuidadosamente. Tais defeitos são falhas digitais (*glitches*), o entrelaçamento, a duplicação de campos ou a perda de campos ou frames. Visualmente a existência destes defeitos é fácil de se identificar, mas encontrar onde e quais são os frames com problemas é uma tarefa quase impossível manualmente, visto que existem cerca de 10 mil frames para um vídeo de ~ 5 minutos de duração.

As falhas, ou *glitches*, são defeitos digitais que ocorrem durante a aquisição do

vídeo, normalmente causados por algum pulso elétrico de interferência. As câmeras são programadas automaticamente para corrigir este problema, entretanto alguns frames podem ficar comprometidos, apresentando um dos campos deslocado verticalmente ou horizontalmente. A Figura 3.11 (baixo-esquerda) apresenta um exemplo de um frame com *glitch*.

No caso do entrelaçamento (ou *interlace*) os campos de um frame ficam trocados, ou seja, ao invés de ter uma dupla de campos ‘ímpar-par’, tem-se uma dupla ‘par-ímpar’ e isso vai gerar um comportamento na curva de luz como mostrado nas Figuras 3.9 e 3.10. Uma outra maneira de se identificar facilmente este problema é verificar as frações de segundo impressas no vídeo. Normalmente, a fração das colunas ímpares (esquerda) é menor que a fração da coluna par (direita). Caso haja um entrelaçamento, os valores estarão invertidos, como mostra a Figura 3.11 (topo-direita).

Para verificar a existência de campos duplicados, deve-se também observar as frações de tempo impressas nos frames. Como mostra a Figura 3.11 (baixo-direita), um campo duplicado vai gerar um frame sem a fração de segundo de uma das colunas. A existência de campos duplicados pode implicar numa imagem final (considerando o tempo de exposição) que inclui mais frames que o real ou ainda, dependendo de como é obtida a imagem e de quantos campos duplicados existam, pode-se gerar imagens entrelaçadas (que são mais problemáticas que frames entrelaçados).

O terceiro caso, de perda de campos ou frames é também simples de se verificar. Basta comparar o número de frames extraídos com o número esperado de frames. Este pode ser obtido pela diferença do último número impresso no primeiro e último frames. Tomando como exemplo os frames topo-direita e baixo-direita da Figura 3.11, temos os números impressos 360095 e 360093. A diferença dá o número de campos (e dividindo-se por 2, o número de frames). Neste exemplo, o frame de baixo é o ‘frame 0’ e o de cima o ‘frame 1’. Se o número de frames extraídos for maior que o esperado é bastante provável que existam campos duplicados, se for menor alguns frames ou campos foram perdidos. Se o número for igual ainda existe a possibilidade do vídeo ter perdido alguns frames e duplicado outros, mas a probabilidade de ter o mesmo número de perdidos e duplicados é mínima.

Como dito anteriormente, descobrir a existência destes problemas é fácil, apenas necessitando verificar os instantes de tempo impressos nos frames. Entretanto, para encontrar onde estão estes problemas é preciso verificar cada um dos frames, tarefa possível somente com ajuda computacional.

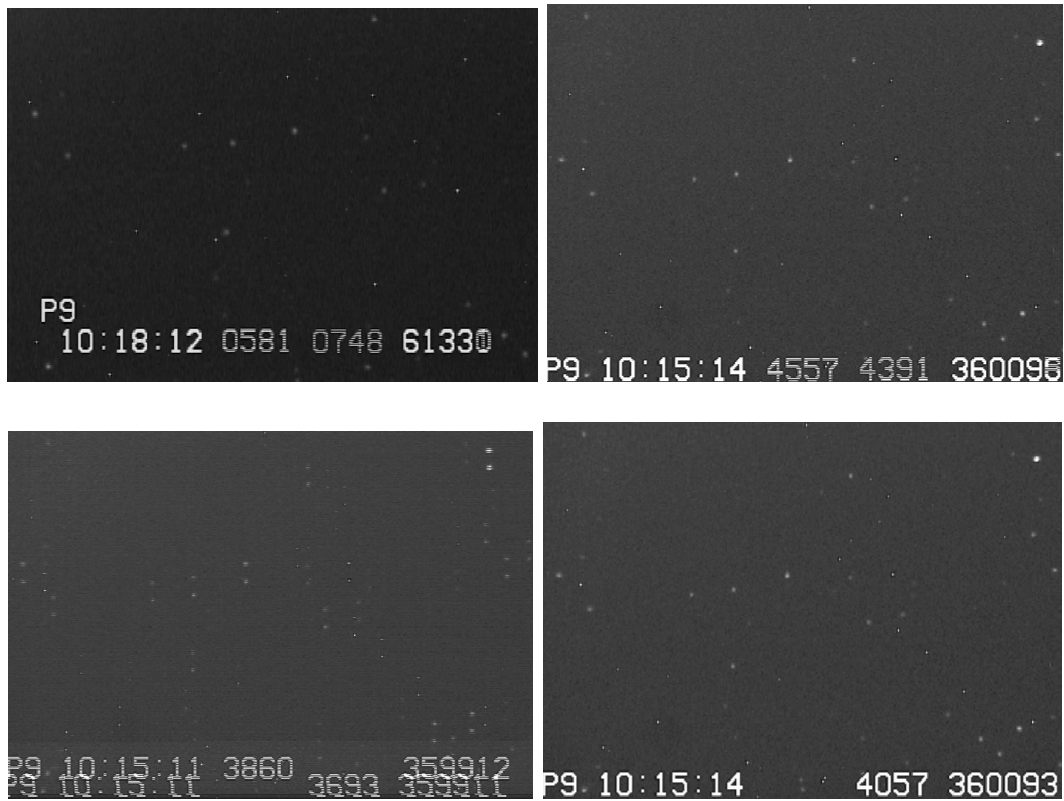


Figura 3.11: Frames com o tempo estampado utilizando o VTI. Os números representam, da esquerda pra direita: o número de satélites encontrados pela antena GPS, a hora (formato HH:MM:SS), fração de segundo com 4 dígitos da coluna ímpar, fração de segundo com 4 dígitos da coluna par, número do campo (contagem interna da câmera). **Topo-Esquerda:** Frame correto com os instantes de tempo impressos e o número de campos com o último dígito apresentando dois valores (das colunas ímpar e par). **Topo-Direita:** Frame entrelaçado com as colunas ímpares e pares. Note que a fração de segundo da coluna ímpar (primeiro valor) está maior que a fração da coluna par (segundo valor), valores que deveriam estar como no frame à esquerda. **Baixo-Esquerda:** Frame com *glitch*. Note que todas as colunas pares do frame estão deslocadas verticalmente para baixo. **Baixo-Direita:** Frame com campo duplicado. Note que a fração de segundo ímpar não aparece e a fração de segundo par aparece ‘cheia’ e não ‘pontilhada’ como no frame correto no topo-esquerda.

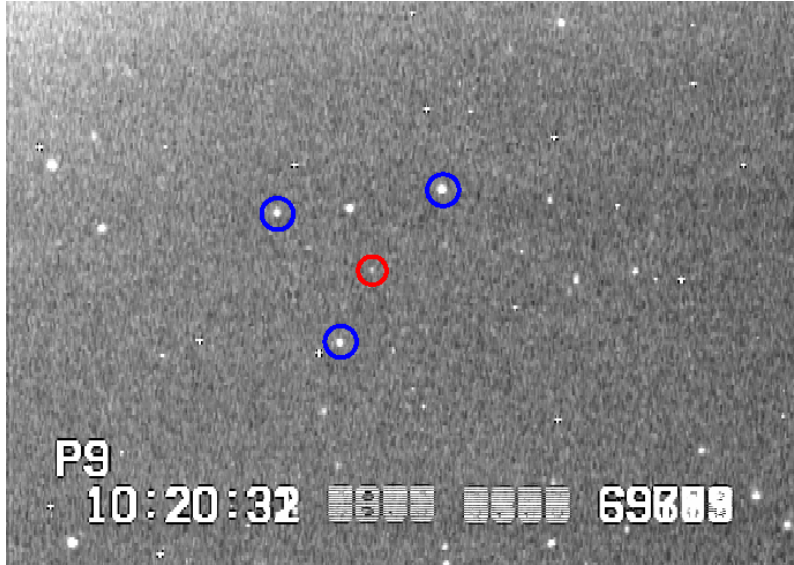


Figura 3.12: Uma das imagens de Gardnerville apresentando a estrela ocultada, circulado em vermelho, e as três estrelas utilizadas na calibração da fotometria diferencial circuladas em azul. A fração de segundos e o número de campos não é legível devido à combinação dos 64 frames para gerar a imagem (seção 3.2.2).

3.2.3 Obtenção das curvas de luz

Com as imagens obtidas do agrupamento dos frames (Seção 3.2.2) foram obtidas as curvas de luz utilizando o pacote PRAIA (ASSAFIN *et al.*, 2011) através de uma fotometria diferencial de abertura, utilizando-se três estrelas como calibradoras próximas à estrela ocultada. A Figura 3.12 mostra as estrelas utilizadas para calibração e a estrela ocultada. Durante este procedimento é importante verificar a existência de píxeis quentes que podem prejudicar a contagem de fluxo da estrela alvo ou das calibradoras.

O fluxo de duas das estrelas de calibração foi tomado por uma abertura fotométrica de 8 píxeis e a terceira por uma abertura fotométrica de 10 píxeis. O fluxo de céu para estas estrelas foi tomado por um anel de raios interno 16 píxeis e externo 20 píxeis ao redor de cada uma delas. Uma média do fluxo das três estrelas foi tomado como fluxo de referência para a ocultação.

Para a estrela ocultada, a abertura fotométrica foi de 7 píxeis e para o céu um anel de raio interno 10 e externo 16 foi utilizado. O fluxo foi normalizado com o fluxo das estrelas de calibração e, a fim de diminuir o ruído e suavizar a curva de luz, um polinômio de terceiro grau foi ajustado nos dados fora dos instantes da ocultação. As curvas resultantes das duas análises são mostradas na Figura 3.13.

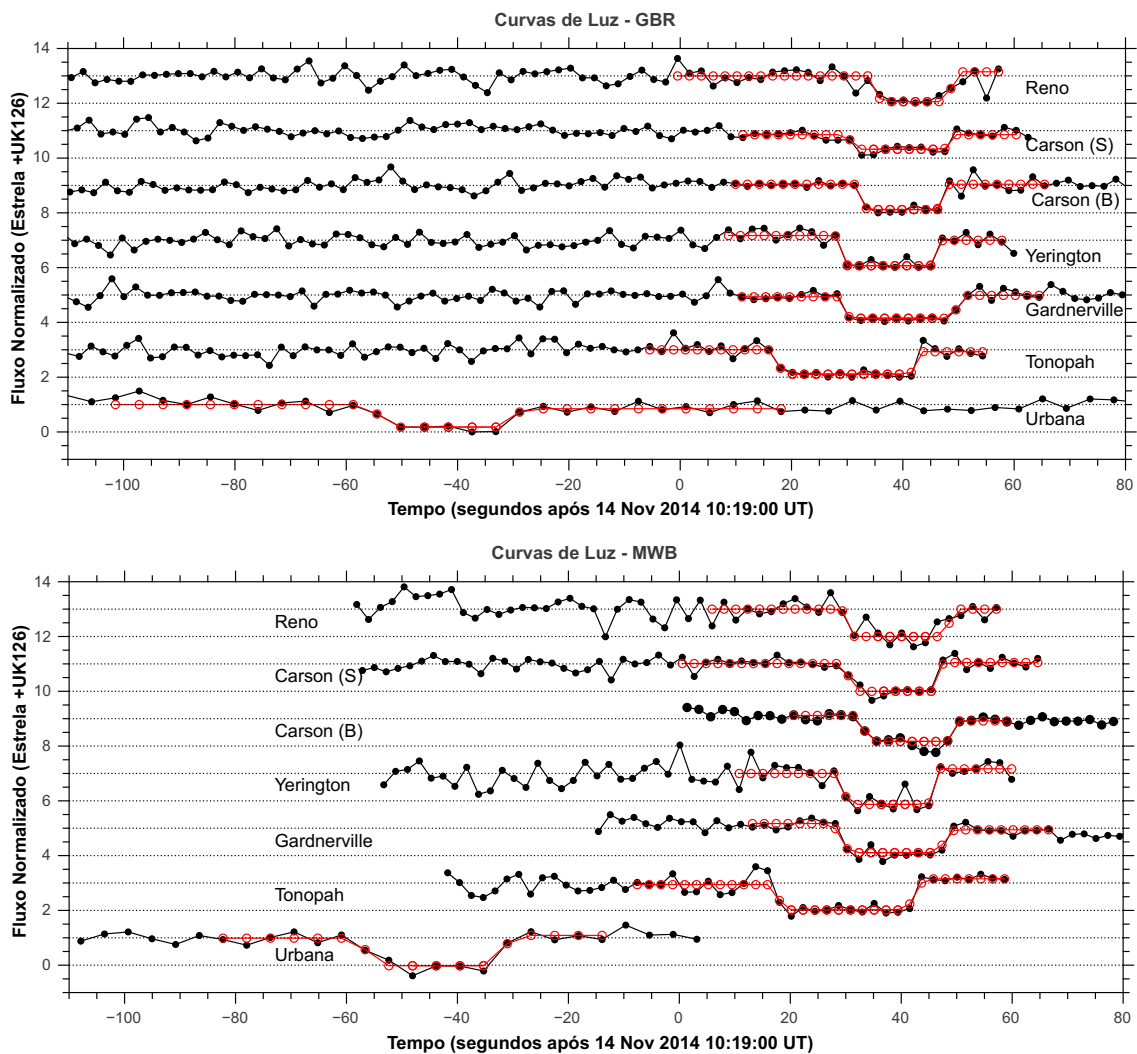


Figura 3.13: Curvas de luz normalizadas para o fluxo da estrela não ocultada obtidas para os 7 sítios com detecção da ocultação e verticalmente deslocadas para melhor visualização. Em vermelho está apresentado o modelo do poço quadrado convoluído com a difração de Fresnel, o diâmetro angular da estrela e o tempo de exposição. Os tempos das ocultações são diferentes devido às diferentes longitudes dos locais de observação (Figura 3.4). A ‘falta’ de pontos em algumas das curvas ocorrem devido à finalização da aquisição do vídeo. Acima as curvas obtidas pela análise deste trabalho; abaixo as curvas obtidas por Marc Buie.

Tabela 3.5: Parâmetros para cálculo do diâmetro da estrela.

Tipo da Estrela	α	β	γ	δ
Gigantes e Supergigantes	$0,648 \pm 0,072$	$0,220 \pm 0,012$	$0,669 \pm 0,052$	$0,223 \pm 0,010$
Variáveis	$0,840 \pm 0,096$	$0,211 \pm 0,008$	$0,789 \pm 0,119$	$0,218 \pm 0,014$
Sequência Principal	$0,500 \pm 0,012$	$0,290 \pm 0,016$	$0,500 \pm 0,023$	$0,264 \pm 0,012$

3.2.4 Obtenção dos instantes de tempo e das cordas

Os tempos de entrada e saída da ocultação foram obtidos ajustando-se um modelo geométrico de poço quadrado, que representa um corpo sem atmosfera ocultando uma fonte (estrela) puntual. Este modelo é convoluído com o padrão de difração de Fresnel de uma fonte puntual à distância do objeto, o diâmetro angular aparente da estrela em quilômetros e o tempo de integração, como em (BRAGA-RIBAS, 2013).

A escala de Fresnel (dada pela relação $F = \sqrt{\lambda D/2}$) é um limite para o qual o efeito de difração é observado, a uma distância D do observador, quando se tem um obstáculo com extremidades não suaves obstruindo a luz de comprimento de onda λ de uma fonte puntual. Para a distância geocêntrica que o TNO se encontrava no momento da ocultação ($D = 42,6 \text{ UA} = 6,37 \cdot 10^9 \text{ km}$) e comprimento de onda $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$, tem-se $F = 1,4 \text{ km}$. O diâmetro estelar aparente no plano tangente à esfera celeste foi estimado utilizando a equação dada por VAN BELLE (1999)

$$\begin{aligned}\theta_B &= 10^{\alpha+\beta(B-K)-0,2B} \\ \theta_V &= 10^{\gamma+\delta(V-K)-0,2V}\end{aligned}\quad (3.2)$$

onde os parâmetros $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ dependem do tipo da estrela, como apresentado na Tabela 3.5. Os valores de θ_B e θ_V são dados em radianos e B , V e K são as magnitudes aparentes, as quais foram obtidas do catálogo NOMAD (ZACHARIAS *et al.*, 2004), sendo $B = 17,002$, $V = 15,856$ e $K = 13,711$.

Para obter o diâmetro da estrela em km basta utilizar a equação 3.3:

$$D = Tg\theta \cdot Dist_{km} \sim \theta \cdot Dist_{km} = \frac{\theta \cdot \pi}{180 \cdot 3600} \frac{Dist_{km}}{1000} \quad (3.3)$$

Com isso, mesmo não conhecendo qual categoria a estrela pertence, o maior diâmetro possível para a estrela projetada na distância do 2007 UK_{126} ($\sim 42,57 \text{ UA}$ ou $\sim 6,37 \cdot 10^9$) é $D_B = 0,4 \text{ km}$ e $D_V = 0,7 \text{ km}$. Para o tempo de integração, o mínimo tempo usado nas observações foi 2 segundos, o que representa cerca de 43 km no plano do céu para a velocidade do evento de $21,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Portanto, o ajuste para determinar os instantes das curvas de luz é dominado pelo tempo de integração, e não pela escala de Fresnel ou diâmetro da estrela.

Tabela 3.6: Instantes de imersão e emersão da ocultação.

Local	GBR ^a		MWB ^b	
	Tempo (UT) Imersão Emersão	Erro (s)	Tempo (UT) Imersão Emersão	Erro (s)
Reno	10:19:35,02	+0,80 -5,33	10:19:30,39	+5,43 -0,70
	10:19:46,68	0,47	10:19:46,64	0,65
Carson City (S)	10:19:30,85	0,66	10:19:30,60	0,60
	10:19:46,32	0,41	10:19:46,30	0,42
Carson City (B)	10:19:32,47	0,51	10:19:32,20	0,50
	10:19:47,19	0,35	10:19:47,30	0,41
Yerington	10:19:29,42	0,40	10:19:29,30	0,41
	10:19:45,97	0,35	10:19:46,00	0,35
Gardnerville	10:19:29,40	0,42	10:19:29,71	0,46
	10:19:48,35	0,29	10:19:48,07	0,30
Tonopah	10:19:17,49	0,54	10:19:17,23	0,55
	10:19:42,39	0,26	10:19:42,60	0,30
Urbana	10:18:03,76	0,90	10:18:03,61	0,90
	10:18:27,62	0,90	10:18:27,60	0,90

^a Instantes obtidos a partir das curvas de luz deste trabalho; ^b Instantes obtidos a partir das curvas de luz de Marc Buie.

Para cada curva de luz, é obtido uma curva sintética resultante que será comparada aos dados a fim de encontrar o melhor ajuste através da minimização de uma função χ^2 clássica (Eq. 3.4), a fim de se obter o parâmetro livre t_{Occ} , que é o instante de imersão (desaparecimento da estrela) ou de emersão (reaparecimento da estrela). A determinação dos instantes foi feita para cada uma das curvas de luz deste trabalho e para as curvas de Marc Buie. Os instantes determinados e os respectivos erros são dados na Tabela 3.6 e as cordas obtidas são mostradas na Figura 3.14.

$$\chi^2 = \sum_1^N \frac{(\phi_{i,obs} - \phi_{i,calc})^2}{\sigma_i^2} \quad (3.4)$$

com $\phi_{i,obs}$ e $\phi_{i,calc}$ sendo os fluxos observados e calculados, respectivamente, e σ_i a dispersão dos dados.

3.2.4.1 Considerações sobre o instante de tempo da corda de Reno

Como apresentado na Tabela 3.6 e mostrado na Figura 3.14, a corda de Reno apresenta uma indeterminação muito grande no ponto de imersão. Olhando para

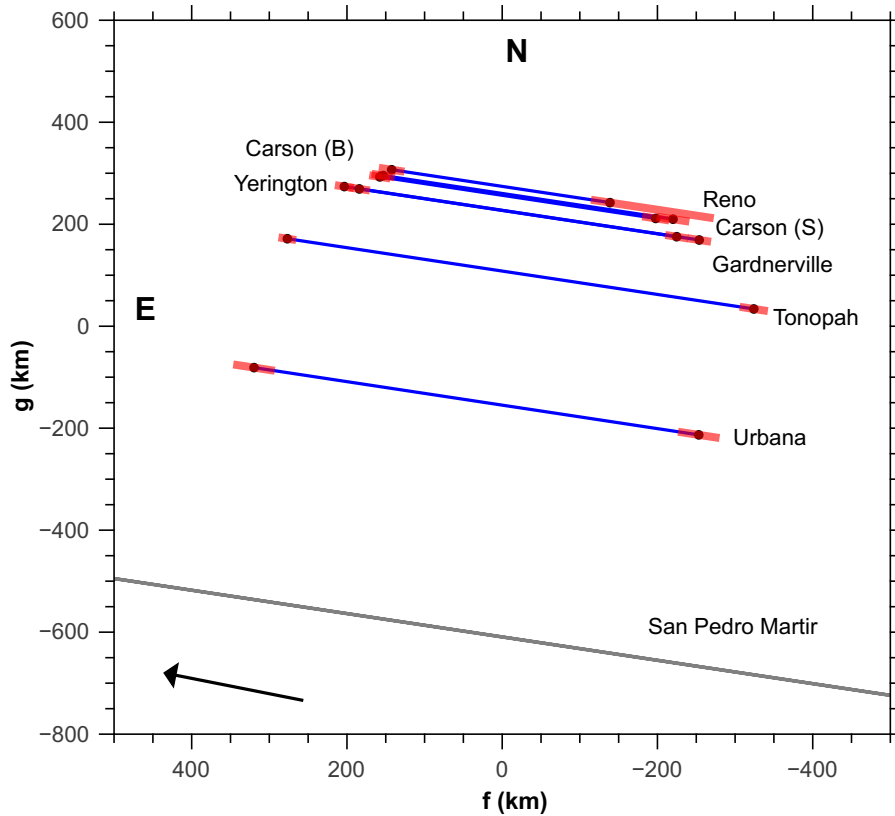


Figura 3.14: Todas as 7 cordas obtidas nas observações da ocultação estelar pelo TNO 2007 UK_{126} . Em vermelho estão as barras de erro ($1-\sigma$, convertidos em km) para cada instante de tempo (Tabela 3.6). As direções Norte e Leste estão indicadas pelas letras ‘N’ e ‘E’, respectivamente, com a seta indicando a direção de movimento do objeto e, portanto, a imersão encontra-se à esquerda e a emersão à direita). Nenhuma ocultação secundária, que poderia ser causada por um satélite, por exemplo, foi observada. Os sítios Carson (S) e Carson (B) estão separados por uma distância de ~ 20 km e possuem quase mesma latitude por isso aparentam estar sobrepostas. O mesmo ocorre para as curvas de Yerington e Gardnerville, que possuem uma distância de ~ 50 km entre os dois locais de observação. As cordas obtidas com os instantes MWB são praticamente idênticas às cordas apresentadas nesta figura e dificilmente seriam distinguíveis visualmente. A barra de erro para a imersão da corda de Reno é grande devido à indeterminação do instante de tempo, como discutido na seção 3.2.4.1.

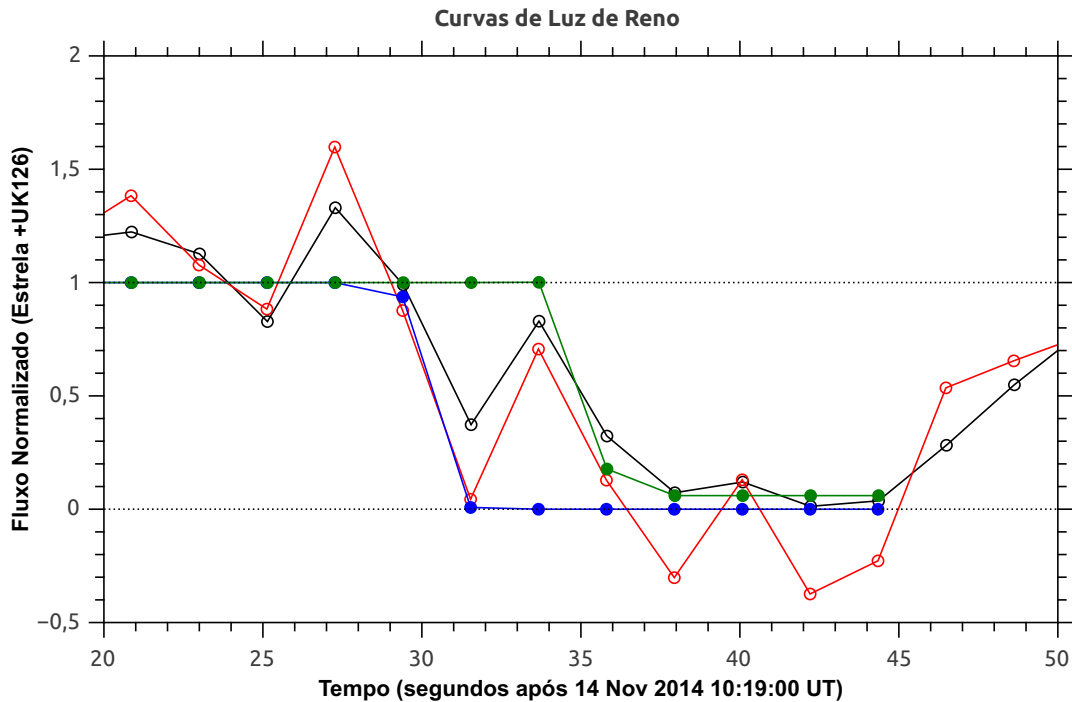


Figura 3.15: Curva de Luz obtida para os dados de Reno. Em preto está a curva de luz de GBR e em vermelho de MWB. O modelo de poço quadrado convoluído com o tamanho angular da estrela, difração de Fresnel e tempo de exposição está em verde para os dados de GBR e em azul para MWB. Note que o ponto em 31 segundos tem um fluxo bastante baixo, fazendo com que o instante de entrada da ocultação para MWB seja determinado antes do instante de entrada para GBR, após 35 s.

as duas curvas de luz deste sítio, reproduzidas na Figura 3.15, é possível notar uma queda de fluxo em um ponto em torno de 30 segundos (após 10:19:00 UT) que faz com que o instante de início da ocultação fique com uma grande incerteza.

Como as duas curvas de luz são igualmente válidas e bastante ruidosas (como é possível notar na Fig. 3.13), não é possível escolher entre um dos valores. O alto nível de ruído em toda a curva de luz é ocasionado principalmente devido à uma contagem de fluxo da estrela estar muito próxima à contagem de céu e quase no limite de detecção da câmera. Passagem de nuvens é outro fator que atrapalhou a obtenção de uma boa curva de luz. Note ainda na Figura 3.13 que existem pontos na curva de luz, tanto de MWB como de GBR, em que o fluxo da estrela fora da ocultação diminui consideravelmente e inclusive alguns atingem quase zero.

Além disso, na determinação do instante de entrada da ocultação espera-se obter uma parábola para a curva de χ^2 , o que não é observado, como mostra a Figura 3.16.

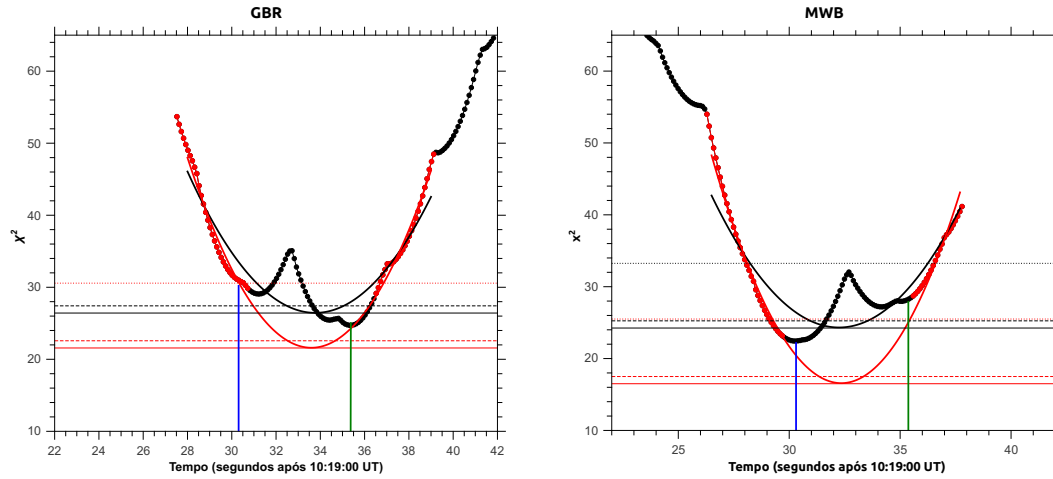


Figura 3.16: Curvas de χ^2 para determinação do instante de entrada da ocultação. Na esquerda pada a curva de luz de GBR e à direita para a curva de luz de MWB. É esperado o comportamento de uma parábola (em preto e vermelho), onde o mínimo apresenta o instante mais provável de início da ocultação. Entretanto, note o comportamento das curvas em preto e em vermelho com dois mínimos, onde um deles coincide com o instante de entrada de GBR (apresentado em verde) e outro de MWB (apresentado em azul). Note ainda que o mínimo das parábolas ajustadas possuem uma determinação de instante de tempo que não coincidem nem em 1-sigma (linhas tracejadas) ou mesmo em 3-sigmas (linhas pontilhadas).

A presença de pelo menos dois mínimos na curva de χ^2 fez com que a determinação do instante de entrada possua uma intereminação grande. Para tentar se obter um melhor valor para o instante, um ajuste quadrático foi aplicado aos dados considerando ou não a parte central incluindo os dois instantes (mostrados em preto e vermelho na Fig. 3.16, respectivamente). O problema encontrado nesta determinação é que os instantes determinados para GBR e MWB só são incluídos no limite da barra de erro em 3σ . Além disso, o instante médio determinado pelas parábolas ajustadas coincide com o ponto com fluxo mais alto apresentado na curva de luz.

Considerando que nenhum dos dois conjuntos de dados tenha uma preferência para ser escolhido, isto é, ambos são igualmente válidos, não é possível determinar qual dos instantes está mais corretamente determinado. Mesmo visualmente é difícil saber qual o real instante da ocultação. Por este motivo, foi adotado uma combinação dos erros para o instante de entrada, isto é, para o instante GBR, há um pequeno erro para mais e um grande erro para menos, enquanto que para o instante MWB ocorre o inverso (grande erro para mais e pequeno para menos). Desta maneira, o ponto fica determinado para os dois conjuntos de dados (apresentado na Tabela 3.6), mas possui um peso menor na determinação do ajuste da elipse.

3.2.5 Ajuste da elipse

Espera-se que os objetos que tem um tamanho da ordem de 1.000 km ou mais tenham atingido o equilíbrio hidrostático. Estes corpos irão assumir a forma de um elipsoide de Maclaurin ou Jacobi (BRAGA-RIBAS, 2013; CHANDRASEKHAR, 1987). Fazendo algumas suposições, o diâmetro crítico para atingir o equilíbrio pode ser determinado, variando de 200 a 900 km para corpos de gelo ou 500 a 1200 km para corpos rochosos (TANCREDI e FAVRE, 2008). Como o 2007 UK_{126} encontra-se dentro destes limites críticos e considerando que ele encontra-se num regime de momento angular pequeno (seu período de rotação é estimado em 11.05 horas, com uma variação de amplitude rotacional de $\Delta m = 0,03 \pm 0,01$ mag (THIROUIN *et al.*, 2014)), podemos considerar que ele assume uma forma de Maclaurin.

A forma que representa a projeção no céu de uma figura de Maclaurin é uma elipse, que possui 5 parâmetros livres a serem ajustados: as coordenadas do centro do corpo, relativo à estrela no plano do céu (f_c, g_c); o semi-eixo maior aparente a' ; o achatamento aparente ϵ' (que está relacionado aos semi-eixos maior a' e menor b' aparentes por $\epsilon' = (a' - b')/a'$); e o ângulo de posição P do semi-eixo menor aparente b' . As quantidades (f_c, g_c), expressas em quilômetros são importantes para a correção orbital do TNO e são positivas para o leste e norte celestes, respectivamente, enquanto P é contado a partir do norte para leste celeste. O achatamento aparente, ϵ' , é o resultado da projeção da figura de Maclaurin com semi-eixos $a = b > c$, onde a e c são os raios equatoriais e polares reais, respectivamente. O achatamento real $\epsilon = 1 - (c/a)$ está relacionado com o achatamento aparente através da equação .

$$\epsilon' = 1 - \sqrt{\cos^2(\xi) + (1 - \epsilon)^2 \cdot \sin^2(\xi)} \quad (3.5)$$

onde ξ é o ângulo entre o eixo polar c e a linha de visada. Esta quantidade é chamada de ‘*polar aspect angle*’ com $\xi = 0^\circ$ (ou respectivamente $\xi = 90^\circ$) correspondendo a uma geometria com visada do polo (ou respectivamente, visada do equador). Ainda podemos expressar o raio do objeto através de seu raio aparente equivalente, R_{eq} , ao invés de utilizar a' . O raio aparente é o raio de um disco que possui a mesma área da elipse aparente e está relacionado com a', b' e o achatamento aparente ϵ' por $R_{eq} = \sqrt{a'b'} = a' \cdot \sqrt{1 - \epsilon'}$.

Considerando as seis observações positivas obtidas, temos os instantes de imersão e emersão (Seção 3.2.4, Tabela 3.6), ou seja, temos $N=14$ extremidades das cordas com suas respectivas posições ($f_{i,obs}, g_{i,obs}$), as quais podemos utilizar para determinar os parâmetros da elipse e, conseqüentemente, a forma do TNO. Os parâmetros são encontrados minimizando uma função clássica χ^2 e analisando seu valor por grau de liberdade ($\chi_{pgl}^2 = \chi^2/(N - M)$). As barras de erro em $1-\sigma$ dos parâmetros são dadas variando-se χ^2 do seu mínimo, χ_{min}^2 para $\chi_{min}^2 + 1$.

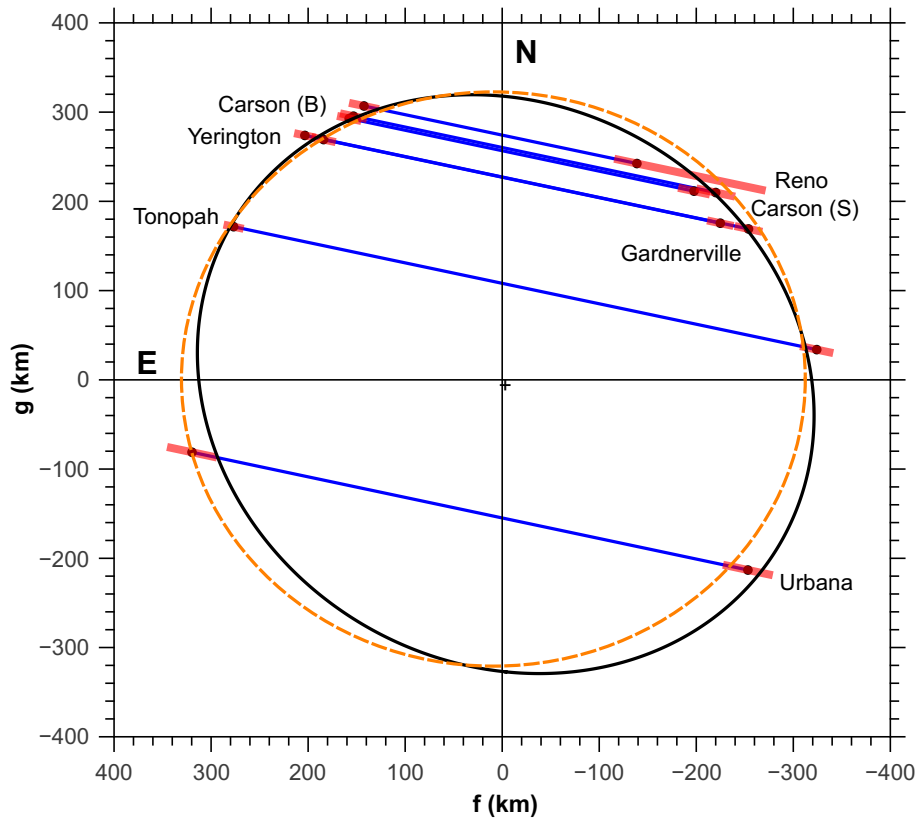


Figura 3.17: **Solução Nominal** - Cordas positivas observadas (azul) e a elipse ajustada (preto) utilizando os instantes de tempo da Tabela 3.6. Os segmentos em vermelho representam as barras de erro em $1-\sigma$ de cada instante. Note que existe um pequeno deslocamento na corda de Urbana. Note também que para Carson City as duas cordas possuem tamanhos diferentes bem como para as cordas de Yerington e Gardnerville. O ajuste circular está representado em laranja e apresenta um χ_{pgl}^2 igual a 1,69, ligeiramente maior que o χ_{pgl}^2 do ajuste da elipse ($\chi_{pgl}^2 = 0,59$).

3.2.5.1 Solução Nominal

Levando em consideração os instantes de imersão e emersão encontrados e seus respectivos erros, foi encontrado uma solução para os parâmetros da elipse, nomeada ‘Solução Nominal’. O ajuste fornece um raio equivalente de $R_{eq} = 319_{-7}^{+14}$ km, um raio equatorial $a = 338_{-10}^{+15}$ km, achatamento $\epsilon' = 0,105_{-0,040}^{+0,050}$ e ângulo de posição $P = 129^{\circ} \text{ }_{-22}^{+14}$. A Figura 3.17 apresenta o ajuste da elipse nas cordas.

Note na Figura 3.17 que as duas curvas de Carson City (‘B’ e ‘S’) apresentam tamanhos ligeiramente diferentes, assim como as curvas de Gardnerville e Yerington, além da curva de Urbana estar consideravelmente deslocada para leste. Por isso, apesar do ajuste estar em acordo em $1-\sigma$ com as cordas, o valor de χ_{pgl}^2 é diferente de

1: $\chi_{pgl}^2 = 0,59$. Considerando que os tempos determinados para imersão e emersão estão corretos, pode-se então assumir que: (1) o ajuste é suficientemente bom para assumir que o TNO possui a forma de uma figura de Maclaurin com os parâmetros determinados; (2) o TNO possui a forma de uma figura de Maclaurin e apresenta características topográficas acentuadas como uma cratera ou montanha de $\sim 100\text{km}$. Uma terceira hipótese é considerar que o TNO é uma figura de Maclaurin, mas há problemas na determinação dos instantes de imersão e emersão.

Assumindo que, por motivos desconhecidos, houve um pequeno deslocamento de tempo nas estações pode-se determinar um novo ajuste para a elipse com parâmetros ligeiramente diferentes. Por isso, essa suposição deve ser levada em consideração somente se houver alguma evidência clara da necessidade de fazer deslocamentos de tempo nas cordas. O fato das observações não poderem ser refeitas torna-se difícil avaliar qual dos locais apresenta maior ou menor erro. Além disso, embora não se espere erros absolutos grandes, a extração das imagens a partir dos vídeos requer uma atenção especial (ver seção 3.2.2) e pode gerar erros grandes nos instantes.

Para realizar uma análise como esta, utiliza-se do fato de que em uma elipse o ponto médio de um conjunto de retas paralelas deve estar alinhado, ou seja, uma linha reta deve passar por todos os pontos médios das cordas com um ângulo α relativo à linha perpendicular às cordas (BRAGA-RIBAS, 2013). Convencionalmente, α aumenta do norte celeste para leste e está contido no intervalo $-90^\circ < \alpha < +90^\circ$ e, por isso, pode representar uma infinidade de elipses. Note que $\alpha = 0$ não significa que o semi-eixo menor da elipse aponta para o norte celeste, já que as cordas estão inclinadas com respeito à direção leste-oeste. Deslocando as cordas no mesmo sentido delas, tem-se que todas as elipses possuem a mesma área e, para $\alpha = 0$ (quando a linha que passa pelo centro é perpendicular às cordas), o raio do círculo fornece o raio equivalente para o TNO.

Realizando pequenos deslocamentos de tempo como este normalmente é possível determinar um ajuste para uma elipse com solução melhor que a nominal. Tais deslocamentos muitas vezes são necessários para que os dados sejam coerentes. Situações com necessidade de deslocamento de tempo já ocorreram diversas vezes, como na ocultação de uma estrela por Caronte em julho de 2015, onde houve necessidade de uma correção de ~ 2 segundos, mesmo o computador estando sincronizado com o GPS. Um outro caso ocorreu na ocultação dupla de Plutão e Caronte em 23 de junho de 2011, quando dois times no mesmo sítios (a 100 metros de distância um do outro) e com telescópios diferentes estavam também ~ 2 segundos de diferença entre eles. Em ambos os casos nunca foi descoberto o motivo dos tempos não estarem corretos⁴. Potanto, apesar de ser um fator sem causa conhecida, é bastante aceitável que um pequeno deslocamento nas cordas possa ser considerado.

⁴Informações obtidas a partir de comunicação privada com o Dr. Bruno Sicardy

Uma análise deste tipo foi realizada nos dados desta ocultação para verificar a possibilidade de uma ou mais cordas estarem deslocadas, porém os deslocamentos de tempo determinados foram da ordem de 1 segundo (cerca de metade do tempo de exposição) para diversos locais, o que é pouco provável de acontecer. Além disso, a solução encontrada possuía um χ_{pgl}^2 maior que a solução nominal e ainda a solução nominal determinada é equivalente à solução obtida por Marc Buie (ver seção 3.2.5.2), utilizando uma outra técnica de extração de vídeo, com curvas de luz e instantes de imersão e emersão ligeiramente diferentes. Por isso, uma solução considerando deslocamentos de tempo pode ser descartada.

3.2.5.2 Solução MWB

Utilizando os instantes de tempo extraídos a partir das curvas de luz obtidas pelo colaborador Marc Buie (MWB), foi obtido uma segunda solução para a forma do TNO. É importante ressaltar que toda a extração de imagens a partir do vídeo e a fotometria foram realizadas através de um processo paralelo e independente, mas a determinação dos instantes e das cordas, bem como o ajuste da elipse foram feitos neste trabalho utilizando metodologia e procedimentos idênticos.

O ajuste da elipse MWB fornece um raio equivalente de $R_{eq} = 319_{-6}^{+12}$ km, um raio equatorial $a = 340_{-8}^{+12}$ km, achatamento $e' = 0,118_{-0,048}^{+0,055}$ e ângulo de posição $P = 134^{\circ}_{-17}^{+14}$ °, além de apresentar um χ_{pgl}^2 igual a 0,56. A Figura 3.18 apresenta o ajuste da elipse nas cordas. Os valores do ajuste da elipse e outras propriedades físicas derivadas (seção 3.2.6) para as duas soluções (GBR e MWB) estão apresentadas na Tabela 3.7.

3.2.6 Propriedades físicas do TNO 2007 UK₁₂₆

Assumindo uma forma de Maclaurin para o 2007 UK₁₂₆, foram obtidas duas soluções. A solução nominal apresenta uma forma bastante similar à solução obtida com os dados de Marc Buie e ambas as soluções apresentam um χ_{pgl}^2 equivalente (0,59 e 0,56, respectivamente). O instante de entrada para a curva de Reno possui uma grande indeterminação devido à baixa razão sinal/ruído da estrela ocultada, além de ter havido passagem de nuvens no local.

Além disso, como o TNO está no limite crítico de equilíbrio hidrostático, não podemos descartar soluções com características topográficas, que ainda são compatíveis com uma figura Maclaurin e não demandam um deslocamento de tempo das detecções, mesmo apresentando um χ_{min}^2 maior.

Para derivar o tamanho dos objetos com grande precisão, as ocultações estelares nos permitem obter valores excelentes com grande precisão, mas a densidade só pode

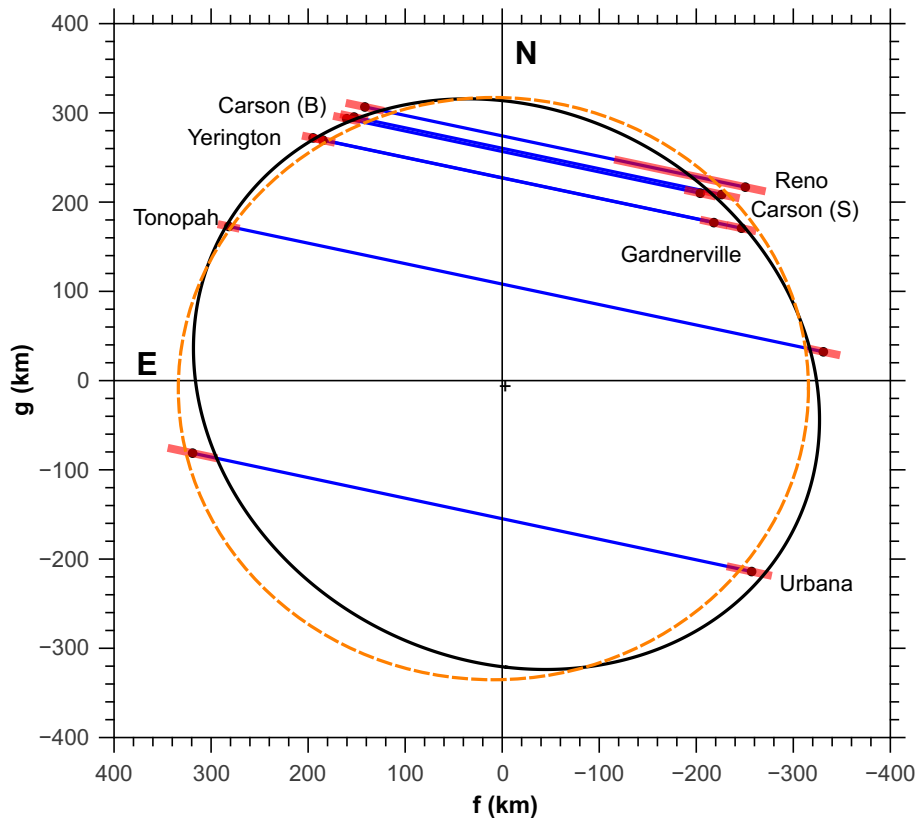


Figura 3.18: Solução MWB - Cordas positivas observadas (azul) e a elipse ajustada (preto) utilizando os instantes de tempo da Tabela 3.6. Os segmentos em vermelho representam as barras de erro em $1-\sigma$ de cada instante. Note que, como nos instantes determinados por GBR, para Carson City as duas cordas possuem tamanhos diferentes bem como para as cordas de Yerington e Gardnerville. O ajuste circular está representado em laranja e apresenta um χ_{pgl}^2 igual a 1,46, ligeiramente maior que o χ_{pgl}^2 do ajuste da elipse ($\chi_{pgl}^2 = 0,56$).

ser derivada se a massa do sistema é conhecida (SICARDY *et al.*, 2011), que não é o caso do 2007 UK₁₂₆. Apesar deste TNO ter um satélite descoberto em 2011 (GRUNDY *et al.*, 2011), as informações disponíveis são insuficientes para obter seu período. Como a massa do sistema é desconhecida, pode-se estimar apenas um limite superior para sua densidade, como discutido em detalhes na seção 3.2.6.1. Outro parâmetro que pode ser determinado é o albedo, que depende do tamanho do objeto e de sua magnitude absoluta, H. Como na literatura foram encontrados dois valores para H, foram também determinados dois valores de albedo para cada uma das soluções obtidas. Mais detalhes sobre a determinação dos valores para o albedo encontra-se na seção 3.2.6.2.

3.2.6.1 Determinação da densidade

Para entender melhor o regime de equilíbrio hidrostático - quando o corpo assume a forma de um esferoide de Maclaurin ou Jacobi - é conveniente definir dois parâmetros adimensionais, Ω e Γ , relacionados à velocidade angular e ao momento angular, respectivamente, obtidos da diferença de acelerações do corpo no equador e no polo (CHANDRASEKHAR, 1987; TANCREDI e FAVRE, 2008):

$$\Omega = \frac{\omega^2}{\pi G \rho} = \frac{(1-\epsilon^2)^{1/2}}{\epsilon^3} \cdot 2 \cdot (3 - 2\epsilon^2) \cdot \sin^{-1}(\epsilon) - \frac{6}{\epsilon^2} \cdot (1 - \epsilon^2) \quad (3.6)$$

$$\Gamma = \frac{L}{(GMa)^{1/2}} = \frac{\sqrt{3}}{5} \cdot \left(\frac{a}{a'}\right)^2 \cdot \Omega \quad (3.7)$$

onde ω é a velocidade angular, G a constante gravitacional ($G = 6,67408 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$), ρ a densidade, ϵ o achatamento, L é o momento angular, M a massa e $a' = (a^2 c)^{1/3}$ é o raio de uma esfera de mesma massa M que o esferoide de semieixos maior igual a a e menor igual a c .

De maneira geral, uma figura de Maclaurin deve satisfazer a equação 3.8 (PLUMMER, 1919):

$$\frac{(\omega a)^2}{GM} = \frac{3 \cdot [2\xi(2 + \cos(2\xi)) - 3 \cdot \sin(2\xi)]}{4 \cdot \sin^3(\xi)} \quad (3.8)$$

com $\cos(\xi) = c/a = 1 - \epsilon$. Substituindo a relação $M = (4\pi a^3 \cos(\xi) \rho)/3$ na equação 3.8, chega-se numa relação entre a densidade ρ , o período de rotação P e o achatamento ϵ (ou ξ) para uma figura de Maclaurin, dada pela equação 3.9:

$$\rho = \frac{4\pi \cdot \sin^3(\xi)}{G \cdot \cos(\xi) \cdot [2\xi(2 + \cos(2\xi)) - 3 \cdot \sin(2\xi)] \cdot P^2} \quad (3.9)$$

Considerando o período de rotação $P = 11.05$ horas, dado por THIROUIN *et al.* (2014), e o valor do achatamento encontrado da ocultação, podemos estimar um valor limite superior para a densidade. O limite é superior pois o TNO pode não

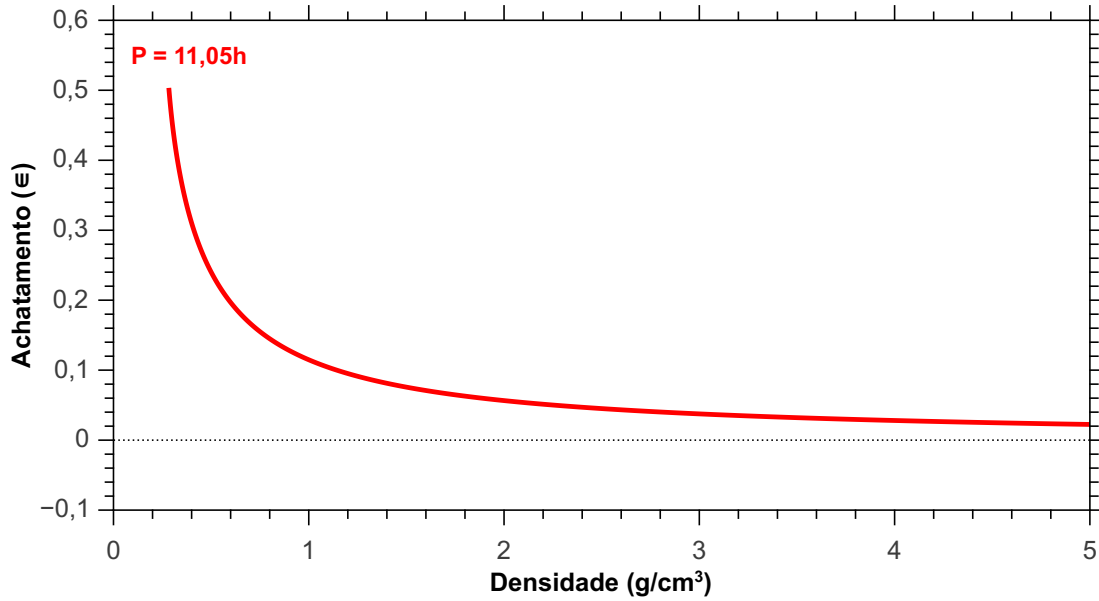


Figura 3.19: Curva de equilíbrio de Maclaurin para um corpo com período de rotação igual a 11.05 horas. Note que conhecendo o achatamento do corpo é possível determinar sua densidade. O inverso também é possível: conhecendo sua densidade, é possível obter seu achatamento.

estar com ângulo de visada no equador, podendo ser mais alongado, logo menos denso. A Figura 3.19 apresenta a curva de equilíbrio de Maclaurin para um corpo com período de rotação de 11.05h.

Utilizando o achatamento da solução nominal temos um limite superior para a densidade de $\rho = 1742 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ou $\rho = 1620 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ no caso da solução MWB. É importante notar que estes valores limites levam em consideração o período de rotação obtido por THIROUIN *et al.* 2014. Como o valor de P não é exato, os resultados obtidos para a densidade pode ser bastante diferente e só se terá um maior nível de confiabilidade quando o período de rotação de seu satélite for determinado.

3.2.6.2 Determinação do albedo

O raio e o albedo estão relacionados pela equação 3.10:

$$p = (UA_{km}/R_{eq})^2 \cdot 10^{0,4 \cdot (H_{\odot} - H)} \quad (3.10)$$

onde $UA_{km} = 1,49598 \cdot 10^8 \text{ km}$, H_{\odot} é a magnitude do Sol a 1 UA, já bem estabelecida como $H_{\odot,V} = -26,76 \pm 0,02$ (BESSELL *et al.*, 1998), e H a magnitude absoluta do objeto. Como na literatura foram encontrados dois valores para a magnitude absoluta do 2007 UK₁₂₆ ($H = 3,4$ de THIROUIN *et al.* (2014) e $H_V = 3,59 \pm 0,04$

Tabela 3.7: Parâmetros físicos do TNO 2007 UK_{126} para as duas soluções estudadas.

Solução	Nominal (GBR)	MWB
Semieixo maior (km)	338^{+15}_{-10}	340^{+12}_{-8}
Raio Equivalente (km)	319^{+14}_{-7}	319^{+12}_{-6}
Raio do ajuste Circular (km)	324^{+27}_{-23}	328^{+26}_{-21}
Achatamento	$0,105^{+0,050}_{-0,040}$	$0,118^{+0,055}_{-0,048}$
f_c (km)	-3699 ± 12	-3699 ± 13
g_c (km)	-3457 ± 13	-3456 ± 13
Ângulo de Posição ($^{\circ}$)	129^{+14}_{-22}	134^{+14}_{-17}
χ_{pgl}^2 (Elipse)	0,59	0,56
χ_{pgl}^2 (Círculo)	1,69	1,46
p_R (Thirouin) ^a	$0,189^{+0,009}_{-0,015}$	$0,189^{+0,008}_{-0,013}$
p_V (Perna) ^b	$0,159^{+0,007}_{-0,013}$	$0,159^{+0,006}_{-0,011}$
Densidade ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$) ^c	< 1742	< 1620

^a p_R (Thirouin) representa p_R utilizando $H_R=3,4$ de Thirouin (2014); ^b p_V (Perna) representa p_V utilizando $H_V=3,59$ de Perna et al. (2010, 2013) ^c Limite superior considerando a rotação nominal de 11.05 horas.

de PERNA *et al.* (2010)), temos também dois valores encontrados para o albedo geométrico para a solução nominal: p_V : $0,189^{+0,009}_{-0,015}$ e $0,159^{+0,007}_{-0,013}$, respectivamente. As barras de erro para o albedo consideram o erro no raio da solução combinado com o erro na magnitude absoluta. É importante ressaltar que a magnitude dada por THIROUIN *et al.* (2014) foi obtida para o filtro R (como dito no início do Capítulo 3).

3.2.6.3 Parâmetros Físicos

Somando os cinco parâmetros ajustados da elipse, do ajuste circular, à densidade e o albedo, temos todos os parâmetros físicos possíveis de se obter com os dados retirados da literatura e a partir desta ocultação. Todos estes parâmetros são dados na Tabela 3.7 para cada uma das soluções obtidas. Note que os valores das duas soluções (nominal e MWB) são bastante similares além dos valores de albedo serem parecidos aos valores já encontrados na literatura.

Capítulo 4

Conclusão

No Capítulo 2 foi apresentado a preparação do pedido de tempo para observações de Chariklo e Chiron com o HST. Os resultados preliminares mostraram que um grande número de surpresas podem surgir. As imagens obtidas de Chariklo apresentam uma estrutura ao seu redor que ainda demanda uma análise muito mais profunda para se compreender, de fato, de que se trata. Além disso, o ângulo de posição e mesmo a presença dos anéis (descobertos em 2013 por BRAGA-RIBAS *et al.* (2014)) ainda não puderam ser confirmadas com o imageamento direto. Os resultados obtidos com estas observações mostram que na subtração de Chariklo os anéis possuem uma grande variação longitudinal, o que não é esperado devido a observações mais recentes de ocultações estelares, ou a presença de um satélite no interior dos anéis pode estar causando uma diferença de brilho causando uma variação na posição do fotocentro ou ainda que está ocorrendo um processo dinâmico ao redor de Chariklo muito mais complexo do que se imagina. As imagens do HST também mostram que não há presença de satélites ou outras estruturas com um limite de magnitude $V \sim 26,1$ a aproximadamente 6400 km do corpo e $V \sim 27$ para satélites mais distantes.

As imagens obtidas com o SPHERE mostraram também uma estrutura não esperada para Chariklo. Entretanto, ainda é preciso analisar as imagens obtidas com outros filtros.

Para Chiron, até o momento somente duas visitas foram realizadas pelo HST e ainda não foi possível realizar uma análise preliminar. Após a terceira visita, agendada para o segundo semestre de 2016, espera-se obter informações para se determinar ou indicar qual a melhor explicação para as estruturas observadas ao redor do corpo: anéis, jatos ou casca de material. Além disso, da mesma forma que realizado para Chariklo, limites para a presença de anéis ou outras estruturas mais distantes do corpo poderão ser determinadas.

Através de uma ocultação estelar pelo TNO 2007 UK_{126} , ocorrida em 2014 e observada por diversos astrônomos profissionais e amadores, foi possível determinar

seu tamanho e forma aparente, como apresentado no Capítulo 3. Com um raio equivalente $R_{eq} = 319_{-7}^{+14}$ km e achatamento igual a $0,105_{-0,040}^{+0,050}$, seu albedo foi calculado como sendo $0,159_{-0,013}^{+0,007}$. Devido à falta de informação sobre o período orbital de seu satélite, sua massa não pode ser determinada. Conseqüentemente, por possuir apenas o período de rotação do corpo, ainda mal determinado, somente um limite superior para sua densidade foi obtido, sendo $\rho = 1742 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ para um período de rotação nominal de 11,05h.

É importante observar que, mesmo com o uso de telescópios espaciais e técnicas que fornecem informações bastante precisas e acuradas, como a de ocultações estelares, existe uma grande dificuldade em se observar e extrair informações dos objetos mais distantes no Sistema Solar. Diversos imprevistos podem surgir como a observação de estruturas inesperadas, erros de aquisição de tempo inexplicáveis, além da falta de informação sobre os objetos, mesmo por outras técnicas. Portanto, obter novos dados destes objetos não apenas nos fornece informações gerais para modelos de formação planetária, mas também provêem um cenário local e único para cada corpo.

Referências Bibliográficas

- [1] ALVAREZ-CANDAL, A., FORNASIER, S., BARUCCI, M. A., et al., 2008, “Visible spectroscopy of the new ESO large program on trans-Neptunian objects and Centaurs. Part 1”, *A&A*, v. 487 (ago.), pp. 741–748. doi: 10.1051/0004-6361:200809705.
- [2] ALVAREZ-CANDAL, A., ORTIZ, J. L., MORALES, N., et al., 2014, “Stellar occultation by (119951) 2002 KX₁₄ on April 26, 2012”, *A&A*, 571:A48. doi: 10.1051/0004-6361/201424648.
- [3] 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”, *A&A*, 515:A32. doi: 10.1051/0004-6361/200913690.
- [4] ASSAFIN, M., VIEIRA MARTINS, R., CAMARGO, J. I. B., et al., 2011, “PRAIA - Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically”. In: Tanga, P., Thuillot, W. (Eds.), *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*, pp. 85–88, jun.
- [5] ASSAFIN, M., CAMARGO, J. I. B., VIEIRA MARTINS, R., et al., 2012, “Candidate stellar occultations by large trans-Neptunian objects up to 2015”, *A&A*, 541:A142. doi: 10.1051/0004-6361/201118349.
- [6] AUDELA, 2016. “Audela Software”. Disponível em: <<http://audela.org/>>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [7] BARUCCI, M. A., LAZZARIN, M., TOZZI, G. P., 1999, “Compositional Surface Variety among the Centaurs”, *AJ*, v. 117 (abr.), pp. 1929–1932. doi: 10.1086/300822.
- [8] BATYGIN, K., BROWN, M. E., FRASER, W. C., 2011, “Retention of a Primordial Cold Classical Kuiper Belt in an Instability-Driven Model of Solar System Formation”, *ApJ*, 738:13. doi: 10.1088/0004-637X/738/1/13.

- [9] BELSKAYA, I. N., BAGNULO, S., BARUCCI, M. A., et al., 2010, “Polarimetry of Centaurs (2060) Chiron, (5145) Pholus and (10199) Chariklo”, *Icarus*, v. 210 (nov.), pp. 472–479. doi: 10.1016/j.icarus.2010.06.005.
- [10] BENECCHI, S. D., NOLL, K. S., GRUNDY, W. M., et al., 2010, “(47171) 1999 TC₃₆, A transneptunian triple”, *Icarus*, v. 207 (jun.), pp. 978–991. doi: 10.1016/j.icarus.2009.12.017.
- [11] BESSELL, M. S., CASTELLI, F., PLEZ, B., 1998, “Model atmospheres broadband colors, bolometric corrections and temperature calibrations for O - M stars”, *A&A*, v. 333 (maio), pp. 231–250.
- [12] BRAGA-RIBAS, F., 2013. “Explorando os Objetos Trans-Netunianos pelo Método de Ocultações Estelares - Predição, Observação, Quaoar e os Primeiros Resultados”. Tese de Doutorado.
- [13] BRAGA-RIBAS, F., SICARDY, B., COLAS, F., et al., 2011, “Stellar Occultation by Transneptunian Object (208996) 2003 AZ84”, *Central Bureau Electronic Telegrams*, v. 2675 (mar.), pp. 1.
- [14] BRAGA RIBAS, F., SICARDY, B., ORTIZ, J. L., et al., 2012, “Stellar Occultations by Large TNOs on 2012: The February 3rd by (208996) 2003 AZ84, and the February 17th by (50000) Quaoar”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, v. 44, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 402.01, out.
- [15] 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*, 773:26. doi: 10.1088/0004-637X/773/1/26.
- [16] BRAGA-RIBAS, F., SICARDY, B., ORTIZ, J. L., et al., 2014, “A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo”, *Nature*, v. 508 (abr.), pp. 72–75. doi: 10.1038/nature13155.
- [17] BROWN, M., 2012, *How I Killed Pluto and Why I Had it Coming*. Spiegel & Grau. ISBN: 0385531109.
- [18] BROWN, M. E., 2001, “The Inclination Distribution of the Kuiper Belt”, *AJ*, v. 121 (maio), pp. 2804–2814. doi: 10.1086/320391.
- [19] BROWN, M. E., 2012, “The Compositions of Kuiper Belt Objects”, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 40 (maio), pp. 467–494. doi: 10.1146/annurev-earth-042711-105352.

- [20] BROWN, M. E., 2013, “The Density of Mid-sized Kuiper Belt Object 2002 UX25 and the Formation of the Dwarf Planets”, *ApJ*, 778:L34. doi: 10.1088/2041-8205/778/2/L34.
- [21] BROWN, M. E., KORESKO, C. D., 1998, “Detection of Water Ice on the Centaur 1997 CU₂₆”, *APJL*, v. 505 (set.), pp. L65–L67. doi: 10.1086/311593.
- [22] BROWN, M. E., TRUJILLO, C., RABINOWITZ, D., 2004, “Discovery of a Candidate Inner Oort Cloud Planetoid”, *ApJ*, v. 617 (dez.), pp. 645–649. doi: 10.1086/422095.
- [23] BROWN, M. E., RAGOZZINE, D., STANSBERRY, J., et al., 2010, “The Size, Density, and Formation of the Orcus-Vanth System in the Kuiper Belt”, *AJ*, v. 139 (jun.), pp. 2700–2705. doi: 10.1088/0004-6256/139/6/2700.
- [24] BROWN, R. H., CRUIKSHANK, D. P., PENDLETON, Y., et al., 1998, “Identification of Water Ice on the Centaur 1997 CU26”, *Science*, v. 280 (maio), pp. 1430. doi: 10.1126/science.280.5368.1430.
- [25] BUIE, M. W., KELLER, J. M., 2016, “The Research and Education Collaborative Occultation Network: A System for Coordinated TNO Occultation Observations”, *AJ*, 151:73. doi: 10.3847/0004-6256/151/3/73.
- [26] BUIE, M. W., KELLER, J. M., 2016. “RECON - Research and Education Collaborative Occultation Network”. Disponível em: <<http://tnorecon.net/>>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [27] BURNS, J. A., LAMY, P. L., SOTER, S., 1979, “Radiation forces on small particles in the solar system”, *Icarus*, v. 40 (out.), pp. 1–48. doi: 10.1016/0019-1035(79)90050-2.
- [28] BUS, S. J., BUIE, M. W., SCHLEICHER, D. G., et al., 1996, “Stellar Occultation by 2060 Chiron”, *Icarus*, v. 123 (out.), pp. 478–490. doi: 10.1006/icar.1996.0173.
- [29] CAMARGO, J. I. B., VIEIRA-MARTINS, R., ASSAFIN, M., et al., 2014, “Candidate stellar occultations by Centaurs and trans-Neptunian objects up to 2014”, *A&A*, 561:A37. doi: 10.1051/0004-6361/201322579.
- [30] CHANDRASEKHAR, S., 1987, *Ellipsoidal Figures of Equilibrium*. New York: Dover Pubns. ISBN: 0486652580.
- [31] CHIANG, E. I., JORDAN, A. B., 2002, “On the Plutinos and Twotinos of the Kuiper Belt”, *AJ*, v. 124 (dez.), pp. 3430–3444. doi: 10.1086/344605.

- [32] CLARK, R. N., CRUIKSHANK, D. P., JAUMANN, R., et al., 2012, “The surface composition of Iapetus: Mapping results from Cassini VIMS”, *Icarus*, v. 218 (abr.), pp. 831–860. doi: 10.1016/j.icarus.2012.01.008.
- [33] COMBI, M. R., HARRIS, W. M., SMYTH, W. H., 2004, “Gas dynamics and kinetics in the cometary coma: theory and observations”. In: *Comets II*, pp. 523–552, -, Festou, M. C. and Keller, H. U. and Weaver, H. A.
- [34] ČUK, M., RAGOZZINE, D., NESVORNÝ, D., 2013, “On the Dynamics and Origin of Haumea’s Moons”, *AJ*, 146:89. doi: 10.1088/0004-6256/146/4/89.
- [35] DAWSON, R. I., MURRAY-CLAY, R., 2012, “Neptune’s Wild Days: Constraints from the Eccentricity Distribution of the Classical Kuiper Belt”, *ApJ*, 750:43. doi: 10.1088/0004-637X/750/1/43.
- [36] DELL’ORO, A., CAMPO BAGATIN, A., BENAVIDEZ, P. G., et al., 2013, “Statistics of encounters in the trans-Neptunian region”, *A&A*, 558:A95. doi: 10.1051/0004-6361/201321461.
- [37] DI SISTO, R. P., BRUNINI, A., 2007, “The origin and distribution of the Centaur population”, *Icarus*, v. 190 (set.), pp. 224–235. doi: 10.1016/j.icarus.2007.02.012.
- [38] DORESSOUNDIRAM, A., PEIXINHO, N., DE BERGH, C., et al., 2002, “The Color Distribution in the Edgeworth-Kuiper Belt”, *AJ*, v. 124 (out.), pp. 2279–2296. doi: 10.1086/342447.
- [39] DOTTO, E., BARUCCI, M. A., LEYRAT, C., et al., 2003, “Unveiling the nature of 10199 Chariklo: near-infrared observations and modeling”, *Icarus*, v. 164 (jul.), pp. 122–126. doi: 10.1016/S0019-1035(03)00103-9.
- [40] DUFFARD, R., PINILLA-ALONSO, N., ORTIZ, J. L., et al., 2014, “Photometric and spectroscopic evidence for a dense ring system around Centaur Chariklo”, *A&A*, 568:A79. doi: 10.1051/0004-6361/201424208.
- [41] DUNCAN, M. J., LEVISON, H. F., BUDD, S. M., 1995, “The Dynamical Structure of the Kuiper Belt”, *AJ*, v. 110 (dez.), pp. 3073. doi: 10.1086/117748.
- [42] ELLIOT, J. L., YOUNG, L. A., 1992, “Analysis of stellar occultation data for planetary atmospheres. I - Model fitting, with application to Pluto”, *AJ*, v. 103 (mar.), pp. 991–1015. doi: 10.1086/116121.

- [43] ELLIOT, J. L., DUNHAM, E. W., BOSH, A. S., et al., 1989, “Pluto’s atmosphere”, *Icarus*, v. 77 (jan.), pp. 148–170. doi: 10.1016/0019-1035(89)90014-6.
- [44] ELLIOT, J. L., OLKIN, C. B., DUNHAM, E. W., et al., 1995, “Jet-like features near the nucleus of Chiron”, *Nature*, v. 373 (jan.), pp. 46–49. doi: 10.1038/373046a0.
- [45] ELLIOT, J. L., KERN, S. D., CLANCY, K. B., et al., 2005, “The Deep Ecliptic Survey: A Search for Kuiper Belt Objects and Centaurs. II. Dynamical Classification, the Kuiper Belt Plane, and the Core Population”, *AJ*, v. 129 (fev.), pp. 1117–1162. doi: 10.1086/427395.
- [46] 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*, v. 465 (jun.), pp. 897–900. doi: 10.1038/nature09109.
- [47] FANALE, F. P., SALVAIL, J. R., 1997, “The Cometary Activity of Chiron: A Stratigraphic Model”, *Icarus*, v. 125 (fev.), pp. 397–405. doi: 10.1006/icar.1996.5623.
- [48] FERNANDEZ, J. A., IP, W.-H., 1981, “Dynamical evolution of a cometary swarm in the outer planetary region”, *Icarus*, v. 47 (set.), pp. 470–479. doi: 10.1016/0019-1035(81)90195-0.
- [49] FERNÁNDEZ, Y. R., JEWITT, D. C., SHEPPARD, S. S., 2002, “Thermal Properties of Centaurs Asbolus and Chiron”, *AJ*, v. 123 (fev.), pp. 1050–1055. doi: 10.1086/338436.
- [50] FORNASIER, S., LELLOUCH, E., MÜLLER, T., et al., 2013, “TNOs are Cool: A survey of the trans-Neptunian region. VIII. Combined Herschel PACS and SPIRE observations of nine bright targets at 70-500 μm ”, *A&A*, 555: A15. doi: 10.1051/0004-6361/201321329.
- [51] FORNASIER, S., LAZZARO, D., ALVAREZ-CANDAL, A., et al., 2014, “The Centaur 10199 Chariklo: investigation into rotational period, absolute magnitude, and cometary activity”, *A&A*, 568:L11. doi: 10.1051/0004-6361/201424439.
- [52] GLADMAN, B., MARSDEN, B. G., VANLAERHOVEN, C., 2008, “Nomenclature in the Outer Solar System”. In: *The Solar System Beyond Neptune*, pp. 43–57, -, Barucci, M. A.; Boehnhardt, H.; Cruikshank, D. P.; Morbidelli, A. and Dotson, R.

- [53] GOMES, R., LEVISON, H. F., TSIGANIS, K., et al., 2005, “Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets”, *Nature*, v. 435 (maio), pp. 466–469. doi: 10.1038/nature03676.
- [54] GOMES, R. S., 2003, “The origin of the Kuiper Belt high-inclination population”, *Icarus*, v. 161 (fev.), pp. 404–418. doi: 10.1016/S0019-1035(02)00056-8.
- [55] GOMES, R. S., FERNANDEZ, J. A., GALLARDO, T., et al., 2008, “The Scattered Disk: Origins, Dynamics, and End States”. In: *The Solar System Beyond Neptune*, pp. 259–273, -, Barucci, M. A.; Boehnhardt, H.; Cruikshank, D. P.; Morbidelli, A. and Dotson, R.
- [56] GRUNDY, W. M., STANSBERRY, J. A., NOLL, K. S., et al., 2007, “The orbit, mass, size, albedo, and density of (65489) Ceto/Phorcys: A tidally-evolved binary Centaur”, *Icarus*, v. 191 (nov.), pp. 286–297. doi: 10.1016/j.icarus.2007.04.004.
- [57] GRUNDY, W. M., BENECCHI, S. D., BUIE, M. W., et al., 2011, “A New NAO Survey Program: Mutual Orbits and Masses of Kuiper Belt Binaries”. In: *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, p. 1078, out.
- [58] GRUNDY, W. M., BENECCHI, S. D., RABINOWITZ, D. L., et al., 2012, “Mutual events in the Cold Classical transneptunian binary system Sila and Nunam”, *Icarus*, v. 220 (jul.), pp. 74–83. doi: 10.1016/j.icarus.2012.04.014.
- [59] GRUNDY, W. M., PORTER, S. B., BENECCHI, S. D., et al., 2015, “The mutual orbit, mass, and density of the large transneptunian binary system Varda and Ilmarë”, *Icarus*, v. 257 (set.), pp. 130–138. doi: 10.1016/j.icarus.2015.04.036.
- [60] GUILBERT, A., BARUCCI, M. A., BRUNETTO, R., et al., 2009, “A portrait of Centaur 10199 Chariklo”, *A&A*, v. 501 (jul.), pp. 777–784. doi: 10.1051/0004-6361/200911660.
- [61] GUILBERT-LEPOUTRE, A., 2011, “A Thermal Evolution Model of Centaur 10199 Chariklo”, *AJ*, 141:103. doi: 10.1088/0004-6256/141/3/103.
- [62] HAHN, J. M., MALHOTRA, R., 2005, “Neptune’s Migration into a Stirred-Up Kuiper Belt: A Detailed Comparison of Simulations to Observations”, *AJ*, v. 130 (nov.), pp. 2392–2414. doi: 10.1086/452638.

- [63] HARTMANN, W. K., CRUIKSHANK, D. P., DEGEWIJ, J., et al., 1981, “Surface materials on unusual planetary object Chiron”, *Icarus*, v. 47 (set.), pp. 333–341. doi: 10.1016/0019-1035(81)90181-0.
- [64] HARTMANN, W. K., THOLEN, D. J., MEECH, K. J., et al., 1990, “2060 Chiron - Colorimetry and cometary behavior”, *Icarus*, v. 83 (jan.), pp. 1–15. doi: 10.1016/0019-1035(90)90002-Q.
- [65] HEDMAN, M. M., NICHOLSON, P. D., CUZZI, J. N., et al., 2013, “Connections between spectra and structure in Saturn’s main rings based on Cassini VIMS data”, *Icarus*, v. 223 (mar.), pp. 105–130. doi: 10.1016/j.icarus.2012.10.014.
- [66] HORNER, J., EVANS, N. W., BAILEY, M. E., et al., 2003, “The populations of comet-like bodies in the Solar system”, *MNRAS*, v. 343 (ago.), pp. 1057–1066. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06714.x.
- [67] HORNER, J., EVANS, N. W., BAILEY, M. E., 2004, “Simulations of the population of Centaurs - I. The bulk statistics”, *MNRAS*, v. 354 (nov.), pp. 798–810. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08240.x.
- [68] IAU, 2016. “IAU Resolution B5 - Definition of a Planet in the Solar System”. Disponível em: <https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [69] IPATOV, S. I., A’HEARN, M. F., 2006, “Velocities of Material Ejected from Comet Tempel 1”. In: Mackwell, S., Stansbery, E. (Eds.), *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, v. 37, *Lunar and Planetary Inst. Technical Report*, mar.
- [70] IPATOV, S. I., A’HEARN, M. F., DEEP IMPACT TEAM, 2006, “Velocities of Dust Particles Ejected from Comet Tempel 1”. In: *IAU Joint Discussion*, v. 10, *IAU Joint Discussion*, ago.
- [71] KOWAL, C., DRESSLER, A., ADAMS, R., et al., 1977, “1977 UB (Slow-Moving Object Kowal)”, *IAU Circular*, v. 3134 (nov.), pp. 6.
- [72] LELLOUCH, E., SANTOS-SANZ, P., LACERDA, P., et al., 2013, “‘TNOs are Cool’: A survey of the trans-Neptunian region. IX. Thermal properties of Kuiper belt objects and Centaurs from combined Herschel and Spitzer observations”, *A&A*, 557:A60. doi: 10.1051/0004-6361/201322047.

- [73] LEVISON, H. F., MORBIDELLI, A., 2003, “The formation of the Kuiper belt by the outward transport of bodies during Neptune’s migration”, *Nature*, v. 426 (nov.), pp. 419–421.
- [74] LEVISON, H. F., STERN, S. A., 2001, “On the Size Dependence of the Inclination Distribution of the Main Kuiper Belt”, *AJ*, v. 121 (mar.), pp. 1730–1735. doi: 10.1086/319420.
- [75] LEVISON, H. F., DONES, L., DUNCAN, M. J., 2001, “The Origin of Halley-Type Comets: Probing the Inner Oort Cloud”, *AJ*, v. 121 (abr.), pp. 2253–2267. doi: 10.1086/319943.
- [76] LEVISON, H. F., MORBIDELLI, A., VAN LAERHOVEN, C., et al., 2008, “Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune”, *Icarus*, v. 196 (jul.), pp. 258–273. doi: 10.1016/j.icarus.2007.11.035.
- [77] LORENZ, R. D., 2002, “Thermodynamics of Geysers: Application to Titan”, *Icarus*, v. 156 (mar.), pp. 176–183. doi: 10.1006/icar.2001.6779.
- [78] LUU, J. X., JEWITT, D. C., 1990, “Cometary activity in 2060 Chiron”, *AJ*, v. 100 (set.), pp. 913–932. doi: 10.1086/115571.
- [79] LYKAWKA, P. S., MUKAI, T., 2007, “Dynamical classification of trans-neptunian objects: Probing their origin, evolution, and interrelation”, *Icarus*, v. 189 (jul.), pp. 213–232. doi: 10.1016/j.icarus.2007.01.001.
- [80] LYKAWKA, P. S., MUKAI, T., 2008, “An Outer Planet Beyond Pluto and the Origin of the Trans-Neptunian Belt Architecture”, *AJ*, v. 135 (abr.), pp. 1161–1200. doi: 10.1088/0004-6256/135/4/1161.
- [81] MARSDEN, B. G., 1992, “1992 QB1”, *IAU Circular*, v. 5633 (out.), pp. 1.
- [82] MEECH, K. J., BELTON, M. J. S., 1989, “(2060) Chiron”, *IAU Circular*, v. 4770 (abr.), pp. 1.
- [83] MEECH, K. J., BUIE, M. W., SAMARASINHA, N. H., et al., 1997, “Observations of Structures in the Inner Coma of Chiron with the HST Planetary Camera”, *AJ*, v. 113 (feb.), pp. 844–862. doi: 10.1086/118305.
- [84] MOMMERT, M., HARRIS, A. W., KISS, C., et al., 2012, “TNOs are cool: A survey of the trans-Neptunian region. V. Physical characterization of 18 Plutinos using Herschel-PACS observations”, *A&A*, 541:A93. doi: 10.1051/0004-6361/201118562.

- [85] MONET, D. G., LEVINE, S. E., CANZIAN, B., et al., 2003, “The USNO-B Catalog”, *AJ*, v. 125 (fev.), pp. 984–993. doi: 10.1086/345888.
- [86] MORBIDELLI, A., 2005, “Origin and Dynamical Evolution of Comets and their Reservoirs”, *ArXiv Astrophysics e-prints*, (dez.).
- [87] MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F., 2007, “Kuiper Belt. Dynamics”. In: *AAS/Division for Extreme Solar Systems Abstracts*, pp. 589–604, -, McFadden, L.-A. A.; Weissman, P. R. and Johnson, T. V. doi: 10.1016/B978-012088589-3/50036-0.
- [88] MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F., TSIGANIS, K., et al., 2005, “Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System”, *Nature*, v. 435 (maio), pp. 462–465. doi: 10.1038/nature03540.
- [89] MORENO, F., POZUELOS, F., ACEITUNO, F., et al., 2012, “Comet 22P/Kopff: Dust Environment and Grain Ejection Anisotropy from Visible and Infrared Observations”, *ApJ*, 752:136. doi: 10.1088/0004-637X/752/2/136.
- [90] MPC, 2016a. “Minor Planet Center - List Of Centaurs and Scattered-Disk Objects”. Disponível em: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/t_centaurs.html>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [91] MPC, 2016b. “Minor Planet Center - List Of Transneptunian Objects”. Disponível em: <<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/TNOs.html>>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [92] MPC, 2016c. “Minor Planet Center - Plot of the Outer Solar System”. Disponível em: <<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/OuterPlot.html>>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [93] MÜLLER, T. G., LELLOUCH, E., BÖHNHARDT, H., et al., 2009, “TNOs are Cool: A Survey of the Transneptunian Region”, *Earth Moon and Planets*, v. 105 (set.), pp. 209–219. doi: 10.1007/s11038-009-9307-x.
- [94] MÜLLER, T. G., LELLOUCH, E., STANSBERRY, J., et al., 2010, ““TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region. I. Results from the Herschel science demonstration phase (SDP)”, *A&A*, 518:L146. doi: 10.1051/0004-6361/201014683.
- [95] MURDIN, P. (Ed.), 2000, “Cubewano”. In: MURDIN, P. (Ed.), *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, p. 5403, -, -, nov. doi: 10.1888/0333750888/5403.

- [96] NASA/JPL, 2016. “JPL Small-Body Database Browser”. Disponível em: <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [97] NOGUEIRA, E., BRASSER, R., GOMES, R., 2011, “Reassessing the origin of Triton”, *Icarus*, v. 214 (jul.), pp. 113–130. doi: 10.1016/j.icarus.2011.05.003.
- [98] NOLL, K. S., GRUNDY, W. M., CHIANG, E. I., et al., 2008, “Binaries in the Kuiper Belt”. In: *The Solar System Beyond Neptune*, pp. 345–363, -, Barucci, M. A.; Boehnhardt, H.; Cruikshank, D. P.; Morbidelli, A. and Dotson, R.
- [99] NOLL, K. S., GRUNDY, W. M., BENECCHI, S. D., et al., 2009, “Discovery of Eighteen Transneptunian Binaries”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #41*, v. 41, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 47.07, set.
- [100] ORTIZ, J. L., SICARDY, B., BRAGA-RIBAS, F., et al., 2012, “Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation”, *Nature*, v. 491 (nov.), pp. 566–569. doi: 10.1038/nature11597.
- [101] ORTIZ, J. L., DUFFARD, R., PINILLA-ALONSO, N., et al., 2015, “Possible ring material around centaur (2060) Chiron”, *A&A*, 576:A18. doi: 10.1051/0004-6361/201424461.
- [102] PAN, M., WU, Y., 2016, “On the mass and origin of Chariklo’s rings”, *ArXiv e-prints*, (fev.).
- [103] PARKER, A., PINILLA-ALONSO, N., SANTOS-SANZ, P., et al., 2015, “Physical Characterization of TNOs with JWST”, *ArXiv e-prints*, (nov.).
- [104] PARKER, A. H., KAVELAARS, J. J., 2010, “Pencil-beam surveys for trans-neptunian objects: Limits on distant populations”, *Icarus*, v. 209 (out.), pp. 766–770. doi: 10.1016/j.icarus.2010.04.018.
- [105] PEIXINHO, N., LACERDA, P., JEWITT, D., 2008, “Color-Inclination Relation of the Classical Kuiper Belt Objects”, *AJ*, v. 136 (nov.), pp. 1837–1845. doi: 10.1088/0004-6256/136/5/1837.
- [106] PERNA, D., BARUCCI, M. A., FORNASIER, S., et al., 2010, “Colors and taxonomy of Centaurs and trans-Neptunian objects”, *A&A*, 510:A53. doi: 10.1051/0004-6361/200913654.

- [107] PERNA, D., DOTTO, E., BARUCCI, M. A., et al., 2013, “Photometry and taxonomy of trans-Neptunian objects and Centaurs in support of a Herschel key program”, *A&A*, 554:A49. doi: 10.1051/0004-6361/201219859.
- [108] PERSON, M. J., ELLIOT, J. L., BOSH, A. S., et al., 2011, “Constraints On The Size Of KBO (50000) Quaoar From A Single-chord Stellar Occultation”. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts #218*, p. 224.12, maio.
- [109] PETIT, J.-M., KAVELAARS, J. J., GLADMAN, B., et al., 2008, “Size Distribution of Multikilometer Transneptunian Objects”. In: *The Solar System Beyond Neptune*, pp. 71–87, -, Barucci, M. A.; Boehnhardt, H.; Cruikshank, D. P.; Morbidelli, A. and Dotson, R.
- [110] PLUMMER, H. C., 1919, “Maclaurin ellipsoids, On the ellipticities of the”, *MNRAS*, v. 80 (nov.), pp. 26. doi: 10.1093/mnras/80.1.26.
- [111] PRIALNIK, D., BROSCHE, N., IANOVICI, D., 1995, “Modelling the activity of 2060 Chiron”, *MNRAS*, v. 276 (out.), pp. 1148–1154. doi: 10.1093/mnras/276.4.1148.
- [112] ROBERT JOHNSTON, 2016. “Known populations of solar system objects”. . Disponível em: <<http://www.johnstonsarchive.net/astro/sslist.html>>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [113] ROBERT JOHNSTON, 2016. “List of Known Trans-Neptunian Objects”. . Disponível em: <<http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [114] RUPRECHT, J. D., BOSH, A. S., PERSON, M. J., et al., 2015, “29 November 2011 stellar occultation by 2060 Chiron: Symmetric jet-like features”, *Icarus*, v. 252 (maio), pp. 271–276. doi: 10.1016/j.icarus.2015.01.015.
- [115] SALLUM, S., BROTHERS, T., ELLIOT, J. L., et al., 2011, “First Observations of a Stellar Occultation by KBO (50000) Quaoar from MIT’s George R. Wallace, Jr., Astrophysical Observatory”. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts #218*, p. 224.13, maio.
- [116] SANTOS-SANZ, P., LELLOUCH, E., FORNASIER, S., et al., 2012, “‘TNOs are Cool’: A survey of the trans-Neptunian region. IV. Size/albedo characterization of 15 scattered disk and detached objects observed with Herschel-PACS”, *A&A*, 541:A92. doi: 10.1051/0004-6361/201118541.

- [117] SANTOS-SANZ, P., FRENCH, R. G., PINILLA-ALONSO, N., et al., 2016, “James Webb Space Telescope Observations of Stellar Occultations by Solar System Bodies and Rings”, *PASP*, v. 128 (jan.), pp. 959. doi: 10.1088/1538-3873/128/959/018011.
- [118] SCHWAMB, M. E., BROWN, M. E., RABINOWITZ, D., et al., 2008, “2007 UK126”, *Minor Planet Electronic Circulars*, (fev.), pp. 38.
- [119] SHEPPARD, S. S., UDALSKI, A., TRUJILLO, C., et al., 2011, “A Southern Sky and Galactic Plane Survey for Bright Kuiper Belt Objects”, *AJ*, 142: 98. doi: 10.1088/0004-6256/142/4/98.
- [120] SHEPPARD, S. S., RAGOZZINE, D., TRUJILLO, C., 2012, “2007 TY430: A Cold Classical Kuiper Belt Type Binary in the Plutino Population”, *AJ*, 143:58. doi: 10.1088/0004-6256/143/3/58.
- [121] SHOWALTER, M. R., LISSAUER, J. J., 2006, “The Second Ring-Moon System of Uranus: Discovery and Dynamics”, *Science*, v. 311 (fev.), pp. 973–977. doi: 10.1126/science.1122882.
- [122] SICARDY, B., COLAS, F., MAQUET, L., et al., 2010, “The 2010, February 19 stellar occultation by Varuna”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*, v. 42, *Bulletin of the American Astronomical Society*, p. 993, out.
- [123] 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*, v. 478 (out.), pp. 493–496. doi: 10.1038/nature10550.
- [124] SODERBLOM, L. A., BECKER, T. L., KIEFFER, S. W., et al., 1990, “Triton’s geyser-like plumes - Discovery and basic characterization”, *Science*, v. 250 (out.), pp. 410–415. doi: 10.1126/science.250.4979.410.
- [125] SPOHN, T., BREUER, D., T., J., 2014, “Encyclopedia of the Solar System”. 3 ed., cap. 5, p. 945, -, Elsevier, 7. ISBN: 9780124158450.
- [126] STANSBERRY, J., GRUNDY, W., BROWN, M., et al., 2008, “Physical Properties of Kuiper Belt and Centaur Objects: Constraints from the Spitzer Space Telescope”. In: *The Solar System Beyond Neptune*, pp. 161–179, -, Barucci, M. A.; Boehnhardt, H.; Cruikshank, D. P.; Morbidelli, A. and Dotson, R.
- [127] STANSBERRY, J. A., GRUNDY, W. M., MUELLER, M., et al., 2012, “Physical properties of trans-neptunian binaries (120347) Salacia-Actaea

- and (42355) Typhon-Echidna”, *Icarus*, v. 219 (jun.), pp. 676–688. doi: 10.1016/j.icarus.2012.03.029.
- [128] STERN, A., CAMPINS, H., 1996, “Chiron and the Centaurs: escapees from the Kuiper belt”, *Nature*, v. 382 (ago.), pp. 507–510. doi: 10.1038/382507a0.
- [129] STSCI, 2016a. “Space Telescope Science Institute - Hubble Space Telescope”. Disponível em: <<http://www.stsci.edu/hst>>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [130] STSCI, 2016b. “Space Telescope Science Institute - Hubble Space Telescope Exposure Time Calculator”. Disponível em: <<http://etc.stsci.edu/etc/input/wfc3uvis/imaging/>>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [131] STSCI, 2016c. “Space Telescope Science Institute - Hubble Space Telescope Primer”. Disponível em: <http://www.stsci.edu/hst/proposing/documents/primer/Ch_2_Systemoverview2.html>. [Online; Acessado em 20-Jan-2016].
- [132] STSCI, 2015. “The STScI Reduction and Calibration Pipeline”. <http://www.stsci.edu/hst/wfc3/documents/handbooks/currentIHB/appendixE2.html>.
- [133] TANCREDI, G., FAVRE, S., 2008, “Which are the dwarfs in the Solar System?” *Icarus*, v. 195 (jun.), pp. 851–862. doi: 10.1016/j.icarus.2007.12.020.
- [134] TEGLER, S. C., 2007, “Kuiper Belt Objects. Physical Studies”. In: *AAS/Division for Extreme Solar Systems Abstracts*, pp. 605–620, -, McFadden, L.-A. A. and Weissman, P. R. and Johnson, T. V. doi: 10.1016/B978-012088589-3/50037-2.
- [135] TEGLER, S. C., ROMANISHIN, W., 2000, “Extremely red Kuiper-belt objects in near-circular orbits beyond 40 AU”, *Nature*, v. 407 (out.), pp. 979–981.
- [136] THIROUIN, A., NOLL, K. S., ORTIZ, J. L., et al., 2014, “Rotational properties of the binary and non-binary populations in the trans-Neptunian belt”, *A&A*, 569:A3. doi: 10.1051/0004-6361/201423567.
- [137] THOLEN, D. J., BUIE, M. W., GRUNDY, W. M., et al., 2008, “Masses of Nix and Hydra”, *AJ*, v. 135 (mar.), pp. 777–784. doi: 10.1088/0004-6256/135/3/777.

- [138] TICHA, J., TICHY, M., MORAVEC, Z., et al., 1997, “1997 CU26”, *Minor Planet Electronic Circulars*, (abr.), pp. 6.
- [139] TOMBAUGH, C. W., 1946, “The Search for the Ninth Planet, Pluto”, *Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 5, pp. 73.
- [140] TSIGANIS, K., GOMES, R., MORBIDELLI, A., et al., 2005, “Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System”, *Nature*, v. 435 (maio), pp. 459–461. doi: 10.1038/nature03539.
- [141] VAN BELLE, G. T., 1999, “Predicting Stellar Angular Sizes”, *PASP*, v. 111 (dez.), pp. 1515–1523. doi: 10.1086/316462.
- [142] VILENIUS, E., KISS, C., MOMMERT, M., et al., 2012, “‘TNOs are Cool’: A survey of the trans-Neptunian region. VI. Herschel/PACS observations and thermal modeling of 19 classical Kuiper belt objects”, *A&A*, 541:A94. doi: 10.1051/0004-6361/201118743.
- [143] VILENIUS, E., KISS, C., MÜLLER, T., et al., 2014, “‘TNOs are Cool’: A survey of the trans-Neptunian region. X. Analysis of classical Kuiper belt objects from Herschel and Spitzer observations”, *A&A*, 564:A35. doi: 10.1051/0004-6361/201322416.
- [144] WARNER, B. D., HARRIS, A. W., PRAVEC, P., 2009, “The asteroid light-curve database”, *Icarus*, v. 202 (jul.), pp. 134–146. doi: 10.1016/j.icarus.2009.02.003.
- [145] YELLE, R. V., SODERBLOM, L. A., JOKIPII, J. R., 2004, “Formation of jets in Comet 19P/Borrelly by subsurface geysers”, *Icarus*, v. 167 (jan.), pp. 30–36. doi: 10.1016/j.icarus.2003.08.020.
- [146] ZACHARIAS, N., MONET, D. G., LEVINE, S. E., et al., 2004, “The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD)”. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, v. 36, *Bulletin of the American Astronomical Society*, p. 1418, dez.

Apêndice A

Pedidos de tempo para o HST

Neste apêndice são apresentados os pedidos de tempo submetidos para observações de Chariklo e Chiron com o HST nas fases 1 e 2, bem como as notificações de aceite dos pedidos. As informações presentes nos textos deste apêndice estão também apresentadas em detalhes no Capítulo 2.

A.1 Fase 1: Observação dos aneis de Chariklo e arredores de Chiron (Observation of Chariklo's rings and the surroundings of Chiron)

Observation of Chariklo's rings and the surroundings of Chiron

Scientific Category: SOLAR SYSTEM

Scientific Keywords: Asteroids, Dynamics, Planetary Satellites

Instruments: WFC3

Proprietary Period: 12

Proposal Size: Small

Orbit Request

Prime

Parallel

Cycle 22

6

0

Abstract

Dense and sharply confined rings have recently been discovered during a stellar occultation around the small Centaur object Chariklo (Braga-Ribas et al., 2014). This is the first body after the giant planets found to possess a ring system. We propose to use HST to (1) obtain direct images of the rings, confirming their existence and their orientation, (2) derive multi-wavelength photometry, thus constraining their composition (concerning in particular the presence of water ice), (3) perform for the first time a deep search of small satellites and (4) faint dusty rings around Chariklo, and (5) search for material around another Centaur similar to Chariklo, Chiron, which is known to be surrounded by cometary material and narrow jets. The presence (or absence) of satellites and dusty material around Chariklo will discriminate the various theoretical models that are invoked to explain the origin, evolution and stability of rings around this minor body. The motion of putative Chariklo satellites will also provide an estimation of the mass of the primary, from which its density can be derived, which eventually tells us where the rings are relative to Chariklo's Roche limit.

B Sicardy : Observation of Chariklo's rings and the surroundings of Chiron

Investigators:

	Investigator	Institution	Country
PI*&	B Sicardy	Observatoire de Paris and Paris 6 university	FRA
CoI*	G Benedetti-Rossi	Observatoire de Paris - Section de Meudon	FRA
CoI*	C Dumas	European Southern Observatory - Chile	CHL
CoI	F Braga-Ribas	Observatorio Nacional	BRA
CoI*	J Ortiz	Instituto de Astrofisica de Andalucia (IAA)	ESP
CoI*	D Gratadour	Observatoire de Paris - Section de Meudon	FRA
CoI#	M Buie	Southwest Research Institute	USA/TX
CoI	J Camargo	Observatorio Nacional	BRA

Number of investigators: 8

* ESA investigators: 5

US Admin CoI: M Buie

& Phase I contacts: 1

Target Summary:

Target	RA	Dec	Magnitude
CHARIKLORING			V = 20 +/- 0.2
CHIRON			V = 18.7 +/- 0.2

Observing Summary:

Target	Config Mode and Spectral Elements	Flags	Orbits
CHARIKLORING	WFC3/UVIS Imaging F475X		3
	WFC3/UVIS Imaging F300X		
	WFC3/UVIS Imaging F350LP		
CHIRON	WFC3/UVIS Imaging F350LP	DUP	3

Total prime orbits: 6

● Scientific Justification

A stellar occultation by the Centaur object (10199) Chariklo observed on 3 June 2013 revealed the surprising presence of two narrow and dense rings around this minor planet (Braga-Ribas et al. 2014, BR14 hereafter). For the first time ever, rings are now observed around a small body, and not exclusively around the giant planets. This discovery suggests that rings are a more common features than previously thought and shows a large diversity among minor bodies. Chariklo's rings are sharply confined (see below), like those of Uranus, and thus must obey universal confinement processes. New theoretical studies will be triggered to better understand how rings appear around small bodies. In that context, the Hubble Space Telescope is a unique instrument to provide new and key information on Chariklo's rings and their surroundings.

Chariklo is the largest Centaur object known to date (diameter $\sim 248 \pm 18$ km, Fornasier et al. 2013). It moves on an elliptic orbit between Saturn and Uranus, and will be at about 14.1 Astronomical Units (AU) from Earth at opposition in June 2015. Contrarily to its analog Chiron, another Centaur with similar size and orbit, Chariklo does not show cometary activity.

Chariklo is surrounded by two narrow rings with widths 7 km and 3 km, normal optical depths 0.4 and 0.06, and orbital radii 391 and 405 km, respectively. They are separated by a gap of about 9 km with normal optical depth $\tau < 0.004$ (BR14 and Fig. 1). One of the possible ring pole positions implies that they were observed edge-on in 2007-2008, providing a simple explanation to the so far unexplained gradual dimming of Chariklo's system between 1996 and 2008 (Belskaya et al. 2010). This also explains the gradual disappearance during that period of the $2 \mu\text{m}$ water ice band and the spectral slope below $0.5 \mu\text{m}$. This is indirect evidence that water ice is present in the ring particles. BR14 estimate that the ring reflectivity I/F is about 0.1, three times larger than Chariklo's geometric albedo ($p = 0.035$, Fornasier et al 2013). The estimated mass of the rings corresponds to that of an icy body with radius of about one kilometer. If the rings are confined by classical "shepherding moons", they should have typical radii of a few kilometers or more in order to counteract the viscous spreading of each ring (BR14).

We propose to use WCF3/UVIS on board HST to obtain deep images of Chariklo immediate surroundings. Goals are: **(1)** detect the ring ansae on each side of Chariklo, confirming their existence and position angle; **(2)** obtain the first direct, multi-wavelength photometric measurements of the rings, thus constraining their composition; **(3)** perform a deep search to detect or provide upper limits for the presence of satellite(s) inside Chariklo Hill's sphere; **(4)** detect or provide upper limit for faint dusty rings around Chariklo; and **(5)** detect or provide upper limit for material around Chiron, another Centaur object similar to Chariklo.

(1) Detection of the rings. Fig. 1 (left panel) shows the expected geometry of the rings at opposition, in June 2015. As explained later in the description of observations, detecting the ring ansae will allow us to determine their position angle, and thus directly confirm the geometry deduced from the occultation.

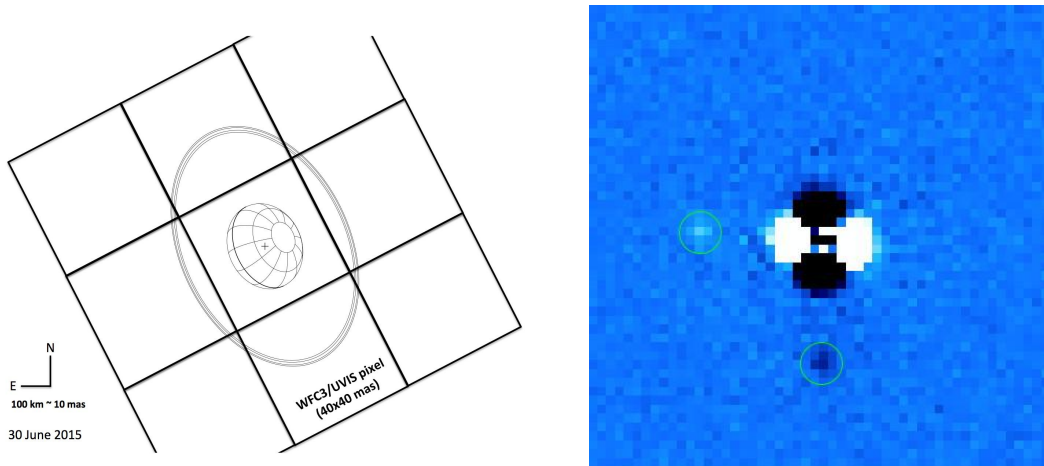


Fig. 1 Left: Expected size and orientation of Chariklo’s ring system at opposition in 2015. The boxes represent the WFC3/UVIS pixel size (40x40mas). **Right:** Simulated data showing the detection of the rings ansae using the difference between two sets of nine stacked 170-second exposures. The rings show up as excess signal when the central PSF (Chariklo) is removed. Using the rotation between epochs, the first epoch ring image comes out as a positive (white) excess of light and in the second image it comes out dark but rotated by 90 degrees. A satellite with $V=27$ (corresponding to a body of a few km across) has also been included and appears at 2 arcsec left of Chariklo (clear spot in green circle), and at 2 arcsec below Chariklo (dark spot in green circle).

2) Photometry of the rings. Photometry through the filters F300X, F475X and F350LP will constrain the ring composition, and in particular, confirm the presence of water ice by showing the spectral slope below $0.55 \mu\text{m}$, as observed in Saturn’s rings (Hedman et al. 2013), and indirectly inferred from Chariklo’s spectra (BR14, Guilbert et al. 2009 and Guilbert-Lepoutre 2011).

(3) Detection of small satellites near Chariklo. Km-sized satellites near the rings will be indistinguishable from possible longitudinal ring brightness variations. However, satellites (or their absence) observed farther away from Chariklo can tell us about the possible scenarios of ring formation and confinement (among others: impact from outside, material ejected from the surface, satellite tidal disruption). Note that on a longer term, the satellite motion will provide Chariklo’s mass, then its density, which eventually will tell us where the rings are relative to Chariklo’s Roche limit. At perihelion (13.1 AU), and with a typical mass of 10^{19} kg, Chariklo Hill’s sphere radius is $r_H \sim 230,000$ km relative to the Sun. Satellites can survive at typically 30% of that distance from the primary, and we may expect to see satellites at most at $\sim 70,000$ km (~ 7 arcsec from the main body). Chariklo’s orbit is controlled by Uranus (Horner *et al.* 2004), and must get closer than about 2.1×10^7 km from the giant planet for satellites at 70,000 km to be torn away from Chariklo’s gravity field during a Uranus encounter (BR14). The probability for such an encounter is a few percent (Nogueira et al. 2011). Thus, most satellites closer than 70,000 km from Chariklo should survive the perturbing effects from both the Sun and Uranus. In June 2015, Chariklo will be at 14.1 AU from Earth and 15.1 AU from the Sun. The apparent magnitude of a satellite with radius R_{km} and geometric albedo p will be $V \sim 25.8 - 2.5 \cdot \log_{10}(p \cdot R_{km}^2)$. Taking a

limit $V \sim 27$ translates into a limiting size of a couple of kilometers in radius, assuming a geometric albedo similar to that of the main ring reflectivity, $p \sim 0.1$ (BR14).

(4) Detection of dusty rings. Micrometeoroid bombardment on putative satellites may maintain faint dusty rings around Chariklo. For instance, two tenuous rings (μ and ν) with optical depths $\tau \sim (0.5-1) \times 10^{-6}$, associated with small moons, have been observed around Uranus in HST images (Showalter and Lissauer, 2006). A ring of optical depth τ composed of particles of albedo p has a reflectivity $I/F = p \cdot \tau$, and a magnitude per pixel of $V \sim 25.8 - 2.5 \cdot \log_{10}(I/F \cdot A) = 25.8 - 2.5 \cdot \log_{10}(p \cdot \tau \cdot A)$, where A is the projected surface area (in km^2) occupied by the ring inside an individual 40×40 mas-pixel. We can estimate $A \sim W \cdot L$, where $L \sim 400$ km is the side of a pixel projected at Chariklo and W is the width of the ring. A lower limit for W is twice the Hill sphere radius r_H of the associated satellite. For instance, for a ~ 2 km-radius icy satellite orbiting at 20,000 km (2 arcsec) from the primary, we obtain $W \sim 2r_H \sim 400$ km. Taking $p \sim 0.1$ (BR14) and a limiting magnitude of $V \sim 27$ per pixel, we obtain a detection threshold of $\tau \sim 2 \cdot 10^{-5}$ per pixel for the optical depth of a dusty ring. This limit can be reduced drastically by integrating the flux at all longitudes around Chariklo. For instance, a dusty ring with radius 20,000 km will be distributed over more than 100 pixels, reducing the detection threshold to $\tau \sim$ a few 10^{-6} , similar to Uranus' μ and ν rings optical depths.

(5) Detection of material around Chiron. Chiron is the second largest known Centaur object (diameter 218 ± 20 km, Fornasier et al. 2013) and similar orbit compared to Chariklo. Stellar occultations observed in 1993 (Bus et al. 1996), 1994 (Elliot et al. 1994) and 2011 (Ruprecht et al 2013) revealed the presence of material around Chiron that was interpreted as confined jet-like features, more diffuse coma material or even near circular arcs or spherical shell. We propose here a deep search for material and satellites near Chiron, with a sensitivity that will be much higher than that obtained by HST in 1993 (Meech et al. 1997). The overall strategy to observe Chiron will be exactly the same as for Chariklo.

References

- Belskaya et al. 2010, *Icarus* **210**, 472
Braga-Ribas et al. 2014, *Nature* **508**, 72
Bus et al. 1996, *Icarus* **123**, 478
Elliot et al. 1994, *Nature*, **373**, 46
Fornasier et al. 2013, *Astron. Astrophys.* **555**, A15
Guilbert et al. 2009, *Astron. Astrophys.* **501**, 777
Guilbert-Lepoutre 2011, *Astron. J.* **141**, 103
Hedman et al. 2013, *Icarus* **223**, 105
Horner et al. 2004, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **354**, 798
Meech et al. 1997, *Astron. J.* **113**, 844
Nogueira et al. 2011, *Icarus* **214**, 113
Ruprecht et al. 2013, DPS meeting abstract **45**, #414.07
Showalter and Lissauer 2006, *Science* **311**, 973

• Description of the Observations

I. Observations of Chariklo rings

With a diameter of about 250 km, Chariklo subtends 25 milliarcsec (mas) on the sky, while the rings span a diameter of about 800 km (or 80 mas). The expected geometry of the rings at opposition (June 2015), corresponds to an opening angle $B=43^\circ$ and position angle $P=-64^\circ$, see Fig. 1. From BR14, the total rings apparent area should represent about 25% of that of Chariklo, while reflecting $\sim 75\%$ of Chariklo's flux as they are about three times brighter. Consequently, each ring ansa will have an estimated flux that represents about 20% of Chariklo's flux in the visible (Fig. 1). Taking images with the CCD rows aligned with the ring longer axis, then rotating the telescope by 90° and subtracting the resulting images will eliminate Chariklo's contribution and reveal the ring ansae and their position angle. As Chariklo can be considered as a point source with $V_{\text{mag}}=18.5$, the ring ansa will each correspond to point sources of $V_{\text{mag}}=20$ that appear clearly in the simulation shown in Fig 1 (right panel).

Assuming a ring spectrum similar to that of the Sun (Kurucz G2V), with standard zodiacal light, standard Earth shine light and average Air Glow, the Exposure Time Calculator provides the exposure times for each filter as follows:

- F300X: 200 seconds exposure - aggregate (two exposures) SNR=50 on Chariklo;
- F475X: 7 seconds exposure - SNR=50 (per exposure) on Chariklo;
- F350LP: 170 seconds exposure - SNR=1.4 on $V_{\text{mag}}=28$ and SNR=3.5 on $V_{\text{mag}}=27$ with 90% of saturation on Chariklo. ETC SNR assumes no contamination from Chariklo. The limiting magnitudes will get brighter inward of 2 arcsec from the central body.

I.1) Target acquisition strategies

The strategy to provide direct images of Chariklo's rings is to choose the roll angle of HST so that the pixel array on the camera is aligned with the apparent ellipse of the rings, see Fig. 1. The ring position angle can be specified for any particular date (at opposition, the position angle will be $P=-64^\circ$). We will dither all exposures using optimal standard patterns based on the total number of exposures for each filter. Since we have a small (7 arcsec) region of interest, we will use the UVIS2-C512C-SUB aperture to permit getting more images per visit. The use of the F475X filter is to detect the rings in the visible, complementing the images on UV taken with the F300X filter. In particular, we want to confirm the water ice spectral slope below 5000 Angstrom, so the use of these two filters is needed. The broader F350LP filter is used for a deep search for additional rings or satellites. The available time in each visit will reach as faint as $V=28$, or down to a few km in size.

A satellite with orbital radius r_{km} has a period of $T \sim 10^{-4} \cdot (r_{\text{km}})^{1.5}$ days, estimating Chariklo's mass to $\sim 10^{19}$ kg (icy body with radius 125 km). As we can detect satellites between

typically 20,000 and 70,000 km from the primary (see discussion above), T ranges from 8 months to about 5 years. During one week, the satellite will move respectively by 3,500 and 1,900 km, respectively, corresponding to about 9 and 5 pixels for the two extreme cases examined here.

After a few days, we plan to observe Chariklo on two more visits. The time between each visit is dictated by HST for the camera to roll 90 degrees (the U3 angle). Using the same strategy as the first orbit, but with a 90 degrees roll difference on the camera, we can use Chariklo to subtract itself out and remove the wings of the PSF, letting us see the rings and also to try to detect the motion of possible satellites. To confirm a possible detection of satellites, a third visit after a few days is planned, having 0 or 180 degrees roll on the U3 angle (compared to the first orbit). For the three orbits, the same strategy of observation will be used (the only difference is the roll angle).

Time distribution for each of the three orbits, checked to ensure that it fits in a single visibility window, is shown on Table 1A.

Table 1A – Image sequence for an individual visit* using WFC3/UVIS on Chariklo.

Action	Time (seconds)	Explanation
2 science exposures (F475X filter)	$2 \times 7 = 14$	Acquire science image using F475X filter and subarrays SUB C512C
2 science exposures (F300X filter)	$2 \times 200 = 400$	Acquire science image using F300X filter and subarrays SUB C512C
9** science exposures (F350LP filter)	$9 \times 170 = 1530$	Acquire science images using F350LP filter and subarrays SUB C512C. No dither between images. Chariklo at 90% of saturation.

* Orbit 2 must have a 90 degrees roll and orbit 3 must have a 180 degrees roll on the U3 angle (compared to the U3 angle from orbit 1).

** The number of science exposures or exposure duration using F350LP filter can be adjusted to better fit the actual visibility window.

II. Observations of Chiron: deep search for material

The Centaur object Chiron is a little bit smaller than Chariklo, with a diameter of 218 ± 20 km (Fornasier et al. 2013), and it subtends about 17 mas on the sky (vs. 25 mas for Chariklo). We want to detect diffuse coma material, some circular arcs or spherical shell and/or the presence of a small satellite. Since it has similar angular size and magnitude at opposition, it is possible to use the same strategy as Chariklo.

Assuming a spectrum similar to that of the Sun (Kurucz G2V), with standard zodiacal light, standard Earth shine light and average Air Glow, the Exposure Time Calculator requires

170 seconds exposure time using the F350LP filter, for a SNR of 50 on Chiron. This will give nearly 90% saturation on Chiron and we can reach SNR=1.4 on Vmag=28 and SNR=3.5 on Vmag=27.

II.1) Target acquisition strategies

For Chiron, we plan to use only the F350LP filter for a deep search for circular arcs, spherical shells and/or satellites. The available time will reach as faint as V=28, or down to a few km in size. We plan to observe it in three visits, separated by a few days (time between each visit is dictated by HST for the camera to roll 90 degrees (the U3 angle)) to try to detect the movement of possible satellites.

Each Chiron visit has its time distribution organized as follows:

Table 1B – Image sequence for an individual visit* using WFC3/UVIS on Chiron.

Action	Time (seconds)	Explanation
12** science exposures (F350LP filter)	12 x 200 = 2200	Acquire science images using F350LP filter and subarray UVIS2-C512C-SUB.

* Orbit 2 must have a 90 degrees roll and orbit 3 must have a 180 degrees roll on the U3 angle (compared to the U3 angle from orbit 1).

** The number of science exposures or exposure duration using F350LP filter can be adjusted to better fit the actual visibility window.

● Special Requirements

The roll requirement for the Chariklo and Chiron observations leads to fairly tight scheduling restrictions and will need to be done near opposition at the time of the fastest rate of change of nominal roll. This roll constraint pattern was checked with APT to verify that there were schedulable opportunities for this plan. The time between each orbit is dictated entirely by the 90 degree roll offset required. The actual time will be chosen during phase II. Note that the ecliptic latitude of Chariklo is high enough that there is no opportunity to get any desired roll in a short time.

Working nearer to opposition helps minimize the problems of background star contamination for Chariklo. During the deep exposures, the stars will be moving fast enough that field star contamination will affect single exposures, not the entire set. Comparable sets of data have been taken on the Pluto system in similarly crowded fields and very few images have been compromised. Nonetheless, we will reserve the option of checking during phase II to avoid times when a field star might affect the observations.

The Chiron observations have the same roll requirements. In spite of Chiron's background field is not dense of stars as is Chariklo's, the roll requirement leads to fairly tight scheduling restrictions and will need to be done near opposition.

- **Coordinated Observations**

None. This item does not apply to our proposal.

- **Justify Duplications**

Duplications were checked both for Chariklo and Chiron. Chariklo has never been observed with HST. For Chiron, 5 previous programs were found but all of them are different from our proposal. One of these programs used the F555W filter on the Planetary Camera (pre-COSTAR) to study the presence of a coma and its activity (Meech et al. HST Cycle 2 proposal 3769). This pre-COSTAR run, however, did not have the sufficient quality to search for faint resolved structures (jets, arcs, shell, small satellites) as we intend to do now.

- **Past HST Usage**

No past HST usage for the PI.

A.2 Notificação de aceite de pedido de tempo para o Ciclo 22 - Observação dos aneis de Chariklo

Date: Mon, 23 Jun 2014 22:38:38 -0400
From: blacker@stsci.edu
To: bruno.sicardy@obspm.fr
Cc:mlink@stsci.edu, hst13713@stsci.edu, gustavo.rossi@obspm.fr, cdumas@eso.org, ribas@on.br, ortiz@iaa.es, damien.gratadour@obspm.fr, buie@boulder.swri.edu, camargo@on.br
Subject: Cycle 22 HST Phase I Notification Letter

Bruno Sicardy
Observatoire de Paris and Paris 6 university
FRA

June 23, 2014

Dear Dr. Sicardy,

We are pleased to inform you that your Hubble Space Telescope Cycle 22 proposal

Title: Observation of Chariklo's rings and the surroundings of
Chiron
ID: 13713

has been approved for Hubble Space Telescope Cycle 22 General Observer time, following detailed consideration by the Cycle 22 Peer Review Panels and final review by the STScI Director. Your proposal was graded in the first quintile of proposals in your Panel, with the first quintile being the top proposals before the panel.

The allocations approved for your program in Phase I are:

3 Primary Spacecraft Orbits in Cycle 22

Comments from the peer review may be found at the end of this message. All Phase I allocations are tentative, subject to successful Phase II submissions and feasibility/duplication reviews. If your Phase II program includes targets or exposures that duplicate those in the published protected lists, they will be eliminated unless specifically justified in your Phase I proposal and supported by specific TAC/Panel recommendations. Of course, all allocations depend upon the satisfactory operation of the observatory, as well as the availability of appropriate scheduling opportunities. In addition, parallel time depends on the existence of an applicable primary pointing, and future-cycle allocations are contingent on review for progress by STScI. The Panel/TAC were instructed to recommend only those parallel and future-cycle requests that were justified scientifically. Note that all SHADOW orbits granted have the restricted visibility discussed in the Phase I Call for Proposals (i.e., you will only be able to utilize that portion of the orbit when the spacecraft is in the Earth's shadow).

Cycle 22 will have a duration of approximately one year, beginning October 01, 2014 and ending on September 30, 2015. For your information, 884 GO proposals

requested almost 20,000 orbits in Cycle 22, compared to the 3600 orbits available. A total of 51 snapshot proposals requested over 5400 targets, compared to the approximately 1000 targets approved and a total of 200 Archival Research, Archive Legacy, and Theory proposals requested approximately 18 million dollars, about five times the amount available for these categories.

You will soon receive a separate email specifying the procedures and deadlines for your Phase II submission. These procedures and deadlines are important. It is your responsibility to write and to submit an error-free Phase II proposal by the deadline so that we can efficiently schedule your observations. We usually cannot support Phase II proposals submitted after the deadline; late proposals mean forfeiture of your HST allocation.

To help you, specific STScI staff have been assigned to support your Phase II activities. Your Program Coordinator (PC),

Miranda Link (mlink@stsci.edu), 410-338-2486

will assist you throughout the development, implementation and scheduling of your Phase II HST program. Your PC is your primary contact person with STScI from proposal development through execution. If you feel you need special assistance with scientific and instrument-related questions, you may request that a Contact Scientist be assigned to your program; a subsequent email from your PC will explain how to request a CS.

A detailed Phase II budget is also required from all U.S. investigators to support the reduction and analysis of Cycle 22 data.

Budget Submission Information

Deadline: The budget deadline for General Observer (GO) and Archival Researcher (AR) Programs is Thursday, July 24, 2014 (5 p.m. your local time). This is a hard deadline and will not be extended. All eligible investigators will soon receive a reminder from the STScI Grants Administration Office.

Questions regarding budget preparation: Email gms_mail@stsci.edu or call 410.338.4200.

Electronic Budget Preparation, Submission, and Allowable Costs:

Budgets must be submitted electronically using the Space Telescope Grants Management System (STGMS), <https://stgms.stsci.edu> Contact the Sponsored Research Office or appropriate representative at your institution for assistance with your budget preparation. Information regarding budget preparation and allowable costs can be found at <http://www.stsci.edu/institute/grants>.

Program Funding: Funding that may be subsequently approved for this Program is contingent upon the availability of funds from the National Aeronautics and Space Administration (NASA).

The program scope may not be changed at this time unless specifically recommended in the review comments. Following a financial review in August, a separate notification pertaining to the actual funding allocated to each program will be sent to U.S. Investigators.

Historically, the NASA Office of Space Science (OSS) Education and Public Outreach (E/PO) has allocated approximately 2% of the yearly Hubble Space Telescope (HST) GO/AR budget to E/PO funding. The spirit of the HST E/PO Grant Program is to encourage collaboration between professional astronomers/space scientists and professional educators that would broaden the knowledge and understanding of the latest discoveries of the Hubble Space Telescope. While we do not yet know if such funding will be available for Cycle 22, we encourage you to consider submitting an E/PO request by the August 20, 2014 deadline for E/PO proposals. Please see the HST Call for Proposals for details.

Congratulations on the success of your proposal in the stringent Phase I review, and best wishes for your future participation in and contributions to the scientific program of HST.

Sincerely,

Matt Mountain
Director

Strengths: The proposal requests WFC3 UVIS time to image the newly discovered ring system around the Centaur Chariklo. The ring was discovered via stellar occultation, at a radii of about 400km from Chariklo's center. Similar observations are requested to find inner-coma or ring features around Chiron, and possible satellites around both large Centaurs. -> HST provides the best opportunity to image these features. The proposal carefully selects the best approach to obtain signal from the ring, and attempts to compensate for background stars from the crowded field in which Chariklo presently resides. An intricate technique will be utilized whereby two images taken at different rotation angles will be self-subtracted. -> Hubble's sensitivity with respect to the search for satellites around small bodies lends additional incentive to conduct these observations, since satellites seem to often coexist with ring systems. -> The inner coma of Chiron has been a much-debated topic. Chiron is active throughout its orbit. It is large enough that it can gravitationally re-capture large-grained dust (i.e. that which is significantly not perturbed by radiation pressure). Such a coma would be detectable if it is bright enough, as it is estimated to be approximately 1000-10000 km (a tenth to several tenths of an arcsec) in extent.

Weaknesses: -> The proposal demonstrates the rotation technique from PSF simulations, but does not show a comparison with a point source. It is not clear that the sensitivity will be high enough to detect these faint features in the tens of milli-arcsec wings of the PSF, or that the PSF is rotationally symmetric enough for the technique to work. It is not convincing that the ring ansae will be on the order of a pixel offset from the center. It is unclear how they are actually going to infer the composition of the ring from the data. -> The proposed observation of Chiron, and the detection of satellites around Chariklo seem exploratory,

and it is not very clear what the pay-off will be. Chiron has been imaged several times, including post-COSTAR. The results have been disputable. Also, the activity variable, so that such an inner-coma may not be populated if the activity is too low (smaller dust particles can be liberated with lower output, but not larger grains). -> The proposed Chiron observations push the integrations to within ~90% of saturation, but have no margin for activity on Chiron, which may very well cause saturation.

Reasonableness of Resources: N/A

Additional Comments: MANDATORY: Three orbits have been awarded to observe Chariklo only; no orbits have been awarded to observations of Chiron.

A.3 Fase 2: Observação dos aneis de Chariklo (Observation of Chariklo's rings)



13713 - Observation of Chariklo's rings

Cycle: 22, Proposal Category: GO
(Availability Mode: SUPPORTED)

INVESTIGATORS

<i>Name</i>	<i>Institution</i>	<i>E-Mail</i>
Prof. Bruno Sicardy (PI) (ESA Member) (Contact)	Observatoire de Paris	bruno.sicardy@obspm.fr
Col. Gustavo Benedetti-Rossi (CoI) (ESA Member)	Observatoire de Paris - Section de Meudon	gustavo.rossi@obspm.fr
Dr. Christophe Dumas (CoI) (ESA Member)	European Southern Observatory - Chile	cdumas@eso.org
Dr. Felipe Braga-Ribas (CoI)	Observatorio Nacional	ribas@on.br
Dr. Jose Luis Ortiz (CoI) (ESA Member)	Instituto de Astrofisica de Andalucia (IAA)	ortiz@iaa.es
Dr. Damien Gratadour (CoI) (ESA Member)	Observatoire de Paris - Section de Meudon	damien.gratadour@obspm.fr
Dr. Marc W. Buie (CoI) (AdminUSPI)	Southwest Research Institute	buie@boulder.swri.edu
Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo (CoI)	Observatorio Nacional	camargo@on.br

VISITS

<i>Visit</i>	<i>Targets used in Visit</i>	<i>Configurations used in Visit</i>	<i>Orbits Used</i>	<i>Last Orbit Planner Run</i>	<i>OP Current with Visit?</i>
01	(1) CHARIKLORING	WFC3/UVIS	1	19-Jul-2014 17:46:40.0	yes
02	(1) CHARIKLORING	WFC3/UVIS	1	19-Jul-2014 17:46:43.0	yes
03	(1) CHARIKLORING	WFC3/UVIS	1	19-Jul-2014 17:46:45.0	yes

3 Total Orbits Used

ABSTRACT

Dense and sharply confined rings have recently been discovered during a stellar occultation around the small Centaur object Chariklo (Braga-Ribas et al., 2014). This is the first body after the giant planets found to possess a ring system. We propose to use HST to (1) obtain direct images of the rings,

Proposal 13713 (STScI Edit Number: 0, Created: Saturday, July 19, 2014 10:50:55 AM EST) - Overview

confirming their existence and their orientation, (2) derive multi-wavelength photometry, thus constraining their composition (concerning in particular the presence of water ice), (3) perform for the first time a deep search of small satellites and (4) faint dusty rings around Chariklo, and (5) search for material around another Centaur similar to Chariklo, Chiron, which is known to be surrounded by cometary material and narrow jets. The presence (or absence) of satellites and dusty material around Chariklo will discriminate the various theoretical models that are invoked to explain the origin, evolution and stability of rings around this minor body. The motion of putative Chariklo satellites will also provide an estimation of the mass of the primary, from which its density can be derived, which eventually tells us where the rings are relative to Chariklo's Roche limit.

OBSERVING DESCRIPTION

I. Observations of Chariklo rings

With a diameter of about 250 km, Chariklo subtends 25 milliarcsec (mas) on the sky, while the rings span a diameter of about 800 km (or 80 mas). The expected geometry of the rings at opposition (June 2015), corresponds to an opening angle $B=43$ deg and position angle $P=-64$ deg, see Fig. 1. From BR14, the total rings apparent area should represent about 25% of that of Chariklo, while reflecting ~75% of Chariklo's flux as they are about three times brighter. Consequently, each ring ansa will have an estimated flux that represents about 20% of Chariklo's flux in the visible (Fig. 1 - see PDF of Phase I). Taking images with the CCD rows aligned with the ring longer axis, then rotating the telescope by 90 deg and subtracting the resulting images will eliminate Chariklo's contribution and reveal the ring ansae and their position angle. As Chariklo can be considered as a point source with $V_{\text{mag}}=18.5$, the ring ansa will each correspond to point sources of $V_{\text{mag}}=20$ that appear clearly in the simulation shown in Fig 1 (right panel).

Assuming a ring spectrum similar to that of the Sun (Kurucz G2V), with standard zodiacal light, standard Earth shine light and average Air Glow, the Exposure Time Calculator provides the exposure times for each filter as follows:

- F300X: 200 seconds exposure - aggregate (two exposures) SNR=50 on Chariklo;
- F475X: 7 seconds exposure - SNR=50 (per exposure) on Chariklo;
- F350LP: 170 seconds exposure - SNR=1.4 on $V_{\text{mag}}=28$ and SNR=3.5 on $V_{\text{mag}}=27$ with 90% of saturation on Chariklo. ETC SNR assumes no contamination from Chariklo. The limiting magnitudes will get brighter inward of 2 arcsec from the central body

I.1 Target acquisition strategies

Proposal 13713 (STScI Edit Number: 0, Created: Saturday, July 19, 2014 10:50:55 AM EST) - Overview

The strategy to provide direct images of Chariklo's rings is to choose the roll angle of HST so that the pixel array on the camera is aligned with the apparent ellipse of the rings, see Fig. 1. The ring position angle can be specified for any particular date (at opposition, the position angle will be $P=64$ deg). We will dither all exposures using optimal standard patterns based on the total number of exposures for each filter. Since we have a small (7 arcsec) region of interest, we will use the UVIS2-C512C-SUB aperture to permit getting more images per visit. The use of the F475X filter is to detect the rings in the visible, complementing the images on UV taken with the F300X filter. In particular, we want to confirm the water ice spectral slope below 5000 Angstrom, so the use of these two filters is needed. The broader F350LP filter is used for a deep search for additional rings or satellites. The available time in each visit will reach as faint as $V=28$, or down to a few km in size.

A satellite with orbital radius r_{km} has a period of $T \sim 10^{(-4)} \cdot (r_{\text{km}})^{1.5}$ days, estimating Chariklo's mass to $\sim 10^{19}$ kg (icy body with radius 125 km). As we can detect satellites between typically 20,000 and 70,000 km from the primary (see discussion above), T ranges from 8 months to about 5 years. During one week, the satellite will move respectively by 3,500 and 1,900 km, respectively, corresponding to about 9 and 5 pixels for the two extreme cases examined here.

After a few days, we plan to observe Chariklo on two more visits. The time between each visit is dictated by HST for the camera to roll 90 degrees (the U3 angle). Using the same strategy as the first orbit, but with a 90 degrees roll difference on the camera, we can use Chariklo to subtract itself out and remove the wings of the PSF, letting us see the rings and also to try to detect the motion of possible satellites. To confirm a possible detection of satellites, a third visit after a few days is planned, having 0 or 180 degrees roll on the U3 angle (compared to the first orbit). For the three orbits, the same strategy of observation will be used (the only difference is the roll angle).

Time distribution for each of the three orbits, checked to ensure that it fits in a single visibility window, is shown on Table 1A - see PDF of Phase I.

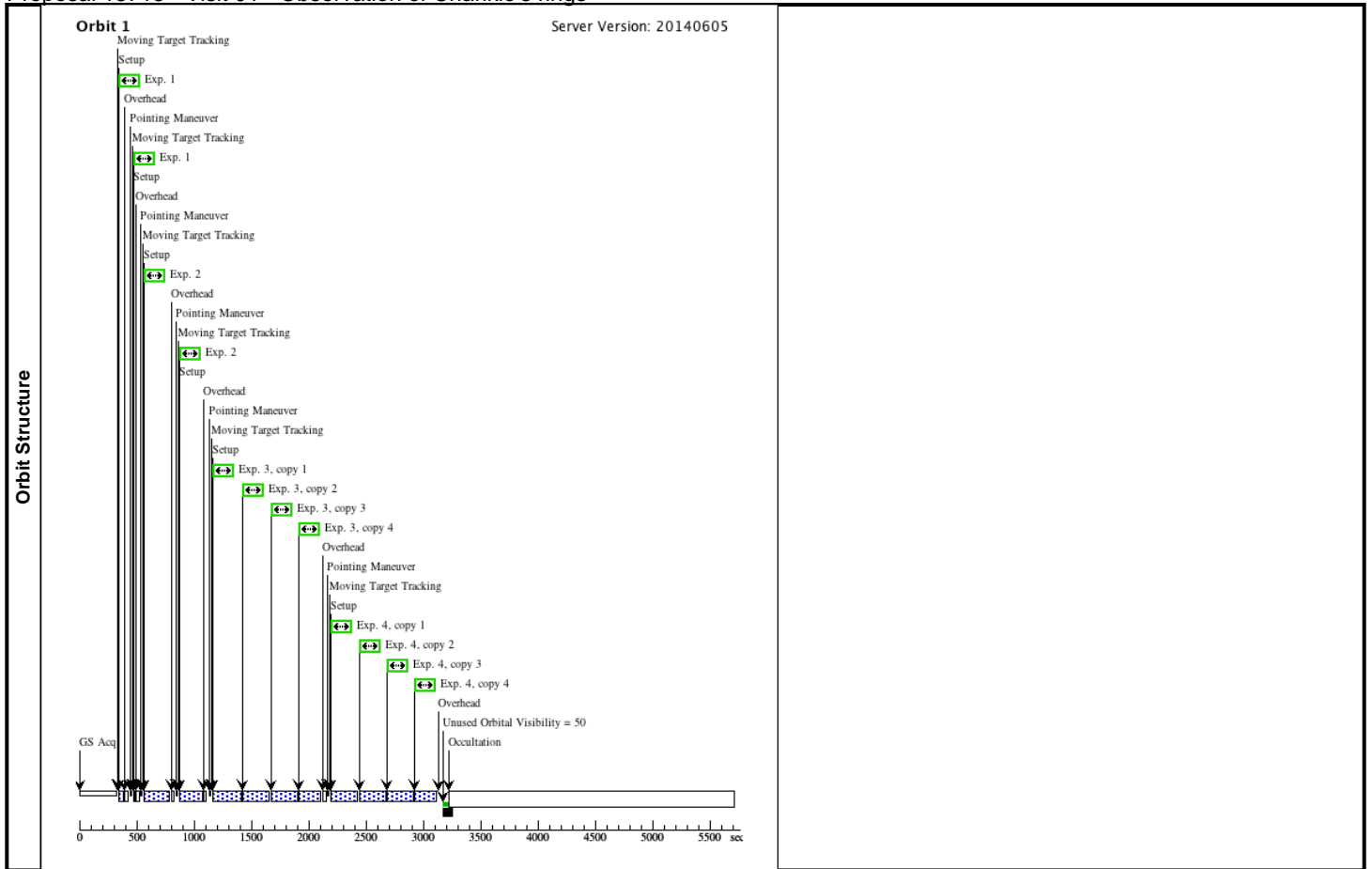
Proposal 13713 - Visit 01 - Observation of Chariklo's rings

Visit	<p>Proposal 13713, Visit 01 Sat Jul 19 15:50:55 GMT 2014</p> <p>Diagnostic Status: No Diagnostics</p> <p>Scientific Instruments: WFC3/UVIS</p> <p>Special Requirements: (none)</p> <p><i>Comments: We are searching for objects within 2 arcsec away the central body (Chariklo).</i></p> <p><i>The "ring-broad-band" and "ring-UV" avoid saturation for accurate photometry and colors. The POS-TARG value use for all exposures is set to keep the target away from the bad column in the sub-array.</i></p> <p><i>The 2 point dither "pattern 1" is chosen for cosmic ray rejection and to move the target relative to any blemishes in the image. The exposure times in these color observations are set by our SNR requirements without saturation on Chariklo and its rings.</i></p> <p><i>"long-part 1" and "2" are longer exposures for looking for satellites. There is no dithering within these sets but there is a slight dither built in to the second part that mimics the two-point dither pattern while minimizing overhead from the dither operation. This pattern follows the successful strategy used for Pluto during the search for faint satellites. The exposure times for these images are set to all be identical and to fill the orbit without excessive saturation from the central object.</i></p>						
	Patterns	#	Primary Pattern		Secondary Pattern		Exposures
(1)		Pattern Type=WFC3-UVIS-DITHER- LINE Purpose=DITHER Number Of Points=2 Point Spacing=0.145 Line Spacing=	Coordinate Frame=POS-TARG Pattern Orientation=46.84 Angle Between Sides= Center Pattern=false			(1), (2)	
Solar System Targets	#	Name	Level 1	Level 2	Level 3	Window	Ephem Center
	(1)	CHARIKLORING	TYPE=ASTEROID,A=15.7542393762 0195,E=0.1715964458910988,I=23.41 166280741038,O=-300.3798243316353 ,W=-241.6005157950247,M=60.13086 140827895,EQUINOX=J2000,EPOCH =23-MAY- 2014:00:00:00,EpochTimeScale=TDB				EARTH

Proposal 13713 - Visit 01 - Observation of Chariklo's rings

Exposures	#	Label	Target	Config,Mode,Aperture	Spectral Els.	Opt. Params.	Special Reqs.	Groups	Exp. Time (Total)/[Actual Dur.]	Orbit
	1	ring-broad-band	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F475X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 1-1 in Visit 01 (1)	7 Secs (14 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	2	ring-UV	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F300X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 2-2 in Visit 01 (1)	200 Secs (400 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	3	long-part 1	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0,0		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]
	4	long-part 2	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.14,0,1 4		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]

Proposal 13713 - Visit 01 - Observation of Chariklo's rings



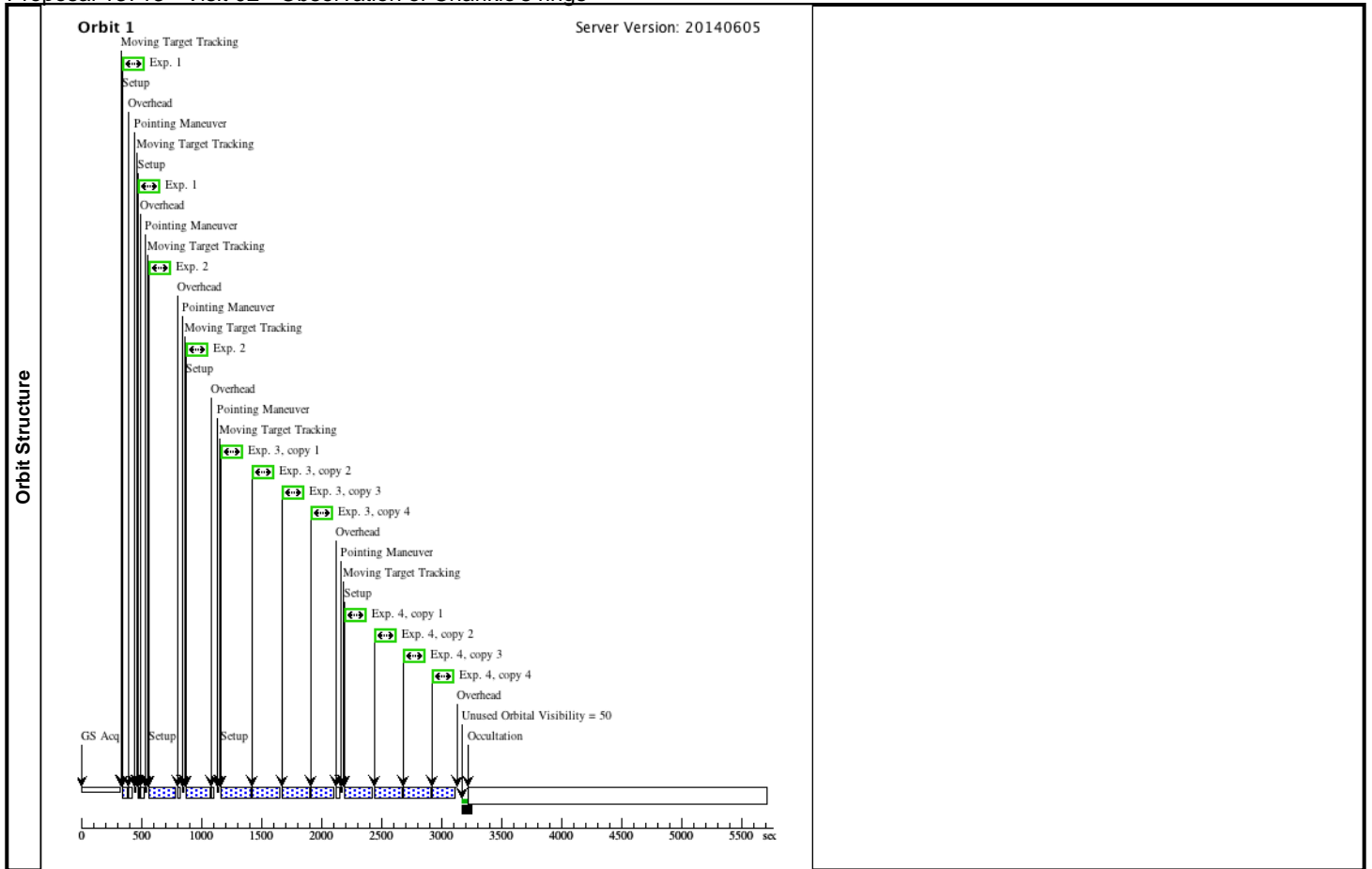
Proposal 13713 - Visit 02 - Observation of Chariklo's rings

Visit	<p>Proposal 13713, Visit 02 Sat Jul 19 15:50:55 GMT 2014</p> <p>Diagnostic Status: No Diagnostics</p> <p>Scientific Instruments: WFC3/UVIS</p> <p>Special Requirements: ORIENT 90D TO 90D FROM 01; AFTER 01 BY 3 D TO 10 D</p> <p><i>Comments: We are searching for objects within 2 arcsec away the central body (Chariklo). The design of this visit is identical to visit 1 except for a 90 degree rotation needed to isolate the ring. A timing window is also needed for the satellite search observations. Visits 1 and 2 will comprise the discovery pair for initial orbit estimates and can not be either too close together or too far apart. The values we chose are a compromise between the roll angle difference needed and the estimated motion of satellites around Chariklo.</i></p> <p><i>The "ring-broad-band" and "ring-UV" avoid saturation for accurate photometry and colors. The POS-TARG value use for all exposures is set to keep the target away from the bad column in the sub-array. The 2 point dither "pattern 1" is chosen for cosmic ray rejection and to move the target relative to any blemishes in the image. The exposure times in these color observations are set by our SNR requirements without saturation on Chariklo and its rings.</i></p> <p><i>"long-part 1" and "2" are longer exposures for looking for satellites. There is no dithering within these sets but there is a slight dither built in to the second part that mimics the two-point dither pattern while minimizing overhead from the dither operation. This pattern follows the successful strategy used for Pluto during the search for faint satellites. The exposure times for these images are set to all be identical and to fill the orbit without excessive saturation from the central object.</i></p>						
	Patterns	#	Primary Pattern			Secondary Pattern	Exposures
(1)		Pattern Type=WFC3-UVIS-DITHER- Coordinate Frame=POS-TARG LINE Pattern Orientation=46.84 Purpose=DITHER Angle Between Sides= Number Of Points=2 Center Pattern=false Point Spacing=0.145 Line Spacing=				(1), (2)	
Solar System Targets	#	Name	Level 1	Level 2	Level 3	Window	Ephem Center
	(1)	CHARIKLORING	TYPE=ASTEROID,A=15.7542393762 0195,E=0.1715964458910988,I=23.41 166280741038,O=300.3798243316353 .W=241.6005157950247,M=60.13086 140827895,EQUINOX=J2000,EPOCH =23-MAY- 2014:00:00:00,EpochTimeScale=TDB				EARTH

Proposal 13713 - Visit 02 - Observation of Chariklo's rings

Exposures	#	Label	Target	Config,Mode,Aperture	Spectral Els.	Opt. Params.	Special Reqs.	Groups	Exp. Time (Total)/[Actual Dur.]	Orbit
	1	ring-broad-band	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F475X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 1-1 in Visit 02 (1)	7 Secs (14 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	2	ring-UV	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F300X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 2-2 in Visit 02 (1)	200 Secs (400 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	3	long-part 1	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0,0		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]
	4	long-part 2	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.14,0,1 4		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]

Proposal 13713 - Visit O2 - Observation of Chariklo's rings



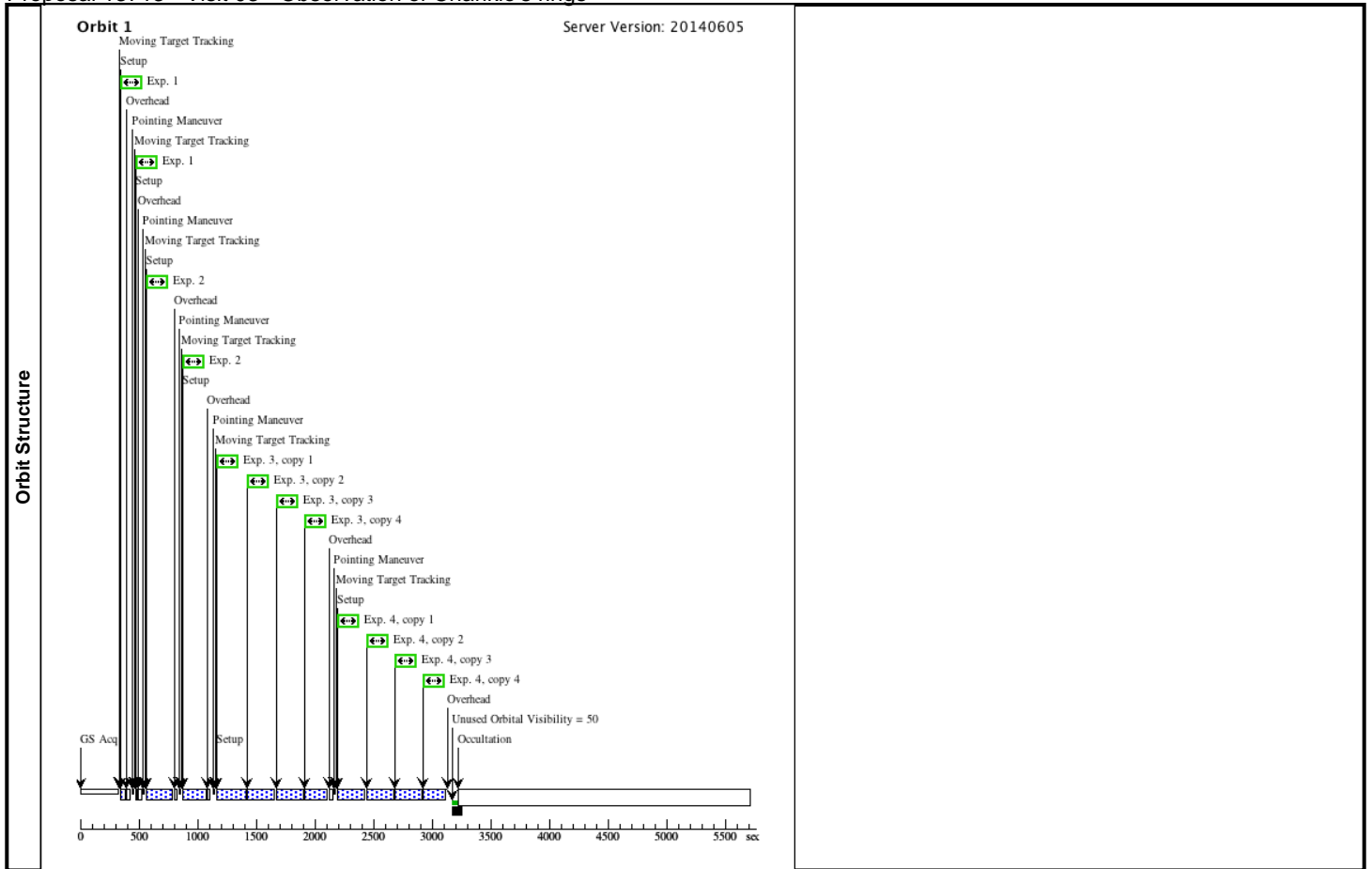
Proposal 13713 - Visit 03 - Observation of Chariklo's rings

Visit	<p>Proposal 13713, Visit 03 Sat Jul 19 15:50:56 GMT 2014</p> <p>Diagnostic Status: No Diagnostics</p> <p>Scientific Instruments: WFC3/UVIS</p> <p>Special Requirements: ORIENT 180D TO 180D FROM 01; AFTER 01 BY 30 D TO 70 D</p> <p><i>Comments: We are searching for objects within 2 arcsec away the central body (Chariklo). The design of this visit is identical to visit 1 except for a 180 degree rotation needed to isolate the ring. The three visits provide two epoch of difference images that will constrain ring properties. The timing window is set to get confirmation of any new satellites at the earliest possible epoch consistent with the roll constraint.</i></p> <p><i>The "ring-broad-band" and "ring-UV" avoid saturation for accurate photometry and colors. The POS-TARG value use for all exposures is set to keep the target away from the bad column in the sub-array.</i></p> <p><i>The 2 point dither "pattern 1" is chosen for cosmic ray rejection and to move the target relative to any blemishes in the image. The exposure times in these color observations are set by our SNR requirements without saturation on Chariklo and its rings.</i></p> <p><i>"long-part 1" and "2" are longer exposures for looking for satellites. There is no dithering within these sets but there is a slight dither built in to the second part that mimics the two-point dither pattern while minimizing overhead from the dither operation. This pattern follows the successful strategy used for Pluto during the search for faint satellites. The exposure times for these images are set to all be identical and to fill the orbit without excessive saturation from the central object.</i></p>						
	Patterns	#	Primary Pattern	Secondary Pattern	Exposures		
	(1)	Pattern Type=WFC3-UVIS-DITHER- LINE Purpose=DITHER Number Of Points=2 Point Spacing=0.145 Line Spacing=	Coordinate Frame=POS-TARG Pattern Orientation=46.84 Angle Between Sides= Center Pattern=false		(1), (2)		
Solar System Targets	#	Name	Level 1	Level 2	Level 3	Window	Ephem Center
	(1)	CHARIKLORING	TYPE=ASTEROID,A=15.7542393762 0195,E=0.1715964458910988,I=23.41 166280741038,O=300.3798243316353 ,W=241.6005157950247,M=60.13086 140827895,EQUINOX=J2000,EPOCH =23-MAY- 2014:00:00:00,EpochTimeScale=TDB				EARTH

Proposal 13713 - Visit 03 - Observation of Chariklo's rings

Exposures	#	Label	Target	Config,Mode,Aperture	Spectral Els.	Opt. Params.	Special Reqs.	Groups	Exp. Time (Total)/[Actual Dur.]	Orbit
	1	ring-broad-band	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F475X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 1-1 in Visit 03 (1)	7 Secs (14 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	2	ring-UV	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F300X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 2-2 in Visit 03 (1)	200 Secs (400 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	3	long-part 1	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0,0		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]
	4	long-part 2	(1) CHARIKLORIN G	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.14,0,1 4		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]

Proposal 13713 - Visit 03 - Observation of Chariklo's rings



A.4 Fase 1: Busca por Material ao Redor de Chiron (Search for material around Chiron)

Search for material around Chiron

Scientific Category: SOLAR SYSTEM

Scientific Keywords: Asteroids, Kuiper Belt Objects, Planetary Satellites

Instruments: WFC3

Proprietary Period: 12

Proposal Size: Small

Orbit Request

Prime

Parallel

Cycle 23

3

0

Abstract

Chiron is an active Centaur object of radius ~ 110 km orbiting between Saturn and Uranus. Its size and orbital elements are similar to those of the largest Centaur known to date, Chariklo (radius ~ 120 km). In 2013, a stellar occultation revealed the surprising presence of two narrow and dense rings around the latter body (Braga-Ribas F. et al., *Nature*, 2 April 2014), showing that rings are not an exclusivity of the giant planets and may be a more common feature than previously thought. A stellar occultation by Chiron observed in 2011 actually revealed the presence of sharp features that could be caused by a shell of material or cometary jets around Chiron (Ruprecht et al. 2015), a conclusion supported by the fact that Chiron (contrarily to Chariklo) does exhibit a cometary-like activity. Conversely, analyzing results from three stellar occultations (in 1993, 1994, 2011), Ortiz et al. (2015) show that the detections of secondary events could be explained by the presence of a dense and narrow rings orbiting at about 325 km from Chiron's center. Our goals here are to (1) Search for jets and faint material around Chiron (at more than 2,000 km from the central body), (2) search for faint satellites, (3) Constrain the presence of close-in ring structures, and (4) get multi-wavelength photometry to constrain the material composition. This would help us to assess how unique Chariklo's rings are, and to see whether the material surrounding both objects has something to do with a cometary activity.

Investigators:

	Investigator	Institution	Country
PI*&	B Sicardy	Observatoire de Paris	FRA
CoI	G Rossi (Co-PI)	Observatorio Nacional	BRA
CoI#	M Buie (Co-PI)	Southwest Research Institute	USA/TX
CoI	F Braga-Ribas	Universidade Tecnologica Federal do Parana	BRA
CoI*	J Ortiz	Instituto de Astrofisica de Andalucia (IAA)	ESP
CoI*	R Duffard	Instituto de Astrofisica de Andalucia (IAA)	ESP
CoI	J Bueno de Camargo	Observatorio Nacional	BRA
CoI*	D Gratadour	Observatoire de Paris - Section de Meudon	FRA
CoI*	C Dumas	European Southern Observatory - Chile	CHL

Number of investigators: 9

* ESA investigators: 5

US Admin CoI: M Buie

& Phase I contacts: 1

Target Summary:

Target	RA	Dec	Magnitude
CHIRON			V = 18.65 +/- 0.25

Observing Summary:

Target	Config Mode and Spectral Elements	Flags	Orbits
CHIRON	WFC3/UVIS Imaging F300X		3
	WFC3/UVIS Imaging F350LP		
	WFC3/UVIS Imaging F475X		

Total prime orbits: 3

● Scientific Justification

In June 2013, a stellar occultation by the largest Centaur object known to date, (10199) Chariklo, revealed the surprising presence of two narrow and dense rings around this minor planet (Braga-Ribas et al. 2014, BR14 herein). For the first time ever, rings were observed elsewhere than around giant planets, suggesting that rings are a more common features than previously thought. Meanwhile, two stellar occultations by the second largest Centaur (2060) Chiron, observed in 1993 and 1994, exhibited both narrow and broad features near Chiron, interpreted as collimated dust jets and a coma produced by the central body (Elliot et al. 1995; Bus et al. 1996). A more recent occultation (2011) shows symmetric, deep and sharp dual extinction features, revealing dense material collimated in two regions of widths ~ 3 and ~ 7 km, separated by about 10-14 km, at some 300 km from Chiron's center (Ruprecht et al. 2015).

Combining results from the 1993, 1994, 2011 occultations, with photometry, spectroscopy, and lightcurve amplitude variations, Ortiz et al. (2015) propose a model with ring material orbiting around 325 km from Chiron that may explain the observations. However, high-quality, multi-chord Chiron occultations are still missing, preventing unambiguous conclusions as to the exact nature of the detected material. Moreover, the existing observations require that the putative ring be strongly inhomogeneous in azimuth (like Neptune's ring arcs), thus requiring explanations as to the mechanisms that can stabilize such structures.

In any case, it is now established that both Chariklo and Chiron are surrounded by narrowly confined dense features. The bodies have comparable radii (124 ± 9 and 109 ± 10 km resp., Fornasier et al. 2013) and both move between Saturn and Uranus along unstable orbits (10-Myr life-time), suggesting possible common processes.

However, Chariklo's rings origin remains mysterious. They may stem from exogenous processes (e.g. material released after an impact on the surface) or from an endogenous production (cometary material ejected from the surface, forming a disk and then rings), but none of those scenarios have been described in detail yet. Note that while no cometary activity has been reported for Chariklo, Chiron had several brightness outbursts and developed a coma from perihelion to aphelion, at distances as large as 18 Astronomical Units (AU) (Bus et al. 2001).

It is interesting to note that both Chiron and Chariklo are massive enough ($\sim 10^{19}$ kg, as icy bodies with 110-125 km-radii) so that the escape velocity at their surface, ~ 100 m s⁻¹, is comparable to typical jet velocities (Luu and Jewitt 1990), allowing gravitationally bound jets (eg in the form of arches). Thus, the dynamics of the material surrounding the two Centaurs must be very different to that of typical comets, where almost all ejected material escapes to infinity. Otherwise stated, Chiron and Chariklo might be massive enough to retain part of their jet material to form a collisional disk and then rings, but not too massive to force all the material to fall back onto the surface. Note also that at those heliocentric distances, the solar radiation acceleration γ_{RP} is likely to be negligible compared to the gravity of the central body γ_C , for

particles of some microns in size. In effect, $\gamma_{RP}/\gamma_C = (M_S/M_C) \cdot (r/a)^2 \cdot \beta$, where M_S (resp. M_C) is the solar (resp. central body) mass, r (resp. a) is the bodycentric (resp. heliocentric) distance and β is the ratio of the solar radiation to the solar gravitational accelerations, resp. Taking $a \sim 15$ AU, $r \sim 300$ km and $M_C \sim 10^{19}$ kg, we obtain $\gamma_{RP}/\gamma_C \sim 2 \cdot 10^{-3} \beta$, with $\beta \sim 1/s(\mu\text{m})\rho(\text{g cm}^{-3})$, where s and ρ are the radius and density of the particles (Burns et al. 1979). Thus, for icy particles of a few microns in size, radiation pressure will not wipe out jets at some hundreds km from Chiron.

In that context, the *Hubble Space Telescope* (HST) is a unique instrument to provide new and key information for better understanding Chiron's surroundings. In particular HST could discriminate between the ring explanation (Ortiz et al. 2015), collimated cometary jets (Elliot et al. 1995) or dusty shell interpretation (Ruprecht et al. 2015). Rings would be barely resolved as extensions around the main bodies, while jets or shells would give rise to much more conspicuous features as they expand into space (Fig. 1). As explained in the "Justify Duplications" section, previous HST observation of Chiron do not have sufficient sensitivity or resolution to detect any of those structures.

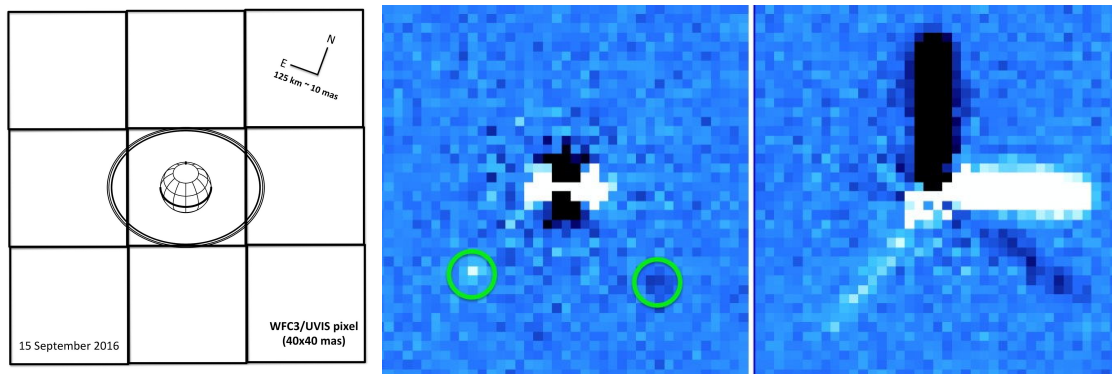


Fig. 1 Left: Size and orientation of the putative Chiron ring system at opposition in September 2016, expected from Ortiz et al.'s ring model (2015), using the widths of the dual features reported by Ruprecht et al. (2015). The boxes represent the 40x40mas WFC3/UVIS pixel. **Middle:** A simulation matching the diagram on the left with the inclusion of a simulated $V=27$ object (circled). The ring is modeled with a 10 km radial extent and I/F comparable to the surface of Chiron. This shows the result of subtracting two images with a 90° rotation between them to suppress the Chiron PSF. Bright (resp. dark) residuals represent excess signal in the first (resp. second) image, revealing the ring ansae. **Right:** A simulation including Chiron and two notional jets. The brighter jet (to the right in the first epoch, to the top in the second epoch) has a width of 100 m and the I/F value of the putative ring. The fainter jet visible 135° clockwise from the bright jet has a width of 10 m, close to the detection limit for these observation. The simulated images are a 160x160 pixel area at the native scale of WFC3 and cover a region up to 43,000 km ($3.2''$) from Chiron.

At opposition (Sept. 2016), Chiron will be at 17.3 (resp. 18.3) AU from Earth (resp. Sun). We propose to use WCF3/UVIS to obtain deep images of Chiron immediate surroundings. Goals are: **(1)** image Chiron's immediate surroundings to discriminate between the various proposed models (rings, cometary jets, dusty shells), **(2)** image Chiron's inner coma and search for

possible dusty disks that too tenuous to be detectable with occultations, **(3)** perform deep search of small satellites inside Chiron's Hill sphere and **(4)** derive multi-wavelength photometry to constraint composition of the material, in particular detect the presence of water ice.

(1) Search for jets and faint material around Chiron. WFC3/UVIS is very sensitive for detecting non rotationally symmetric features like radial jets, at more than 2000 km from the central body. Fig. 1 (right panel) shows for instance the detection of a 10 m-wide radial jet with the same reflectivity as Chariklo's rings (NB. the material reported by Ruprecht et al. has a much larger total width of 10 km, and would be very easily detected). Moreover, collisional material ejected from Chiron may create an inclined disk around the body. Material of optical depth τ with particles of albedo p has a magnitude per pixel of $V \sim 27.8 - 2.5 \cdot \log_{10}(p \cdot \tau \cdot L^2)$, where $L \sim 500$ km is the side of a 40x40 mas-pixel projected at Chiron (17.3 AU from Earth). Taking $p \sim 0.17$ (Ortiz et al. 2015) and a limiting magnitude of $V \sim 27$ per pixel, we obtain a detection threshold of $\tau \sim 5 \cdot 10^{-5}$ per pixel. This limit can be reduced drastically by integrating the flux at all longitudes around Chiron. For instance, a dusty ring with radius 20,000 km will be distributed over more than 100 pixels, reducing the detection threshold to $\tau \sim$ a few 10^{-6} .

Note that rotationally symmetric shells or a bound coma will be more difficult to detect, but this can be attempted by PSF subtraction at each epoch of observation

(2) Detection of small satellites near Chiron. Satellites near Chiron could tell us about possible scenarios implying an impactor from outside, that left a debris disk from which satellites and rings may form. Satellites can survive up to $\sim 30,000$ km (~ 2 arcsec) from the main body, corresponding to $\sim 30\%$ of Chiron Hill's sphere. The apparent magnitude of a satellite with radius R_{km} and geometric albedo p is $V \sim 26.6 - 2.5 \cdot \log_{10}(p \cdot R_{km}^2)$ at 17.3 AU. The limit $V \sim 27$ translates into a limiting radius of a couple of kilometers, assuming a geometric albedo similar to that of Chiron. Note that on a longer term, the satellite motion would also provide Chiron's mass, then its density, which eventually will tell us the location of Chiron's Roche limit.

(3) Constrain the presence of close-in ring structures. Fig. 1 (left panel) shows the expected geometry of Chiron's rings according to Ortiz et al.'s (2015) model. Detecting the ring ansae (middle panel) would be challenging, but would confirm its expected position angle and support the ring interpretation of the secondary events observed during the occultations.

(4) Photometry of the material. Considering that Chiron is orbiting in a region which is similar to Chariklo's, we expect that the surrounding material is nearly the same. Photometry through the filters F300X, F475X and F350LP will then constrain the ring composition, and in particular, look for the presence of water ice on its surroundings, as observed in Chariklo's rings (BR14), and indirectly inferred from Chiron's spectral features (Ortiz et al. 2015).

References

- Braga-Ribas *et al.* 2014, *Nature* **508**, 72
Burns *et al.* 1979, *Icarus* **40**, 1
Bus *et al.* 1996, *Icarus* **123**, 478, and 2001, *Icarus* **150**, 94
Elliot *et al.* 1995, *Nature*, **373**, 46
Fornasier *et al.* 2013, *Astron. Astrophys.* **555**, A15
Luu and Jewitt 1990, *Astron. J.* **100**, 913
Meech *et al.* 1997, *Astron. J.* **113**, 844
Ortiz *et al.* 2015, *Astron. Astrophys.* **576**, A18
Ruprecht *et al.* 2015, *Icarus* **252**, 271

● Description of the Observations

I. Observations of Chiron surroundings

With a radius of about 110 km, Chiron subtends 17 mas on the sky, while the surrounding putative ring material span a diameter of about 750 km (or ~51 mas), see Fig. 1.

Taking images with the CCD rows aligned with the ring longer axis, then rotating the telescope by 90° and subtracting the resulting images will eliminate Chiron's contribution and may reveal jets well below the width reported by Ruprecht *et al.* (2015), as illustrated in Fig. 1 (right panel).

The expected geometry of the putative rings at opposition (September 2016) corresponds to an opening angle $B=50^\circ$ and position angle $P=20^\circ$ (Fig. 1). With a radius 325 km and total width of 10 km the ring system apparent area should represent about 50% of that of Chiron, and also 50% of the flux, as they have similar geometric albedos (Fornasier *et al.* 2013, Ortiz *et al.* 2015). Using the same technique as above (90° rotation), we can unveil the ring ansae and their position angle, see Fig 1 (middle panel), thus supporting the Ortiz *et al.*'s (2015) model.

Assuming a ring spectrum similar to that of the Sun (Kurucz G2V), with standard zodiacal light, standard Earth shine light and average Air Glow, the Exposure Time Calculator provides the exposure times for each filter as follows:

- F300X: 200 seconds exposure - aggregate (two exposures) SNR=50 on Chiron;
- F475X: 7 seconds exposure - SNR=50 (per exposure) on Chiron;

- F350LP: 170 seconds exposure - SNR=1.4 on Vmag=28 and SNR=3.5 on Vmag=27 with 90% of saturation on Chiron. ETC SNR assumes no contamination from Chiron. The limiting magnitudes will get brighter inward of 2 arcsec from the central body.

I.1) Target acquisition strategies

The strategy to provide direct images of Chiron's surroundings is to choose a roll angle of HST and after a few days we plan to make another visit. The time between each visit is dictated by HST for the camera to roll 90 degrees (the U3 angle). Using the same strategy as the first orbit, but with a 90 degrees roll difference on the camera, we can use Chiron to subtract itself out and remove the wings - caused by the surrounding material - of the PSF, letting us see diffuse coma material, possible rings, jets and/or any other elliptical material around the body and also to try to detect the motion of possible satellites. To confirm a possible detection of satellites or other features, a third visit after a few days is planned, having 0 or 180 degrees roll on the U3 angle (compared to the first orbit). For the three orbits, the same strategy of observation will be used (the only difference is the roll angle).

We will dither all exposures using optimal standard patterns based on the total number of exposures for each filter. Since we have a small (7 arcsec) region of interest, we will use the UVIS2-C512C-SUB aperture to permit getting more images per visit. The use of the F475X filter is to detect the rings in the visible, complementing the images on UV taken with the F300X filter. In particular, we want to confirm the water ice spectral slope below 5000 Angstrom, so the use of these two filters is needed. The broader F350LP filter is used for a deep search for additional rings or satellites. The available time in each visit will reach as faint as V=27, or down to a few km in size.

A satellite with orbital radius r_{km} has a period of $T \sim 10^{-4} \cdot (r_{\text{km}})^{1.5}$ days, estimating Chiron's mass to $\sim 10^{19}$ kg (icy body with radius 110 km). As we can detect and expect satellites up to $\sim 30,000$ km from the primary (see discussion above), T is at most 1.4 years. Thus, during one week, the satellite will move by at least 2,600 km, corresponding to at least ~ 5 pixels on WFC3.

Time distribution for each of the three orbits, checked to ensure that it fits in a single visibility window, is shown on Table 1A.

Table 1A – Image sequence for an individual visit* using WFC3/UVIS on Chiron.

Action	Time (seconds)	Explanation
2 science exposures (F475X filter)	2 x 7 = 14	Acquire science image using F475X filter and subarrays SUB C512C
2 science exposures (F300X filter)	2 x 200 = 400	Acquire science image using F300X filter and subarrays SUB C512C
8** science exposures (F350LP filter)	8 x 170 = 1360	Acquire science images using F350LP filter and subarrays SUB C512C. Chiron at 90% of saturation.

* Orbit 2 must have a 90 degrees roll and orbit 3 must have a 180 degrees roll on the U3 angle (compared to the U3 angle from orbit 1). These are notional roll requirements, the exact amount is not critical and will be adjusted for the actual roll differences that can be realized (they will be somewhat less).

** The number of science exposures or exposure duration using F350LP filter can be adjusted to better fit the actual visibility window.

● Special Requirements

The roll requirement for Chiron observations leads to fairly tight scheduling restrictions and will need to be done near opposition at the time of the fastest rate of change of nominal roll. This roll constraint pattern was checked with APT to verify that there were schedulable opportunities for this plan. The time between each orbit is dictated entirely by the 90 degree roll offset required. The actual time and roll difference will be chosen during phase II.

Working nearer to opposition also helps minimize the problems of background star contamination for Chiron, even though the background field is not dense. During the deep exposures, the stars will be moving fast enough that field star contamination will affect single exposures, not the entire set. Comparable sets of data have been taken on the Pluto system in much more crowded fields and very few images have been compromised. Nonetheless, we will reserve the option of checking during phase II to avoid times when a field star might affect the observations.

● Coordinated Observations

None. This item does not apply to our proposal.

- **Justify Duplications**

There have been 5 proposals granted time on HST related to Chiron. Two of them (5843 and 11536) were spectroscopic and not relevant to the science of this proposal. One was an observation of a past Chiron occultation star to search for duplicity. The other two are 3769 and 5835 that are imaging programs that bear some resemblance to this proposal. The first of these was a pre-coSTAR observation with WFPC. Some putative details were extracted, with difficulty, from the inner coma region indicating departure from the PSF (Meech et al, AJ, 113, 844, 1997). The structure seen was interpreted as a tenuous dust structure at ~ 1800 km ($\sim 0.3''$). Due to influence of uncorrected spherical aberration, these results provide no constraints on outer coma structures. The second proposal used FOC/96 with coSTAR for high-resolution imaging of the inner coma and nucleus region. Due to the inherent count-rate limit for FOC, these observations only show the inner coma and to a limited extent, the photometric behavior of Chiron. The restrictive count rate precludes any constraints on faint structures or secondary objects around Chiron. Our proposed observations are designed to constrain exceedingly faint structures that are completely different from any past HST observation.

- **Past HST Usage**

The PI has the previous proposal GO/13713 for Cycle 22 to study Chariklo's rings. This current proposal uses strategies for target acquisition similar to the cited proposal. Chariklo observations are scheduled for June to August, 2015, so that no results are available yet.

A.5 Notificação de aceite de pedido de tempo para o Ciclo 23 - Busca de material ao redor de Chiron

Date: Wed, 24 Jun 2015 21:57:43 -0400
From: blacker@stsci.edu
To: bruno.sicardy@obspm.fr
Cc:mlink@stsci.edu, hst14136@stsci.edu, gugabrossi@gmail.com,
buie@boulder.swri.edu, ribas@on.br, ortiz@iaa.es, duffard@iaa.es,
camargo@on.br, damien.gratadour@obspm.fr, cdumas@eso.org
Subject: Cycle 23 HST Phase I Notification Letter

Bruno Sicardy
Observatoire de Paris
FRA

June 24, 2015

Dear Dr. Sicardy,

We are pleased to inform you that your Hubble Space Telescope Cycle 23 proposal

Title: Search for material around Chiron
ID: 14136

has been approved for Hubble Space Telescope Cycle 23 General Observer time, following detailed consideration by the Cycle 23 Peer Review Panels and final review by the STScI Director. Your proposal was graded in the first quintile of proposals in your Panel, with the first quintile being the top proposals before the panel.

The allocations approved for your program in Phase I are:

3 Primary Spacecraft Orbits in Cycle 23

Comments from the peer review may be found at the end of this message. All Phase I allocations are tentative, subject to successful Phase II submissions and feasibility/duplication reviews. If your Phase II program includes targets or exposures that duplicate those in the published protected lists, they will be eliminated unless specifically justified in your Phase I proposal and supported by specific TAC/Panel recommendations. Of course, all allocations depend upon the satisfactory operation of the observatory, as well as the availability of appropriate scheduling opportunities. In addition, parallel time depends on the existence of an applicable primary pointing, and future-cycle allocations are contingent on review for progress by STScI. The Panel/TAC were instructed to recommend only those parallel and future-cycle requests that were justified scientifically. Note that all SHADOW orbits granted have the restricted visibility discussed in the Phase I Call for Proposals (i.e., you will only be able to utilize that portion of the orbit when the spacecraft is in the Earth's shadow).

Cycle 23 will have a duration of approximately one year, beginning October 01, 2015 and ending on September 30, 2016. For your information, 891 GO proposals requested almost 19,500 orbits in Cycle 23, compared to the 3550 orbits available.

A total of 42 snapshot proposals requested over 4500 targets, compared to the approximately 1100 targets approved and a total of 182 Archival Research, Archive Legacy, and Theory proposals requested approximately 18 million dollars, about five times the amount available for these categories.

You will soon receive a separate email specifying the procedures and deadlines for your Phase II submission. These procedures and deadlines are important. It is your responsibility to write and to submit an error-free Phase II proposal by the deadline so that we can efficiently schedule your observations. We usually cannot support Phase II proposals submitted after the deadline; late proposals mean forfeiture of your HST allocation.

To help you, specific STScI staff have been assigned to support your Phase II activities. Your Program Coordinator (PC),

Miranda Link (mlink@stsci.edu), 410-338-2486

will assist you throughout the development, implementation and scheduling of your Phase II HST program. Your PC is your primary contact person with STScI from proposal development through execution. If you feel you need special assistance with scientific and instrument-related questions, you may request that a Contact Scientist be assigned to your program; a subsequent email from your PC will explain how to request a CS.

A detailed Phase II budget is also required from all U.S. investigators to support the reduction and analysis of Cycle 23 data.

Budget Submission Information

Deadline: The budget deadline for General Observer (GO) and Archival Researcher (AR) Programs is Thursday, July 23, 2015 (5 p.m. your local time). This is a hard deadline and will not be extended. All eligible investigators will soon receive a reminder from the STScI Grants Administration Office.

Questions regarding budget preparation: Email gms_mail@stsci.edu, or call 410.338.4200.

Electronic Budget Preparation, Submission, and Allowable Costs:

Budgets must be submitted electronically using the Space Telescope Grants Management System (STGMS), <https://stgms.stsci.edu> Contact the Sponsored Research Office or appropriate representative at your institution for assistance with your budget preparation. Information regarding budget preparation and allowable costs can be found at <http://www.stsci.edu/institute/grants>.

Program Funding: Funding that may be subsequently approved for this Program is contingent upon the availability of funds from the National Aeronautics and Space Administration (NASA).

The program scope may not be changed at this time unless specifically recommended in the review comments. Following a financial review in August, a separate notification pertaining to the actual funding allocated to each program will be sent to U.S. Investigators.

Historically, the NASA Office of Space Science (OSS) Education and Public Outreach (E/PO) has allocated approximately 2% of the yearly Hubble Space Telescope (HST) GO/AR budget to E/PO funding. The spirit of the HST E/PO Grant Program is to encourage collaboration between professional astronomers/space scientists and professional educators that would broaden the knowledge and understanding of the latest discoveries of the Hubble Space Telescope. While we do not yet know if such funding will be available for Cycle 23, we encourage you to consider submitting an E/PO request by the August 19, 2015 deadline for E/PO proposals. Please see the HST Call for Proposals for details.

Congratulations on the success of your proposal in the stringent Phase I review, and best wishes for your future participation in and contributions to the scientific program of HST.

Sincerely,

Kathryn Flanagan
Interim Director

Strengths: Imaging Chiron with HST will determine the nature of the material surrounding it, which was seen in occultation observations. The observations will get something from color even if ring/disk not detected. The panel was impressed with previous results, and deemed this excellent science for a very modest request of telescope time.

Weaknesses: None noted.

Reasonableness of Resources: N/A

Additional Comments: N/A

A.6 Fase 2: Busca por Material ao Redor de Chiron (Search for material around Chiron)



14136 - Search for material around Chiron

Cycle: 23, Proposal Category: GO
(Availability Mode: SUPPORTED)

INVESTIGATORS

<i>Name</i>	<i>Institution</i>	<i>E-Mail</i>
Prof. Bruno Sicardy (PI) (ESA Member) (Contact)	Observatoire de Paris	bruno.sicardy@obspm.fr
Col. Gustavo Benedetti Rossi (CoI)	Observatorio Nacional	gugabrossi@gmail.com
Dr. Marc W. Buie (CoI) (AdminUSPI)	Southwest Research Institute	buie@boulder.swri.edu
Dr. Felipe Braga-Ribas (CoI)	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	ribas@on.br
Dr. Jose Luis Ortiz (CoI) (ESA Member)	Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA)	ortiz@iaa.es
Dr. Rene Duffard (CoI) (ESA Member)	Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA)	duffard@iaa.es
Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo (CoI)	Observatorio Nacional	camargo@on.br
Dr. Damien Gratadour (CoI) (ESA Member)	Observatoire de Paris - Section de Meudon	damien.gratadour@obspm.fr
Dr. Christophe Dumas (CoI) (ESA Member)	European Southern Observatory - Chile	cdumas@eso.org

VISITS

<i>Visit</i>	<i>Targets used in Visit</i>	<i>Configurations used in Visit</i>	<i>Orbits Used</i>	<i>Last Orbit Planner Run</i>	<i>OP Current with Visit?</i>
01	(1) CHIRON	WFC3/UVIS	1	17-Jul-2015 18:12:23.0	yes
02	(1) CHIRON	WFC3/UVIS	1	17-Jul-2015 18:13:47.0	yes
03	(1) CHIRON	WFC3/UVIS	1	17-Jul-2015 18:07:27.0	yes

3 Total Orbits Used

ABSTRACT

Proposal 14136 (STScI Edit Number: 0, Created: Wednesday, July 22, 2015 3:19:38 PM EST) - Overview

Chiron is an active Centaur object of radius ~ 110 km orbiting between Saturn and Uranus. Its size and orbital elements are similar to those of the largest Centaur known to date, Chariklo (radius ~ 120 km). In 2013, a stellar occultation revealed the surprising presence of two narrow and dense rings around the latter body (Braga-Ribas F. et al., *Nature*, 2 April 2014), showing that rings are not an exclusivity of the giant planets and may be a more common feature than previously thought. A stellar occultation by Chiron observed in 2011 actually revealed the presence of sharp features that could be caused by a shell of material or cometary jets around Chiron (Ruprecht et al. 2015), a conclusion supported by the fact that Chiron (contrarily to Chariklo) does exhibit a cometary-like activity. Conversely, analyzing results from three stellar occultations (in 1993, 1994, 2011), Ortiz et al. (2015) show that the detections of secondary events could be explained by the presence of a dense and narrow rings orbiting at about 325 km from Chiron's center. Our goals here are to (1) Search for jets and faint material around Chiron (at more than 2,000 km from the central body), (2) search for faint satellites, (3) Constrain the presence of close-in ring structures, and (4) get multi-wavelength photometry to constrain the material composition. This would help us to assess how unique Chariklo's rings are, and to see whether the material surrounding both objects has something to do with a cometary activity.

OBSERVING DESCRIPTION

With a radius of about 110 km, Chiron subtends 17 mas on the sky, while the surrounding putative ring material span a diameter of about 750 km (or ~ 51 mas), see Fig 1 (at PDF attachment). Taking images with the CCD rows aligned with the ring longer axis, then rotating the telescope by 90 degrees and subtracting the resulting images will eliminate Chiron's contribution and may reveal jets well below the width reported by Ruprecht et al (2015), as illustrated in Fig. 1 (right panel).

The expected geometry of the putative rings at opposition (September 2016) corresponds to an opening angle $B=50$ deg and position angle $P=20$ deg (Fig. 1). With a radius 325 km and total width of 10 km the ring system apparent area should represent about 50% of that of Chiron, and also 50% of the flux, as they have similar geometric albedos (Fornasier et al. 2013, Ortiz et al. 2015). Using the same technique as above (90deg rotation), we can unveil the ring ansae and their position angle, see Fig 1 (middle panel), thus supporting the Ortiz et al.'s (2015) model.

The limiting magnitudes will get brighter inward of 2 arcsec from the central body.

Target acquisition strategies

The strategy to provide direct images of Chiron's surroundings is to choose a roll angle of HST and after a few days we plan to make another visit.

Proposal 14136 (STScI Edit Number: 0, Created: Wednesday, July 22, 2015 3:19:38 PM EST) - Overview

The time between each visit is dictated by HST for the camera to roll 90 degrees (the U3 angle). Using the same strategy as the first orbit, but with a 90 degrees roll difference on the camera, we can use Chiron to subtract itself out and remove the wings - caused by the surrounding material - of the PSF, letting us see diffuse coma material, possible rings, jets and/or any other elliptical material around the body and also to try to detect the motion of possible satellites. To confirm a possible detection of satellites or other features, a third visit after a few days is planned, having 0 or 180 degrees roll on the U3 angle (compared to the first orbit). For the three orbits, the same strategy of observation will be used (the only difference is the roll angle).

We will dither all exposures using optimal standard patterns based on the total number of exposures for each filter. Since we have a small (7 arcsec) region of interest, we will use the UVIS2-C512C-SUB aperture to permit getting more images per visit. The use of the F475X filter is to detect the rings in the visible, complementing the images on UV taken with the F300X filter. In particular, we want to confirm the water ice spectral slope below 5000 Angstrom, so the use of these two filters is needed. The broader F350LP filter is used for a deep search for additional rings or satellites. The available time in each visit will reach as faint as $V=27$, or down to a few km in size.

A satellite with orbital radius r_{km} has a period of $T \sim 10^{(-4)} r_{\text{km}}^{(1.5)}$ days, estimating Chiron's mass to $\sim 10^{(19)}$ kg (icy body with radius 110 km). As we can detect and expect satellites up to $\sim 30,000$ km from the primary (see discussion above), T is at most 1.4 years. Thus, during one week, the satellite will move by at least 2,600 km, corresponding to at least ~ 5 pixels on WFC3.

Time distribution for each of the three orbits was checked to ensure that it fits in a single visibility window (see Table 1A in PDF attachment).

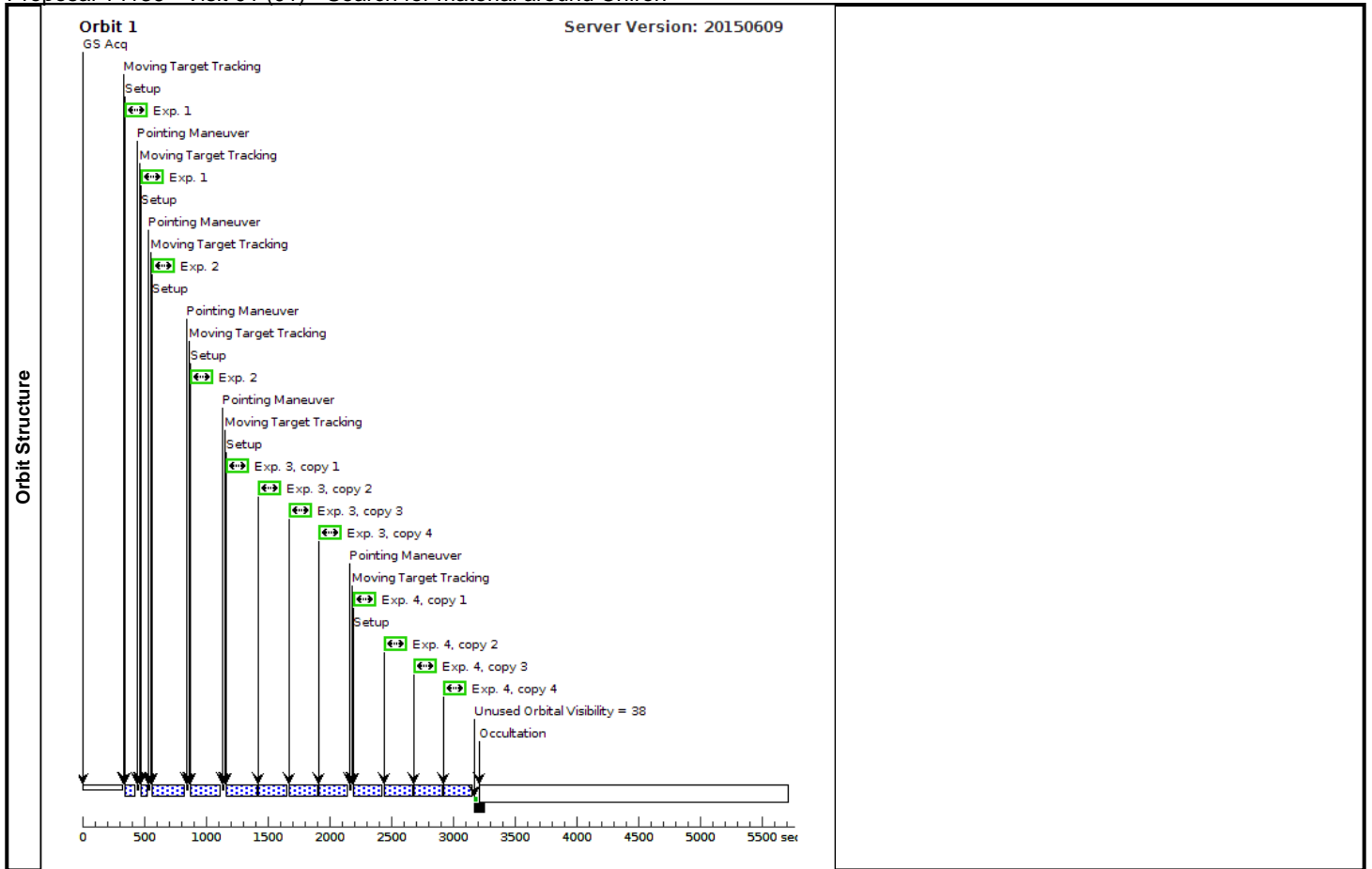
Proposal 14136 - Visit 01 (01) - Search for material around Chiron

Visit	<p>Proposal 14136, Visit 01 (01) Wed Jul 22 20:19:38 GMT 2015</p> <p>Diagnostic Status: Warning</p> <p>Scientific Instruments: WFC3/UVIS</p> <p>Special Requirements: ORIENT 230D TO 240 D</p> <p><i>Comments: We are searching for objects within 2 arcsec away the central body (Chiron).</i></p> <p><i>The "ring-broad-band" and "ring-UV" avoid saturation for accurate photometry and colors. The POS-TARG value use for all exposures is set to keep the target away from the bad column in the sub-array.</i></p> <p><i>The 2 point dither "pattern 1" is chosen for cosmic ray rejection and to move the target relative to any blemishes in the image. The exposure times in these color observations are set by our SNR requirements without saturation on Chiron.</i></p> <p><i>"long-part 1" and "2" are longer exposures for looking for satellites. There is no dithering within these sets but there is a slight dither built in to the second part that mimics the two-point dither pattern while minimizing overhead from the dither operation. This pattern follows the successful strategy used for Pluto during the search for faint satellites. The exposure times for these images are set to all be identical and to fill the orbit without excessive saturation from the central object.</i></p>					
	<p>Diagnosics</p> <p>(broadband (01.001)) Warning (Form): FLASH level may be too low for this exposure or a short subexposure. See extended explanation in the diagnostic browser</p> <p>(Surrounding-material-UV (01.002)) Warning (Form): FLASH level may be too low for this exposure or a short subexposure. See extended explanation in the diagnostic browser</p>					
Patterns	#	Primary Pattern			Secondary Pattern	Exposures
	(1)	Pattern Type=WFC3-UVIS-DITHER- LINE Purpose=DITHER Number Of Points=2 Point Spacing=0.145 Line Spacing=	Coordinate Frame=POS-TARG Pattern Orientation=46.84 Angle Between Sides= Center Pattern=false			(1), (2)
Solar System Targets	#	Name	Level 1	Level 2	Level 3	Window
	(1)	CHIRON	TYPE=ASTEROID,A=13.6383666493 2805.E=-3820988964285049,I=-6.9383 62251723268,O=209.278046346615 .W=339.3496505888005,M=134.5261 255528466 .EQUINOX=J2000,EPOCH=09-DEC- 2015:00:00:00,EpochTimeScale=TDB			

Proposal 14136 - Visit 01 (01) - Search for material around Chiron

Exposures	#	Label	Target	Config,Mode,Aperture	Spectral Els.	Opt. Params.	Special Reqs.	Groups	Exp. Time (Total)/[Actual Dur.]	Orbit
	1	broadband	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F475X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 1-1 i n Visit 01 (01) (1)	7 Secs (14 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	2	Surrounding -material-UV	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F300X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 2-2 i n Visit 01 (01) (1)	200 Secs (400 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	3	long-part 1	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]
	4	long-part 2	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.14,0.1 4		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]

Proposal 14136 - Visit 01 (01) - Search for material around Chiron



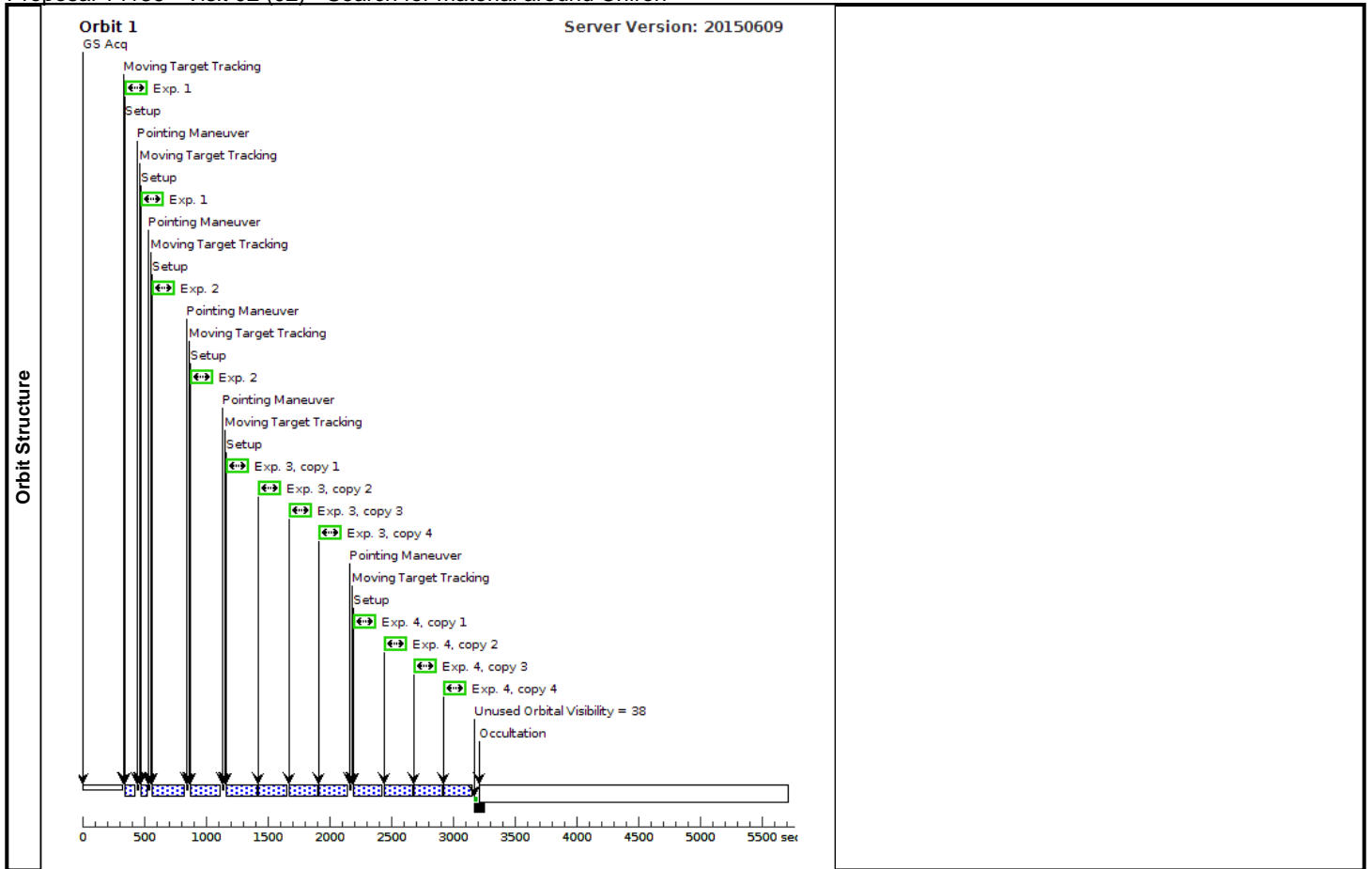
Proposal 14136 - Visit 02 (02) - Search for material around Chiron

Visit	<p>Proposal 14136, Visit 02 (02) Wed Jul 22 20:19:38 GMT 2015</p> <p>Diagnostic Status: Warning</p> <p>Scientific Instruments: WFC3/UVIS Special Requirements: ORIENT 60D TO 75D FROM 03</p> <p><i>Comments: We are searching for objects within 2 arcsec away the central body (Chiron). The design of this visit is identical to visit 1 and 3 except for a ideally 90 degree rotation needed. To adjust the requirements on visit planner, it was necessary to take visit 3 as reference for orient. Rotation is to isolate any non-circular surrounding material. A timing window is also needed for the satellite search observations. Visit 1 and 2 will comprise the discovery pair for initial orbit estimates and can not be either too close together or too far apart. The values we chose are a compromise between the roll angle difference needed and the estimated motion of satellites around Chiron.</i></p> <p><i>The "ring-broad-band" and "ring-UV" avoid saturation for accurate photometry and colors. The POS-TARG value use for all exposures is set to keep the target away from the bad column in the sub-array. The 2 point dither "pattern 1" is chosen for cosmic ray rejection and to move the target relative to any blemishes in the image. The exposure times in these color observations are set by our SNR requirements without saturation on Chiron.</i></p> <p><i>"long-part 1" and "2" are longer exposures for looking for satellites. There is no dithering within these sets but there is a slight dither built in to the second part that mimics the two-point dither pattern while minimizing overhead from the dither operation. This pattern follows the successful strategy used for Pluto during the search for faint satellites. The exposure times for these images are set to all be identical and to fill the orbit without excessive saturation from the central object.</i></p>																				
	Diagnostics	<p>(broadband (02.001)) Warning (Form): FLASH level may be too low for this exposure or a short subexposure. See extended explanation in the diagnostic browser</p> <p>(Surrounding-material-UV (02.002)) Warning (Form): FLASH level may be too low for this exposure or a short subexposure. See extended explanation in the diagnostic browser</p>																			
Patterns		<table border="1"> <thead> <tr> <th>#</th> <th>Primary Pattern</th> <th>Secondary Pattern</th> <th>Exposures</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(1)</td> <td> Pattern Type=WFC3-UVIS-DITHER- LINE Purpose=DITHER Number Of Points=2 Point Spacing=0.145 Line Spacing= </td> <td> Coordinate Frame=POS-TARG Pattern Orientation=46.84 Angle Between Sides= Center Pattern=false </td> <td>(1), (2)</td> </tr> </tbody> </table>	#	Primary Pattern	Secondary Pattern	Exposures	(1)	Pattern Type=WFC3-UVIS-DITHER- LINE Purpose=DITHER Number Of Points=2 Point Spacing=0.145 Line Spacing=	Coordinate Frame=POS-TARG Pattern Orientation=46.84 Angle Between Sides= Center Pattern=false	(1), (2)											
	#	Primary Pattern	Secondary Pattern	Exposures																	
(1)	Pattern Type=WFC3-UVIS-DITHER- LINE Purpose=DITHER Number Of Points=2 Point Spacing=0.145 Line Spacing=	Coordinate Frame=POS-TARG Pattern Orientation=46.84 Angle Between Sides= Center Pattern=false	(1), (2)																		
Solar System Targets	<table border="1"> <thead> <tr> <th>#</th> <th>Name</th> <th>Level 1</th> <th>Level 2</th> <th>Level 3</th> <th>Window</th> <th>Ephem Center</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(1)</td> <td>CHIRON</td> <td>TYPE=ASTEROID,A=13.6383666493 2805.E=-3820988964285049,I=6.9383 62251723268,O=209.278046346615 .W=339.3496505888005,M=134.5261 255528466 .EQUINOX=J2000,EPOCH=09-DEC- 2015:00:00:00,EpochTimeScale=TDB</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>EARTH</td> </tr> </tbody> </table>	#	Name	Level 1	Level 2	Level 3	Window	Ephem Center	(1)	CHIRON	TYPE=ASTEROID,A=13.6383666493 2805.E=-3820988964285049,I=6.9383 62251723268,O=209.278046346615 .W=339.3496505888005,M=134.5261 255528466 .EQUINOX=J2000,EPOCH=09-DEC- 2015:00:00:00,EpochTimeScale=TDB					EARTH					
	#	Name	Level 1	Level 2	Level 3	Window	Ephem Center														
(1)	CHIRON	TYPE=ASTEROID,A=13.6383666493 2805.E=-3820988964285049,I=6.9383 62251723268,O=209.278046346615 .W=339.3496505888005,M=134.5261 255528466 .EQUINOX=J2000,EPOCH=09-DEC- 2015:00:00:00,EpochTimeScale=TDB					EARTH														

Proposal 14136 - Visit 02 (02) - Search for material around Chiron

Exposures	#	Label	Target	Config,Mode,Aperture	Spectral Els.	Opt. Params.	Special Reqs.	Groups	Exp. Time (Total)/[Actual Dur.]	Orbit
	1	broadband	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F475X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 1-1 i n Visit 02 (02) (1)	7 Secs (14 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	2	Surrounding -material-UV	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F300X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 2-2 i n Visit 02 (02) (1)	200 Secs (400 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	3	long-part 1	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]
	4	long-part 2	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.14,0.1 4		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]

Proposal 14136 - Visit 02 (02) - Search for material around Chiron



Proposal 14136 - Visit 03 (03) - Search for material around Chiron

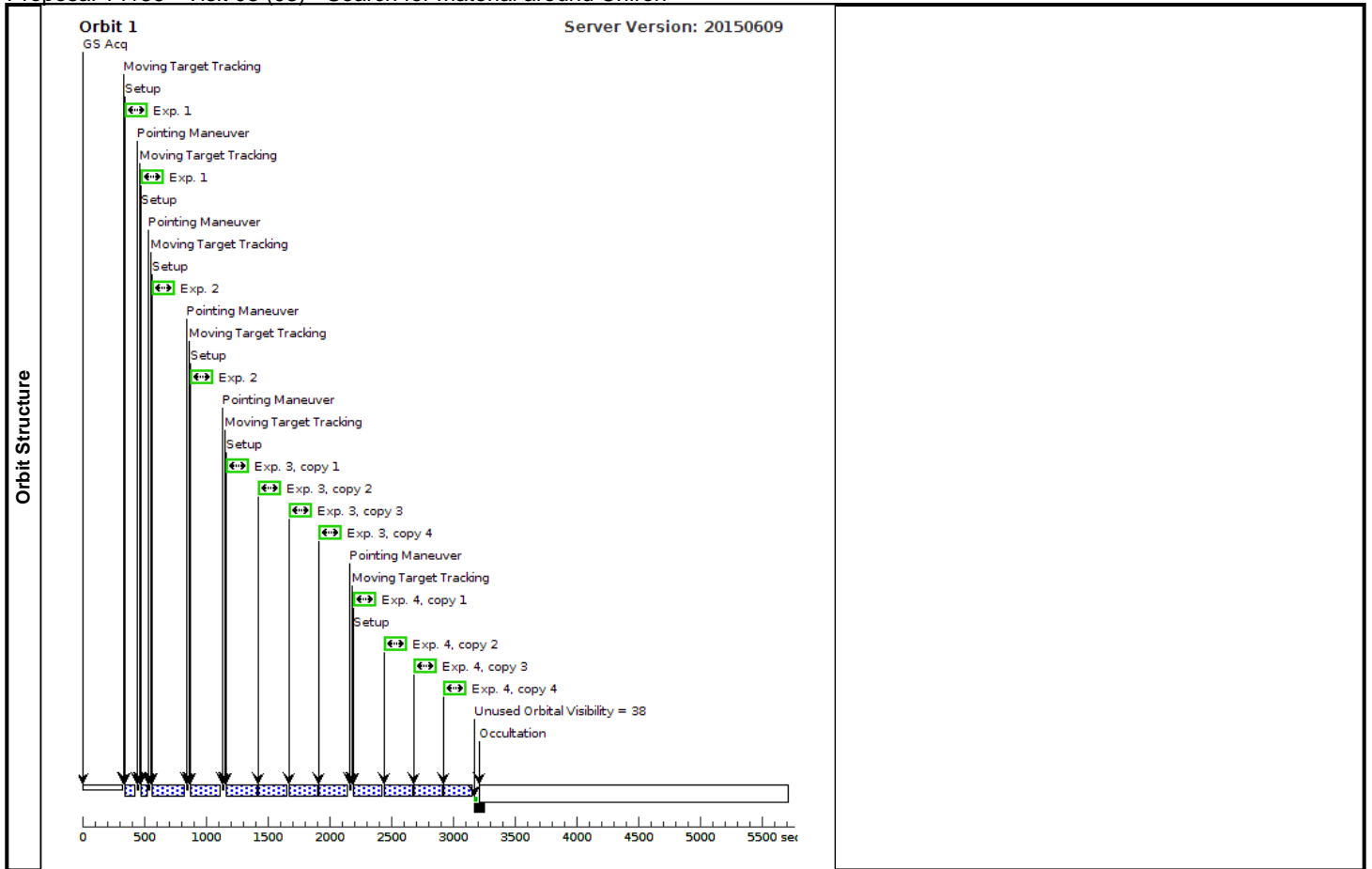
Wed Jul 22 20:19:38 GMT 2015

Visit	<p>Proposal 14136, Visit 03 (03)</p> <p>Diagnostic Status: Warning</p> <p>Scientific Instruments: WFC3/UVIS</p> <p>Special Requirements: ORIENT 180D TO 180D FROM 01</p> <p><i>Comments: We are searching for objects within 2 arcsec away the central body (Chiron). The design of this visit is identical to visit 1 except for a 180 degree rotation needed to isolate any non-circular material. The three visits provide two epoch of difference images that will constrain ring properties. The timing window is set to get confirmation of any new satellites at the earliest possible epoch consistent with the roll constraint.</i></p> <p><i>The "ring-broad-band" and "ring-UV" avoid saturation for accurate photometry and colors. The POS-TARG value use for all exposures is set to keep the target away from the bad column in the sub-array. The 2 point dither "pattern 1" is chosen for cosmic ray rejection and to move the target relative to any blemishes in the image. The exposure times in these color observations are set by our SNR requirements without saturation on Chiron.</i></p> <p><i>"long-part 1" and "2" are longer exposures for looking for satellites. There is no dithering within these sets but there is a slight dither built in to the second part that mimics the two-point dither pattern while minimizing overhead from the dither operation. This pattern follows the successful strategy used for Pluto during the search for faint satellites. The exposure times for these images are set to all be identical and to fill the orbit without excessive saturation from the central object.</i></p>						
	<p>Diagnosics</p> <p>(broadband (03.001)) Warning (Form): FLASH level may be too low for this exposure or a short subexposure. See extended explanation in the diagnostic browser</p> <p>(Surrounding-material-UV (03.002)) Warning (Form): FLASH level may be too low for this exposure or a short subexposure. See extended explanation in the diagnostic browser</p>						
Patterns	#	Primary Pattern	Secondary Pattern	Exposures			
	(1)	Pattern Type=WFC3-UVIS-DITHER- LINE Purpose=DITHER Number Of Points=2 Point Spacing=0.145 Line Spacing=	Coordinate Frame=POS-TARG Pattern Orientation=46.84 Angle Between Sides= Center Pattern=false	(1), (2)			
Solar System Targets	#	Name	Level 1	Level 2	Level 3	Window	Ephem Center
	(1)	CHIRON	TYPE=ASTEROID,A=13.6383666493 2805.E=-3820988964285049,I=6.9383 62251723268,O=209.278046346615 .W=339.3496505888005,M=134.5261 255528466 ,EQUINOX=J2000,EPOCH=09-DEC- 2015:00:00:00,EpochTimeScale=TDB				

Proposal 14136 - Visit 03 (03) - Search for material around Chiron

Exposures	#	Label	Target	Config,Mode,Aperture	Spectral Els.	Opt. Params.	Special Reqs.	Groups	Exp. Time (Total)/[Actual Dur.]	Orbit
	1	broadband	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F475X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 1-1 i n Visit 03 (03) (1)	7 Secs (14 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	2	Surrounding -material-UV	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F300X	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.	Pattern 1, Exps 2-2 i n Visit 03 (03) (1)	200 Secs (400 Secs) [==>(Pattern 1)] [==>(Pattern 2)]	[1]
	3	long-part 1	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.0,0.		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]
	4	long-part 2	(1) CHIRON	WFC3/UVIS, ACCUM, UVIS2-C512C-SUB	F350LP	CR-SPLIT=NO	POS TARG 3.14,0.1 4		190 Secs X 4 (760 Secs) [==>(Copy 1)] [==>(Copy 2)] [==>(Copy 3)] [==>(Copy 4)]	[1]

Proposal 14136 - Visit 03 (03) - Search for material around Chiron



Apêndice B

Artigos publicados em revistas indexadas

Neste apêndice são apresentados os artigos publicados em revistas indexadas na qual tive participação. Uma breve descrição do meu envolvimento em cada um dos artigos também é dada. Os artigos estão ordenados por ano de publicação.

(1) Pluto: improved astrometry from 19 years of observations, *Astronomy & Astrophysics*, 570, A86, (2014)

BENEDETTI-ROSSI, G.; VIEIRA MARTINS, R.; CAMARGO, J. I. B.; ASSAFIN, M.; Braga-Ribas, F.

DOI: 10.1051/0004-6361/201424275

Neste trabalho realizei toda a redução e análise de dados a fim de melhorar posições astrométricas de Plutão. A astrometria de Plutão e Caronte foi obtida após aplicar correções de refração diferencial cromática e de fotocentro. As posições astrométricas foram enviados ao JPL/NASA para melhoria da navegação da sonda New Horizons.

(2) Candidate stellar occultations by Centaurs and trans-Neptunian objects up to 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 561, A37, (2014)

CAMARGO, J. I. B.; VIEIRA-MARTINS, R.; ASSAFIN, M.; BRAGA-RIBAS, F.; SICARDY, B.; DESMARS, J.; ANDREI, A. H.; BENEDETTI-ROSSI, G.; DIAS-OLIVEIRA, A.

DOI: 10.1051/0004-6361/201322579

Neste trabalho realizei, junto do Dr. Julio Camargo, as observações no telescópio 2.2m no ESO com a câmera WFI. Também participei da redução de dados e obtive posições astrométricas para diversos TNOs (que serviu como uma análise paralela

para comparação de resultados) e auxiliei no desenvolvimento do catálogo de estrelas utilizados para previsão de ocultações estelares para 2014 e 2015. Também auxiliei na seleção dos eventos.

(3) A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo, *Nature*, 508, 7494, 72, (2014)

BRAGA-RIBAS, F.; Sicardy, B.; Ortiz, J. L.; Snodgrass, C.; Roques, F.; Vieira-Martins, R.; CAMARGO, J. I. B.; Assafin, M.; Duffard, R.; JEHIN, E.; Pollock, J.; Leiva, R.; EMILIO, M.; Machado, D. I.; COLAZO, C.; Lellouch, E.; Skottfelt, J.; GILLON, M.; Ligier, N.; Maquet, L.; BENEDETTI-ROSSI, G.; e outros 43 co-autores.

DOI: 10.1038/nature13155

Neste trabalho realizei toda a redução e análise dos dados provenientes do telescópio dinamarquês. A fotometria obtida foi crucial na detecção dos anéis de Chariklo e a curva de luz obtida também mostrou os primeiros indícios da existência do segundo anel.

(4) PLUTO'S ATMOSPHERE FROM STELLAR OCCULTATIONS IN 2012 AND 2013, *Astrophysical Journal*, 811, 1, 53, (2015)

DIAS-OLIVEIRA, A.; SICARDY, B.; Lellouch, E.; VIEIRA-MARTINS, R.; ASSAFIN, M.; CAMARGO, J. I. B.; Braga-Ribas, F.; GOMES-JÚNIOR, A. R.; BENEDETTI-ROSSI, G.; e outros 33 co-autores

DOI: 10.1088/0004-637x/811/1/53

Neste trabalho participei na aquisição de posições astrométricas de Plutão (observação, redução e análise de dados) para a previsão das ocultações. Estas posições foram cruciais para a determinação do *offset* utilizado na efeméride de Plutão, permitindo determinar um caminho mais acurado da posição da sombra.

(5) Astrometric positions for 18 irregular satellites of giant planets from 23 years of observations, *Astronomy & Astrophysics*, 580, A76, (2015)

GOMES-JÚNIOR, A. R.; ASSAFIN, M.; VIEIRA-MARTINS, R.; ARLOT, J.-E.; CAMARGO, J. I. B.; Braga-Ribas, F.; DA SILVA NETO, D. N.; ANDREI, A. H.; DIAS-OLIVEIRA, A.; MORGADO, B.; BENEDETTI-ROSSI, G.; DESMARS, J.; LAINEY, V.; THUILLOT, W.

DOI: 10.1051/0004-6361/201526273

Neste trabalho, além de participar de diversas missões de observação realizadas

no OPD/LNA, participei da redução e tratamento de dados e obtive posições astrométricas dos satélites irregulares.

(6) Astrometry of the main satellites of Uranus: 18 years of observations *Astronomy & Astrophysics*, 582, A8, (2015)

CAMARGO, J. I. B.; MAGALHÃES, F. P.; VIEIRA-MARTINS, R.; ASSAFIN, M.; Braga-Ribas, F.; DIAS-OLIVEIRA, A.; BENEDETTI-ROSSI, G.; GOMES-JÚNIOR, A. R.; ANDREI, A. H.; DA SILVA NETO, D. N.

DOI: 10.1051/0004-6361/201526385

Neste trabalho, também como no anterior, participei de diversas missões de observação realizadas no OPD/LNA, e da redução e tratamento de dados. Também obtive posições astrométricas dos satélites de Urano.

(7) Results of two multichord stellar occultations by dwarf planet (1) Ceres *Royal Astronomical Society. Monthly Notices*, 451, 3, 2295, (2015)

GOMES-JUNIOR, A. R.; GIACCHINI, B. L.; Braga-Ribas, F.; ASSAFIN, M.; VIEIRA-MARTINS, R.; CAMARGO, J. I. B.; SICARDY, B.; TIMERSON, B.; GEORGE, T.; BROUGHTON, J.; BLANK, T.; BENEDETTI-ROSSI, G.; BROOKS, J.; DANTOWITZ, R. F.; DUNHAM, D. W.; DUNHAM, J. B.; ELLINGTON, C. K.; EMILIO, M.; HERPICH, F. R.; JACQUES, C.; MALEY, P. D.; MEHRET, L.; MELLO, A. J. T.; MILONE, A. C.; PIMENTEL, E.; SCHOENELL, W.; WEBER, N. S.

DOI: 10.1093/mnras/stv1081

Neste trabalho participei na extração de imagens FITS a partir de arquivos de vídeo, da redução de dados e, após uma fotometria, obtive a curva de luz de um dos sítios da ocultação.

(8) Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations, *Astronomy & Astrophysics*, 584, A96, (2015)

DESMARS, J.; CAMARGO, J.I.B.; Braga-Ribas, F.; VIEIRA-MARTINS, R.; ASSAFIN, M.; Vachier, F.; Colas, F.; Ortiz, J. L.; Duffard, R.; MORALES, N.; SICARDY, B.; GOMES-JÚNIOR, A.R.; BENEDETTI-ROSSI, G.

DOI: 10.1051/0004-6361/201526498

Neste trabalho participei de diversas missões de observação realizadas no OPD/LNA, participei da redução e análise dos dados e obtive posições astrométricas para diversos TNOs que foram utilizadas no desenvolvimento do NIMA.

Apêndice C

Participação em reuniões internacionais com apresentação de trabalho oral

Neste apêndice são apresentadas as reuniões internacionais, ordenadas por ano, nas quais realizei apresentação de trabalho oral. Os trabalhos indicados são somente como primeiro autor.

2013:

Nome do evento: The Pluto System on the Eve of Exploration by New Horizons: Perspectives and Predictions

Instituição promotora: The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory and The Southwest Research Institute

Local: The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory: Kossiakoff Center, Laurel, MD, Estados Unidos

Título do Trabalho: Astrometric Analysis of 15 years of Pluto Observation

2014:

Nome do evento: 46th Annual Meeting of the Division for Planetary Sciences - AAS

Instituição promotora: American Astronomical Society

Local: JW Marriott Starr Pass, Tucson, AZ, Estados Unidos

Título do Trabalho: The Use of Stellar Occultations to Study Trans-Neptunian Objects

Nome do evento: Asteroids, Comets and Meteors - ACM
Instituição promotora: University of Helsinki
Local: Marina Congress Center, Helsinki, Finlândia
Título do Trabalho: Study of transneptunian objects through stellar occultations

Nome do evento: Asteroids, Comets and Meteors - ACM
Instituição promotora: University of Helsinki
Local: Marina Congress Center, Helsinki, Finlândia
Título do Trabalho: Improved astrometric analysis of Pluto

2015:

Nome do evento: European Planetary Science Congress
Instituição promotora: Euro Planet
Local: La Cité Internationale des Congrès, Nantes, França
Título do Trabalho: The November 14th, 2014 stellar occultation by the TNO 2007UK126

Apêndice D

Velocidade de Escape e Velocidade de ejeção de matéria

No Capítulo 2 foi apresentado detalhes sobre as observações de Chariklo e Chiron utilizando o HST. Em um momento, é dada a informação de que os Centauros possuem um tamanho ‘especial’, de forma que sua velocidade de escape seja similar à velocidade típica de ejeção de matéria. Neste apêndice é dado um pouco mais de detalhes sobre o assunto.

A velocidade de escape é a velocidade que uma partícula precisa para ‘escapar’ da atração gravitacional de um corpo com massa M . Para um corpo esfericamente simétrico, esta velocidade é dada por

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (D.1)$$

onde G é a constante gravitacional ($= 6,7408 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$) e r a distância do centro de massa. Considerando uma partícula na superfície de um corpo de raio R e densidade ρ , a equação D.1 pode ser reescrita como:

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2G\rho V}{R}} = \sqrt{\frac{8G\pi\rho VR^2}{3}} = \alpha R\sqrt{\rho} \quad (D.2)$$

com R dado em metros, ρ em kg m^{-3} e $\alpha \sim 2,3639 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-3/2} \text{ kg}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$. Isto é, para um corpo de gelo de água ($\rho \sim 1000 \text{ kg m}^{-3}$) com raio R de aproximadamente 100 km, sua velocidade de escape será $V_{esc} \sim 75 \text{ m s}^{-1}$. Chariklo tem um raio de 124 km e Chiron 114 km, implicando que estes dois centauros possuem uma velocidade de escape da ordem de 100 km s^{-1} .

A velocidade de ejeção de matéria depende de sua origem. Se a ejeção é causada por um impacto, as velocidades podem atingir velocidades de alguns km s^{-1} , como observado no cometa Temple1^[69;70]. Entretanto, essa velocidade é para um intervalo de tempo pequeno próximo ao impacto e chegam a ser uma ordem de grandeza menor (isto é, da ordem de 100 m s^{-1}) para um intervalo de tempo maior^[69;70;89]. Além disso

é importante considerar que velocidades de impacto na região do cinturão principal de asteroides é da ordem de 5 km s^{-1} enquanto que no Sistema Solar exterior esta velocidade cai para 1 km s^{-1} e devem ser ainda menores na região além do cinturão de Kuiper^[34].

Outra possibilidade da origem de ejeção de material é por uma origem interna, por exemplo, através de *geysers*. A velocidade de ejeção neste caso depende de uma quantidade de fatores muito maior, como o tipo e tamanho da partícula, a distância heliocêntrica, temperatura, coeficientes de arraste de gás, etc. Diversos estudos (SODERBLOM *et al.*¹²⁴, STERN e CAMPINS¹²⁸, LORENZ⁷⁷, YELLE *et al.*¹⁴⁵, COMBI *et al.*³³) apresentam velocidades típicas de ejeção em torno de 30 a 400 m s^{-1} .

Independente da origem da ejeção, note que uma velocidade típica é da ordem de 100 m s^{-1} , mesma ordem de grandeza das velocidades de escape dos dois Centauros estudados neste trabalho. A presença de anéis em Chariklo e também em Chiron (considerando a interpretação de ORTIZ *et al.*¹⁰¹) pode ser devido à estes dois centauros possuírem um tamanho que faz com que partículas ejetadas fiquem ‘presas’ gravitacionalmente, permitindo (ao menos facilitando) o desenvolvimento de estruturas no entorno destes corpos.

Apêndice E

Artigo sobre o TNO 2007 UK₁₂₆

Neste apêndice é apresentado o artigo que será submetido em breve à revista *Astrophysical Journal*. Alguns pequenos ajustes no texto poderão ocorrer, porém o resultado não sofrerá alterações.

Results from the 2014 November 15th multi-chord stellar occultation by the TNO 2007 UK₁₂₆

Benedetti-Rossi, G.¹; Sicardy, B.²; Buie, M. W.³; Ortiz, J. L.⁴; Vieira-Martins, R.¹; Keller,
J. M.⁵; Braga-Ribas, F.⁶; Camargo, J. I. B.¹; Assafin, M.⁷; Morales, N.⁴; Duffard, R.⁴;
Dias-Oliveira, A.¹; Santos-Sanz, P.⁴; Desmars, J.⁸; Gomes-Júnior, A. R.⁷; Bardecker, J.^{9,14};
Bean, J. K. Jr.¹⁴; Olsen, A. M.⁹; Ruby, D. W.^{10,14}; Sumner, R.¹⁴; Thirouin, A.¹¹;
Gómez-Muñoz, M. A.¹²; Gutierrez, L.¹²; Wassermann, L.¹¹; Charbonneau, D.¹³; Irwin, J.¹³;
Levine, S.¹¹; Skiff, B.¹¹

¹ Observatório Nacional - ON/MCT&I, Brazil

² LESIA, Observatoire de Paris, CNRS UMR 8109, Université Pierre et Marie Curie,
Université Paris-Diderot, Meudon, France;

³ Southwest Research Institute, Boulder, CO, USA

⁴ Instituto de Astrofísica de Andalucía, IAA-CSIC, Spain

⁵ California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, USA

⁶ Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Brazil

⁷ Observatório do Valongo - OV/UFRJ, Brazil

⁸ Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides - Observatoire de Paris,
UMR 8028 CNRS, France

⁹ IOTA, International Occultation Timing Association, USA

¹⁰ University of Nevada, Reno, NV, USA

¹¹ Lowell Observatory, Flagstaff, AZ, USA

¹² Instituto de Astronomía - Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM, Mexico

¹³ Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, MA, USA

¹⁴ RECON, Research and Education Collaborative Occultation Network

aastex-help@aaas.org

Received _____; accepted _____

ABSTRACT

We present results derived from the first multi-chord stellar occultation by the trans-Neptunian object (229762) 2007 UK₁₂₆, observed on 2014 November 15. The event was observed by the RECON project and collaborators in seven different sites through the United States. We obtain a satisfactory fit to seven chords, yielding an elliptical fit to the chords with equivalent radius $R_{eq} = 319_{-7}^{+14}$ km and geometric visual albedo $p_V = 0.159_{-0.013}^{+0.007}$. Assuming that the object is a Maclaurin spheroid with indeterminate aspect angle, we derive an oblateness of $\epsilon = 0.105_{-0.040}^{+0.068}$, an equatorial radius of $R = 338_{-10}^{+15}$ km. An upper limit for density of $\rho = 1742 \text{ kg m}^{-3}$ was estimated for the body.

Subject headings: Kuiper belt objects: individual (229762, 2007 UK126) - occultations
- planets and satellites: atmospheres - planets and satellites: fundamental parameters

1. INTRODUCTION

Trans Neptunian objects (TNOs) are remnants of a collisionally and dynamically evolved planetesimal disk in the outer solar system. Their physical characteristics can provide and reveal important clues about the primordial protoplanetary nebula, planet formation, and other evolutionary processes (Lykawka & Mukai 2008). Moreover, the inferred chemical, thermal, and collisional processes that they underwent tell us something about the evolution of the outer Solar System. However, their large distances make the study of those bodies difficult and our knowledge about their sizes, shapes, albedo, densities, and atmospheres remains fragmentary (Parker et al. 2015; Stansberry et al. 2008).

In the past 25 years more than 1900 TNOs and Centaurs have been discovered (Minor Planet Center (2016a, 2016b)). One method to obtain accurate information about these objects is the stellar occultation technique. It can provide sizes and shapes at km-level, detect atmospheres at nanobar-level (Sicardy et al. (2011); Ortiz et al. (2012)), and even detect features like jets and rings (Ortiz et al. 2015; Braga-Ribas et al. 2014). Since 2009, after the first successful observation of a stellar occultation by a TNO (other than Pluto or Charon) called 2002 TX₃₀₀ (Elliot et al. 2010), several objects have been observed by stellar occultations. Examples are Varuna (Sicardy et al. 2010), Eris (Sicardy et al. 2011), 2003 AZ₈₄ (Braga-Ribas et al. 2011, 2012), Quaoar (Person et al. 2011, Sallum et al. 2011, Braga-Ribas et al. 2013), Makemake (Ortiz et al. 2012), 2002 KX₁₄ (Alvarez-Candal et al. 2014), and Centaur objects like Chariklo (Braga-Ribas et al. 2014) and Chiron (Ortiz et al. 2015; Ruprecht et al. 2015).

The observation of a multi-chord stellar occultation on 2014 November 15 increases that list, now including the TNO (229762) 2007 UK₁₂₆, the main topic of this paper.

This TNO was discovered by Schwamb et al. (2008) in October 2007 with an estimated radius and albedo of 299.5 ± 38.9 km and $0.167^{+0.058}_{-0.038}$ (Santos-Sanz et al. 2012), respectively.

With a semi-major axis of 73.81 AU, aphelion distance of 109.7 AU, orbital period of 634.13 yr, orbital eccentricity of 0.492 and an inclination of 23.34 degrees (JPL Small-Body Database Browser 2016), it is usually classified as a SDO (according to Gladman et al. (2008)). Moreover, Grundy et al. (2011) reported the discovery of a companion with a magnitude difference of 3.79 mag in the F606W band of the Hubble Space Telescope. Its orbit is still unknown, but it is expected to be non-circular (Thirouin et al. 2014).

In this paper, we present results derived from the 2014 November 15 stellar occultation by this body. Section 2 briefly describes our prediction scheme and presents the observations. Data analysis is described on Section 3. The size and shape of the TNO as well as their physical implications are discussed in Section 4, before concluding remarks in Section 5.

2. PREDICTIONS AND OBSERVATIONS

The 2014 November 15 occultation was identified in a systematic search for TNO occultation candidate stars, made at the 2.2 m telescope of ESO, using the Wide Field Imager (WFI). This search yielded local astrometric catalogs for 5 Centaurs and 34 TNOs (plus Pluto and its moons) up to 2015, and for stars with magnitudes as faint as $R \sim 19$. Further details can be found in Assafin et al. (2010, 2012), Camargo et al. (2014) and Desmars et al. (2015).

After identifying the target star, astrometric updates of the star UCAC4 448-006503 (UCAC2 31623811, $R=15.7$) close in time to the predicted occultation were performed with the 60cm telescope at Pico dos Dias Observatory (OPD/LNA - IAU code 874) and with the 77cm telescope at La Hita Observatory (IAU code I95). From OPD, 20 images with 45s exposure time were acquired using Johnson's I filter (centered at 800 nm) and an IkonL 9867 CCD camera on October 19, 2014. From La Hita, 99 unfiltered images of 400 s exposure

were obtained on October, 29, 30 and 31, 2014, with the 4k × 4k camera, which provided a very wide field of view of 47 × 47 arcmin. In both cases, the images were obtained at times when the objects were near the meridian, to minimize possible Differential Chromatic Refraction (DCR) problems. Unfortunately, since the apparent visual magnitude of the TNO is approximately 20.1, the signal to noise of 2007 UK₁₂₆ in the individual exposures was poor and did not allow us to obtain accurate enough astrometry of the TNO.

To derive accurate astrometry of 2007 UK₁₂₆, 36 images of the TNO were obtained with the Calar Alto (IAU code 493) 1.2m telescope using the 4k × 4k DLR CCD camera on October 28 and 29, 2014. The camera provides a field of view of 22 × 22 arcmin. Exposure times were 400 s, which allowed us to obtain a signal to noise ratio on the target of >40, with no filter. The images were also obtained when the object was near culmination to minimize any possible problem due to DCR. The astrometry provided the offsets in right ascension and declination with respect to the nominal positions based on the JPL Horizons ephemeris. From the dispersion of the offset measurements the final uncertainty in the prediction was estimated about 20 mas, comparable to the expected shadow path width. The final prediction indicated that the shadow was favorable for observers in several states in the USA (Fig. 1). A compilation of our measurements provides the following ICRF/J2000 star position:

$$\begin{aligned}\alpha &= +04^h29^m30.^s610 \pm 0.^{\prime\prime}022 \\ \delta &= -00^\circ28'20.^{\prime\prime}908 \pm 0.^{\prime\prime}023\end{aligned}\tag{1}$$

The RECON project (Buie & Keller 2016) and other potential sites participated in the campaign for a total of 20 different stations (Tables 1 and 2). Bad weather conditions spoiled observations in 11 sites. Meanwhile, six sites from RECON, one IOTA (International Occultation Timing Association) site located in Urbana, Illinois, and two telescopes at

San Pedro Martir acquired data, for a total of 7 positive detections of the event and two negative chords at San Pedro Martir, which were located more than 500 km south of the shadow path (Fig. 1). The times of the star disappearances (ingress) and re-appearances (egress) for the seven detections are listed on Table 3.

All acquired data, with exception of the data from the two telescopes in San Pedro Martir, were in video format. A video time inserter (VTI) was used to time-stamp on each individual frame of the video. The VTI interacts with a GPS to obtain the time, ideally with an absolute accuracy of a few milliseconds. Unfortunately, no information is saved on any image header because of the video format.

3. DATA ANALYSIS

Considerable detail is provided on video data that is applicable to RECON and IOTA data in Buie & Keller (2016). In particular, the discussion on frame and field interleaving of the data is especially relevant for these data. All of the RECON data were collected with a SENSEUP value of 128x, meaning that the integration time is equal to 128 times the field rate of the NTSC video signal, approximately 2 seconds. The Urbana data were collected with a Watec camera integrating 128 video frames, or approximately 4 seconds. If there are no dropped frames or other problems, the RECON video will have 64 copies of each integration in the video data stream. The Urbana video will have 128 copies.

Two independent analyses were performed on the video data to extract lightcurves and timing information. The two approaches are different enough to be useful as a cross-check of results to provide information on the uncertainties in the final projected shape. The primary analysis is from Benedetti-Rossi (GBR) and the secondary analysis is from Buie (MWB).

3.1. OCCULTATION LIGHT CURVES

3.1.1. GBR extraction

Using AUDELA (a free and open source astronomy software for digital observations: CCD cameras, Webcams, etc.) we extracted individual frames to FITS format from the video at a rate of 29.97 frames per second. A careful check was done in all sets of images to verify whether the extracted time corresponds to the time printed at each frame.

The frames were then grouped to match the corresponding SENSEUP value. The first and last frames of each 64-frame (or 128) sequence were identified by counting frames from a calibrated starting point and checked with a change in field brightness. They were then excluded and the other 62 (or 126) frames were averaged to obtain each image that corresponds to an individual exposure time. By not considering the first and last frame from a sequence we avoid the need to de-interlace and re-interlace the frames and we do not take into account any field from the previous or next sequence. Note that this process also preserves the mid time of each image which was extracted from the mid-frame of each sequence. This method generates times with a systematic shift with respect to the absolute times (one integration cycle) but does not affect the final shape when all chords are processed the same way. This whole process of converting video to separate stack image files requires special attention because of possible dropped frames, duplicated fields or any incompatibility with different software packages, drivers or plug-ins.

Differential aperture photometry was extracted from the data using the PRAIA package (Assafin et al. 2011) to obtain the light curves. Two field stars with 8 pixel and a third one with 10 pixel photometric aperture were used to calibrate the occulted star flux. Sky background flux was obtained from an annulus of internal radius of 16 and external radius of 20 pixels around the first two calibration stars and 20 to 24 pixels around the

third one. For the occulted star, a photometric aperture of 7 pixels was used while for the sky background flux an annulus of 10 pixels inner radius and 16 pixels for the outer radius was used.

The occulted star flux was then normalized to the unocculted stellar flux by applying a third-degree polynomial fit to the flux just before and after the event. The resulting light curves are shown in Figure 2.

3.1.2. MWB extraction

Accurate determination of the time of each integration is discussed in detail in (Buie & Keller 2016) and requires locating the exact place in the video stream where a new integration is first seen.

In this analysis, custom software was created in IDL for each site’s data. The first step requires converting the AVI-format video data to individual image files. The freely available tool, *ffmpeg*, was used to extract a sequence of images to individual PNG format files. In all cases only 90-120 seconds of data were extracted, centered if possible on the occultation chord.

The basic flow of data processing contains some or all of the following steps, customized for each dataset. 1) Create a mean sky image. If possible to build, this image contains the general background gradient, typically from amplifier glow in one corner as well as the hot pixels. Sites where the tracking was perfect could not be corrected since separate dark or sky images were not collected. Mean sky images require a rather complicated stacking of frames. The first step is to perform a robust stack of one image per integration. There are as many of these stacks as there are frames in an integration and these stacks are also robustly averaged into the final mean sky image. If the entire cube is stacked at once,

the frame replication for the integrations will subvert the robust averaging algorithm. 2) Subtract mean sky image from each frame. 3) Re-interlace the images, if needed. The need for re-interlacing is easily seen in a raw lightcurve of a bright star. Each integration has a unique signal level and will look like steps from one integration to the next. If the signal steps cleanly between integrations, the interlacing is correct. If there is a single frame point between the two levels, interlacing is wrong. 4) Extract source and comparison star fluxes from each frame. 5) Down-sample by averaging to a single measurement for each integration. 6) Apply timing formula from Buie & Keller (2016) to get absolute timing of each data point. The deviations from this set of steps is now described for each site in turn.

The photometric extraction required some special handling in all cases. Four nearby field stars were measured to obtain both position and flux. When the occultation star was visible, its position was also measured. The offset for the occultation star relative to the brightest field star was determined for each dataset. This offset was used as the exact position for extracting the occultation star flux on each image. This process avoids aperture wander off of the occultation star location during the occultation.

Bardecker/Gardnerville – The mean sky image could not be generated due to the excellent tracking at this site and the lack of separate calibration image sequences. The video data required re-interlacing but did not have any instances of dropped frames in the video data stream. A 5-pixel photometric aperture was used for the sources and a local sky value was determined for each with a sky annulus of 8–40 pixels. The frame integration boundary was visually determined by seeing the change in the background noise. A single transition was sufficient to establish the timing for the entire sequence.

Jack C. Davis Observatory/Carson City (B) – The mean sky image could not be generated due to high-quality tracking and no calibration images. The data required re-interlacing and also suffered from dropped frames. Each frame was manually inspected

to identify corrupted frames (one or two every 3 seconds). During the manual inspection the IOTA-VTI timing information was used to establish the identity of each frame and its association with the individual integrations. In some cases, all 64 frames were good, but many had one or two frames that were not used. When properly identified, the timing is not affected by the loss of a few frames out of the 64 copies that should have been collected. In no case was there a dropped frame on an integration boundary. The photometric extraction used a 5-pixel object aperture and a sky annulus of 8-25 pixels. The final result was not affected by the dropped frames.

Ruby/Reno – A mean sky frame was generated and subtracted. The data were re-interlaced and had no dropped frames. The photometry was generated from a 5-pixel object aperture and a sky annulus from 8-40 pixels. The raw photometry shows clear signs of degrading sky conditions from 10:18 – 10:20 UT. Getting the timing required a more careful examination of the images and determination of the brightness of the transitional frames for the model timing extractions.

Sumner/Carson City (S) – A sky frame was generated and subtracted. The images were re-interlaced and had the same dropped frame problem found with the other Carson City site. The final results have full-quality data after cleanup. The photometry was generated with a 5-pixel object aperture and the sky was determined from a robust mean of the entire image which was flat due to the subtracted sky mean.

Jack C. Davis Observatory/Carson City (B) – The mean sky image could not be generated to high-quality track and no calibration images. The data required re-interlacing and also suffered from dropped frames. Each frame was manually inspected to identify corrupted frames (one or two every 3 seconds). During the manual inspection the IOTA-VTI timing information was used to establish the identity of each frame and its association with the individual integrations. In some cases, all 64 frames were good, but many had one or

two frames that were not used. When properly identified, the timing is not affected by the loss of a few frames out of the 64 copies that should have been collected. In no case was there a dropped frame on an integration boundary. The photometric used was a 5-pixel object aperture and a sky annulus of 8-25 pixels. The final result, though laborious, was not affected by the dropped frames.

Yerington – A mean sky frame was generated and subtracted. The data were re-interlaced and had no dropped frames. The photometry was generated from a 5-pixel object aperture and sky was determined from the mean of each frame.

Bardecker/Gardnerville – The mean sky image could not be generated due to the excellent tracking at this site and the lack of separate calibration image sequences. The video data required re-interlacing but did not have any instances of dropped frames in the video data stream. A 5-pixel photometric aperture was used for the sources and a local sky value was determined for each with a sky annulus of 8–40 pixels. The frame integration boundary was visually determined by seeing the change in the background noise. A single transition was sufficient to establish the timing for the entire sequence. Note that this site used a telescope with an equatorial mount.

Tonopah – A mean sky frame was generated and subtracted. The data were re-interlaced and had no dropped frames. The photometry was generated from a 5-pixel object aperture and sky was determined from the mean of each frame.

Olsen/Urbana – This dataset uses a similar but not identical setup to the standard RECON system. The camera was a Watec-120N+ and has a similar sensitivity and operation to the RECON MallinCAM cameras but can integrate twice as long. The timing was provided by a Kiwi OSD video time inserter. A sky frame was generated and subtracted. The images were re-interlaced and there were no dropped frames. A 5-pixel photometric aperture was used with a sky annulus of 8-50 pixels to remove the small

amount of flat sky residual background.

All the resulting lightcurves are shown in Figure 2.

3.2. OCCULTATION TIMING

As described by Braga-Ribas et al. (2013), the start and end times of the occultation were obtained for each light curve by fitting a sharp edge occultation model. This model is convolved by Fresnel diffraction, the CCD bandwidth, the stellar apparent angular diameter in kilometers, and the finite integration time (see Widemann et al. (2009) for more details).

The Fresnel scale ($F = \sqrt{\lambda D/2}$) for the geocentric distance $D = 42.6$ AU (or 6.37×10^9 km) of 2007 UK_{126} by the time of the event is approximately 1.4 km for a typical wavelength of $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$. The star apparent angular diameter is estimated using the formulae of van Belle (1999). Its B, V, and K apparent magnitudes are 16.2, 15.6, and 13.7, respectively, in the NOMAD catalog (Zacharias et al. 2004). This yields a diameter of about 0.3 km projected at the distance of the 2007 UK_{126} . The smallest integration time used in the positive observations was 2 s, which translates to almost 48 km in the celestial plane. Therefore, the occultation light curves are largely dominated by the integration times, not by Fresnel diffraction or star diameter.

The occultation fits consist of minimizing a classical χ^2 function for each light curve, as described in Sicardy et al. (2011). The free parameter to adjust is the ingress (disappearance) or egress (re-appearance) time, which provides the minimum value of χ^2 denoted as χ^2_{min} . The best fits to the occultation light curves are shown in Figure 2, and the derived instants of ingress and egress are shown in Table 3.

Note that the ingress time for Reno presents a big error bar. This indetermination occurs due to the low S/N ratio of the occulted star which reflects to a very noisy light

curve and the two data sets induce the determination of a different time.

3.3. LIMB FITTING

We considered a general shape for the body’s limb as an ellipse, which is characterized by five adjustable parameters ($M=5$): the coordinates of the body center, relative to the star in the plane of the sky (f_c, g_c); the apparent semi-major axis a' ; the apparent oblateness $\epsilon' = (a' - b')/a'$ (where b' is the apparent semi-minor axis); and the position angle P of the semi-minor axis b' . The position angle P is counted positively from the direction of celestial north to celestial east while the quantities (f_c, g_c), expressed in kilometers, are positive toward the celestial east and north, respectively. The apparent oblateness ϵ' is the result of the projection of an oblate Maclaurin spheroid with semi-axes $a = b > c$, where a and c are the true equatorial and polar radii, respectively. The true oblateness $\epsilon = 1 - (c/a)$ is then related to the apparent oblateness through

$$\epsilon' = 1 - \sqrt{\cos^2(\xi) + (1 - \epsilon)^2 \sin^2(\xi)} \quad (2)$$

where ξ is the angle between the polar c -axis and the line of sight. We will call this quantity the “polar aspect angle“ with $\xi = 0^\circ$ (resp. $\xi = 90^\circ$) corresponding to the pole-on (resp. equator-on) geometry. Unfortunately the pole direction of the 2007 UK₁₂₆ is not known so ξ can not be determined.

With the seven positive observations we have the ingress and egress times, or $N = 14$ chord extremities (Figure 2), whose positions are denoted as $f_{i,obs}, g_{i,obs}$. Those instants allow us to derive the chords. The elliptical fit to the chord extremities is found by minimizing the relevant χ^2 function. In that case, the value of χ^2 per degree of freedom (or unbiased χ^2) is given by $\chi_{pdf}^2 = \chi^2/(N - M)$. The $1-\sigma$ error bars are obtained by varying

χ^2 from its minimum value χ_{min}^2 to $\chi_{min}^2 + 1$. Figures 3 and 4 present the respective chords and the ellipse fit derived for the GBR and MWB extractions.

4. SIZE AND SHAPE

Objects in the order of 1000 km diameter or more are expected to have reached the hydrostatic equilibrium. Those bodies will then assume the shape of a Maclaurin spheroidal or Jacobi ellipsoidal (Chandrasekhar 1987). Under some assumptions, the critical diameter to reach equilibrium can be determined, varying from 200-900 km for icy bodies or from 500-1200 km for rocky bodies (Tancredi & Favre 2008). As 2007 UK₁₂₆ is within the critical ranges and considering it is in the small angular momentum regime (its rotational period is estimated to be of 11.5 hours and it presents a small-amplitude rotational light curve with $\Delta m = 0.03 \pm 0.01$ mag (Thirouin et al. 2014)) we can assume that the TNO is close to a Maclaurin shape. In that way, we can express its radius using the apparent equivalent radius instead of a' . This quantity is defined by $R_{eq} = \sqrt{a'b'} = a'\sqrt{1-\epsilon'}$ and is the radius of the disk that has the same area as that enclosed by the apparent limb.

Figures 3 and 4 presents the best fit for the two sets of timings (GBR and MWB). Both fits are in good agreement with an ellipse but note that the chord for Urbana is a little displaced to East. This shift can provide a shape that has a significant departure from the ellipse. Since the TNO is near the limit of the critical ranges to be a Maclaurin object, we can consider two possibilities here: (1) all the timings are correct within 1σ error, implying that 2007 UK₁₂₆ is compatible with a Maclaurin object and can present some topographic features (craters or mountains) of the order of 100 km, or (2) 2007 UK₁₂₆ is a regular Maclaurin object, implying that there were timing problems at some stations. The second possibility can be discarded since it is needed to assume that all the sites had timing issues and without this consideration we obtained two equivalent solutions from different

reduction methods.

Also the fact that the observations are not repeatable makes difficult to assess timing errors and we do not expect large absolute timing errors at the various stations. Although it is important to note that the process of converting video to the stack images require a very special attention on GBR analysis (Section 3.1.1) and may present some small error in time. For the MWB analysis, the conversion from video data to a lightcurve requires a careful processing but there are no intrinsic timing errors beyond limitations imposed by the low SNR for the event (Section 3.1.2).

4.1. NOMINAL SOLUTION

In Figures 3 and 4 it is evident that the two fits using the timings from GBR and from MWB have similar shapes. Even though those chords are slightly different, they agree if we consider 1- σ error.

By using the times of disappearance and reappearance for each of the chords, we obtain two solutions: the *nominal GBR* and the *nominal MWB* solutions. Using GBR timings we obtain a best value of $\chi_{pdf}^2 = 0.59$ with an equivalent radius $R_{eq} = 319_{-7}^{+14}$ km, an equatorial radius $a = 338_{-10}^{+15}$ km, oblateness $\epsilon' = 0.105_{-0.040}^{+0.050}$ and position angle $P = 129^{\circ} \text{ }_{-22}^{+14}$ $^{\circ}$ while using MWB timings, we obtain the *nominal MWB* with a best value of $\chi_{pdf}^2 = 0.56$ with an equivalent radius $R_{eq} = 319_{-6}^{+12}$ km, an equatorial radius $a = 340_{-8}^{+12}$ km, oblateness $\epsilon' = 0.118_{-0.048}^{+0.055}$ and position angle $P = 134^{\circ} \text{ }_{-17}^{+14}$ $^{\circ}$.

Purely circular shape was also fit to the data, resulting in circles with Radius $R_{GBR} = 324_{-23}^{+27}$ km for GBR timings and $R_{MWB} = 328_{-21}^{+26}$ km for MWB timings with χ_{pdf}^2 equal to 1.69 and 1.46, respectively. An elliptical shape is formally a better fit to the data but a circular profile fits the data almost as well, being also a secure result.

We also analysed the possibility that one or more sites having a timing problem. Otherwise, to perfectly agree with all chords, 2007 UK₁₂₆ should present an irregular shape with unreasonably high mountains (about 100 km). If we assume that for some unknown reason the time is shifted in every station and allow the chords to slide, we can obtain a solution with a best value of $\chi_{pdf}^2 = 1.37$. Comparing to the nominal solutions, this fit gives a similar result but it is needed to consider time errors as big as 1 s (half of integration time). This little improvement on the fit makes the time-shifted solution less probable to be the real figure and can be neglected.

4.2. PHYSICAL PROPERTIES FOR 2007 UK₁₂₆

Assuming a Maclaurin shape for 2007 UK₁₂₆ we obtained two solutions. The parameters obtained are presented on Table 4. The two nominal solutions are compatible within $1\text{-}\sigma$. Also, we cannot discard intermediate solutions with topographic features still compatible with a Maclaurin body, which would demand smaller time shifts but bigger χ_{min}^2 and χ_{pdf}^2 .

To derive the size of the object with a high precision, stellar occultations allows us to get good and accurate values, but the system density can only be derived if the system mass is known (Sicardy et al. 2011), which is not the case. As said in Section 1, Grundy et al. (2011) reported the discovery of a companion, but orbital elements are not available. If the system mass is unknown (or if the object is not a binary), the upper limit of the density can only be estimated from the nominal $P = 11.05$ h rotation period of 2007 UK₁₂₆ in Thirouin et al. (2014). If the oblateness is 0.105 (nominal GBR solution) we can derive a upper limit for the density of $\rho = 1742 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $\rho = 1620 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ for the nominal MWB solution. These are upper limits because if the TNO is not being viewed equator on, the object would be more elongated (and therefore less dense to accomodate the higher elongation). Nevertheless, the period given is somewhat uncertain because the spectral

power shown in Thirouin et al. (2014) is small for a confident detection of a periodicity.

With the calculated radius R_{eq} , it is possible to obtain the geometric albedo p with the formula

$$p = (AU_{km}/R_{eq})^2 \times 10^{0.4(H_{\odot}-H)}, \quad (3)$$

where $AU_{km} = 1.49598 \times 10^8$ km, H_{\odot} is the Sun magnitude at 1 AU, and H is the object absolute magnitude. Thirouin et al. (2014) present $H_V = 3.4$ and Perna et al (2010, 2013) give $H_V = 3.59 \pm 0.04$. For the absolute magnitude of the Sun we have adopted the well-established value of $H_{\odot,V} = -26.74$. Adopting the ranges of equivalent radii obtained for both solutions, we calculate the geometric albedo of 2007 UK₁₂₆ in the visible (p_V). The error bars represent the range of the albedo obtained for a given solution, combined with the error in absolute magnitude. Results are presented on Table 4.

5. Conclusion

We observed the first multi-chord stellar occultations by the trans-Neptunian object (229762) 2007 UK₁₂₆. The shadow crossed the United States on 2014 November 15 and we obtained 7 positive chords. Although there is no available information about the mass of the body, it was possible to obtain its equivalent radius and visual albedo and also derive an upper limit for the body density.

This is the first TNO occultation result from the RECON project. It was observed during the pilot phase with only a few sites in operation. For future occultations, with sufficient astrometric support, five times as many RECON sites will be available for observations.

We find two equivalent solutions for the body size. The nominal GBR solution gives an equivalent radius $R_{eq} = 319_{-7}^{+14}$ km and visible geometric albedo that may vary from $0.159_{-0.013}^{+0.007}$ to $0.189_{-0.015}^{+0.009}$, depending on which value for absolute magnitude we use. The second nominal solution also gives an equivalent radius of $R_{eq} = 319_{-6}^{+12}$ km and albedo that may vary from $0.159_{-0.011}^{+0.006}$ to $0.189_{-0.013}^{+0.008}$. Both solutions present a similar minimum χ^2 per degree of freedom (0.59 and 0.56, respectively). It is important to note that the determination of the absolute magnitude by two different authors were obtained using observations in different filters. Values for equivalent radius are similar to the radius derived from Hershel observations presented in Santos-Sanz et al. (2012).

The upper limit for density was estimated to be $\rho = 1742 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ for the *nominal GBR* solution or $\rho = 1620 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ for the *nominal MWB* solution, considering the rotation period of 11.05 hours. No other information could be derived since there is insufficient orbital information available. Obtaining an orbit for this companion becomes very important to get a firm constraint on density.

The occultation chords also shows that there is no evidence of a very close binary with a position angle at the time of the event that is roughly ± 45 degrees from the shadow track direction.

The authors want to thank Barclay Anderson, Charley Arrowsmith, Buck Bateson, Clair Blackburn, Teralyn Blackburn, Mystery Brown, Brian Cain, Mark Callahan, Shelley Callahan, Matt Christiansen, Lynn Coffman, Brian Crosby, Scott Darrington, Adam Eisenbarth, Bill Gimple, Erick Hsieh, Todd Hunt, Levi Kinateder, Colton Kohler, Joanna Kuzia, Les Kuzia, Ethan Lopes, Ian Mahaffey, Jason Matkins, Andrew Maynesik, Terry Miller, Seth Nuti, Melanie Philips, Jiawei Simon Qin, Jim Reichle, Dan Ruby, Jeff Schloetter, David Schulz, Jeannie Smith, Kathy Trujillo, Jacob Wagner, Andrew Yoder, Ted Zel, and all people involved in this occultation observation.

Part of the research leading to these results has received funding from the European Research Council under the European Community’s H2020 (2014-2020/ ERC Grant Agreement n 669416 ”LUCKY STAR”).

Funding from Spanish grant AYA-2014-56637-C2-1-P is acknowledged, as is the Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía, J. A. 2012-FQM1776. R.D. acknowledges the support of MINECO for his Ramon y Cajal Contract. FEDER funds are also acknowledged.

This research was based on data obtained at the Lowell Observatory’s Discovery Channel Telescope (DCT). Lowell operates the DCT in partnership with Boston University, Northern Arizona University, the University of Maryland, and the University of Toledo. Partial support of the DCT was provided by Discovery Communications. LMI was built by Lowell Observatory using funds from the National Science Foundation (AST-1005313). A. Thirouin acknowledges Lowell Observatory funding.

REFERENCES

- Alvarez-Candal, A., Ortiz, J. L., Morales, N. et al. 2014, *A&A*, 571, 48
- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R. et al. 2010, *A&A*, 515, 32
- Assafin, M., Vieira Martins, R., Camargo, J. I. B. et al. 2011, Gaia follow-up network for the solar system objects: Gaia FUN-SSO workshop proceedings, 85-88
- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R. et al. 2012, *A&A*, 541, 142
- Audela Software 2016, ONLINE: <http://audela.org/>
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Colas, F. et al. 2011, *Central Bureau Electronic Telegrams*, vol. 2675, 1
- Braga Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L. et al. 2012 *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, vol. 44, 402.01
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L. et al. 2013, *ApJ*, 773, 26
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L. et al. 2014, *Nature*, 508, 72-75
- Buie, M. W. & Keller, J. M. 2016, *AJ*, 151, 73
- Camargo, J. I. B., Vieira-Martins, R., Assafin, M. et al. 2014, *A&A*, 561, 37
- Chandrasekhar, S. 1987, New York: Dover Pubns
- Desmars, J., Camargo, J. I. B., Braga-Ribas, F. et al. 2015, *A&A*, 584, A96
- Elliot, J. L., Person, M. J., Zuluaga, C. A. et al. 2010, *Nature*, 465, 897
- Emery, J., Brown, M., Cruikshank, D. et al. 2010, *Spitzer Proposal*, 70115

- Gladman, B., Marsden, B. G., Vanlaerhoven, C. 2008, *The Solar System Beyond Neptune*, 43-57
- Gomes-Júnior, A. R., Giacchini, B. L., Braga-Ribas, F. et al. 2015, *MNRAS*, 451, 2295
- Grundy, W. M., Benecchi, S. D., Buie, M. W. et al. 2011, *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, 1078
- JPL Small-Body Database Browser 2016, ONLINE: <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>
- Lykawka, P. S. & Mukai, T. 2008, *AJ*, 135, 1161
- Minor Planet Center - List Of Centaurs and Scattered-Disk Objects 2016, ONLINE: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/Centaurs.html>
- Minor Planet Center - List Of Transneptunian Objects 2016, ONLINE: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/TNOs.html>
- Ortiz, J. L., Sicardy, B., Braga-Ribas, F. et al. 2012 *Nature*, 491, 5660
- Ortiz, J. L., Duffard, R., Pinilla-Alonso, N. et al. 2015, *A&A*, 576, 180
- Parker, A., Pinilla-Alonso, N., Santos-Sanz, P. et al. 2015, *ArXiv e-prints*
- Perna, D., Barucci, M. A., Fornasier, S. et al. 2010, *A&A*, 510, 53
- Perna, D., Dotto, E., Barucci, M. A. et al. 2013, *A&A*, 554, 49
- Person, M. J., Elliot, J. L., Bosh, A. S. et al. 2011, *American Astronomical Society Meeting Abstracts #218*, 224.12
- Ruprecht, J. D., Bosh, A. S., Person, M. J. et al. 2015, *Icarus*, 252, 271-276
- Sallum, S., Brothers, T., Elliot, J. L. et al. 2011, *American Astronomical Society Meeting Abstracts #218*, 224.13

- Santos-Sanz, P., Lellouch, E., Fornasier, S., et al. 2012, *A&A*, 541, A92
- Schwamb, M. E., Brown, M. E., Rabinowitz, D. & Marsden, B. G. 2008, *Minor Planet Electronic Circulars*, 38
- Sicardy, B. Colas, F., Maquet, L. et al. 2010, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*, 993
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M. et al. 2011, *Nature*, 478, 493-496
- Stansberry, J., Grundy, W., Brown, M. et al. 2008, in *The Solar System Beyond Neptune*, p.p. 161-179
- Tancredi, G. & Favre, S. 2008, *Icarus*, 195, 851
- Thirouin, A., Noll, K. S., Ortiz, J. L. & Morales, N. 2014, *A&A*, 569, 3
- van Belle, G. T. 1999, *PASP*, 111, 1515
- Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R. et al. 2009, *Icarus* 199, 458-476
- Zacharias, N., Monet, D. G., Levine, S. E. et al. 2004, *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, vol. 36, 1418

Table 1. Circumstances of observation for stations that acquired data.

Site	Longitude (W) Latitude (N) Altitude (m)	Telescope ^a Camera	Exposure Time (s)	Observer Note
Reno	119° 45' 53.0" 39° 23' 28.5" 1470	28 cm Celestron CPC1100 telescope MallinCAM B&W 428	2	Dan Ruby, Brian Crosby, Seth Nuti (RECON)
Jack C. Davis Observatory 'Carson City (B)'	119° 47' 46.8" 39° 11' 08.2" 1548.1	Meade LX-200 30 cm telescope MallinCAM B&W 428	2	Jim Bean, Ethan Lopes (RECON)
Carson City (S)	119° 33' 31.4" 39° 16' 26.5" 1332.6	28 cm Celestron C11 telescope MallinCAM B&W 428	2	Red Sumner (RECON)
Gardnerville	119° 40' 20.3" 38° 53' 23.5" 1534.9	Meade LX-200 30cm telescope MallinCAM B&W 428	2	Jerry Bardecker (RECON)
Yerington	38° 59' 28.3" 1342.7	CPC1100 telescope MallinCAM B&W 428		Joanna Kuzia, Les Kuzia, Matt Christiansen (RECON)
Tonopah	117° 14' 06.7" 38° 05' 22.1" 1838.7	28 cm Celestron CPC1100 telescope MallinCAM B&W 428	2	Terilyn Blackburn, Clair Blackburn (RECON)
Urbana	119° 09' 39.0" 088° 11' 46.4" 40° 05' 12.5" 227	28 cm Celestron 50 cm Newtonian Watec 120N+	2 4	Todd Hunt, Scott Darrington, Aart Olsen
San Pedro Martir	115° 27' 58.0" 31° 02' 42.0" 2790	OAN/SPM Harold L. Johnson 1.5 m telescope FLI ProLine PL3041 (PL0212309)	2	Leonel Gutierrez et al.
San Pedro Martir	115° 28' 00.0" 31° 02' 43.0" 2790	0.84 m telescope SPECTRAL E2V-4240 Mexman	5	Marco Gómez et al.

^aFor more details on the RECON equipment, see Buie & Keller (2016).

Table 2. Circumstances of observation for stations with no data acquired.

Site	Longitude (W) Latitude (N) Altitude (m)	Telescope ^a Camera	Result	Observer Note
Lowell Observatory Anderson Mesa	111° 32' 09.0" 35° 05' 49.0" 2163	1.1 m Hall nasa42	Clouds	Brian Skiff
Cedarville	120° 09' 9.4" 41° 31' 50.0" 1381.4	Standard RECON hardware setup MallinCAM B&W 428	Clouds	Brian Cain, Terry Miller, David Schulz (RECON)
CPSLO Idyllwild/Astrocamp	116° 42' 48.9" 33° 44' 3.4" 1714.2	Meade LX-200 30 cm telescope MallinCAM B&W 428	Clouds and Focus problems	John Keller, Melanie Phillips, Eric Hsieh, Ian Mahaffey, Tedd Zel, Jeff Schloetter, Andrew Yoder, Jiawei Simon Qin Jacob Wagner, Adam Eisenbarth
Lowell Observatory Discovery Channel Telescope	111° 25' 20.0" 34° 44' 40.0" 2360	4.3m Large Monolith Imager	Clouds	Stephen Levine
Fall River/Burney	121° 23' 56." 41° 02' 45." 1012	Standard RECON hardware setup	Clouds	Andrew Mayncsik (RECON)
Fred Lawrence Whipple Observatory	110° 52' 42.0" 31° 40' 52.0" 2606	MEarth	Clouds	J. Irwin, D. Charbonneau
Greenville	120° 57' 04" 40° 08' 23." 1098	Standard RECON hardware setup	Clouds	Bill Gimple, Barclay Anderson (RECON)
Hawthorne	118° 37' 49" 38° 31' 35" 1321	Standard RECON hardware setup	Instrument problems	Kathy Trujillo (RECON)
Portola	120° 34' 03.5" 39° 43' 56.1" 1351	Standard RECON hardware setup	Frost/Clouds	Shelley Callahan, Mark Callahan (RECON)
	120° 58' 10.3"	Standard RECON	Clouds	Charley Arrowsmith, Lynn Coffman,

Table 2—Continued

Site	Longitude (W) Latitude (N) Altitude (m)	Telescope ^a Camera	Result	Observer Note
Quincy Feather River College	39° 56' 52.7" 1046	hardware setup		Levi Kinateder, Colton Kohler, Mystery Brown (RECON)
Susanville	119° 45' 53.0" 39° 23' 28.4" 1470	Meade LX-200 30 cm telescope MallinCAM B&W 428	Clouds	Buck Bateson (RECON)
Tulelake	121° 28' 44." 41° 57' 19." 1232	Standard RECON hardware setup	Clouds	Jason Matkins, Jeannie Smith (RECON)

^aFor more details on the RECON equipment, see Buie & Keller (2016)

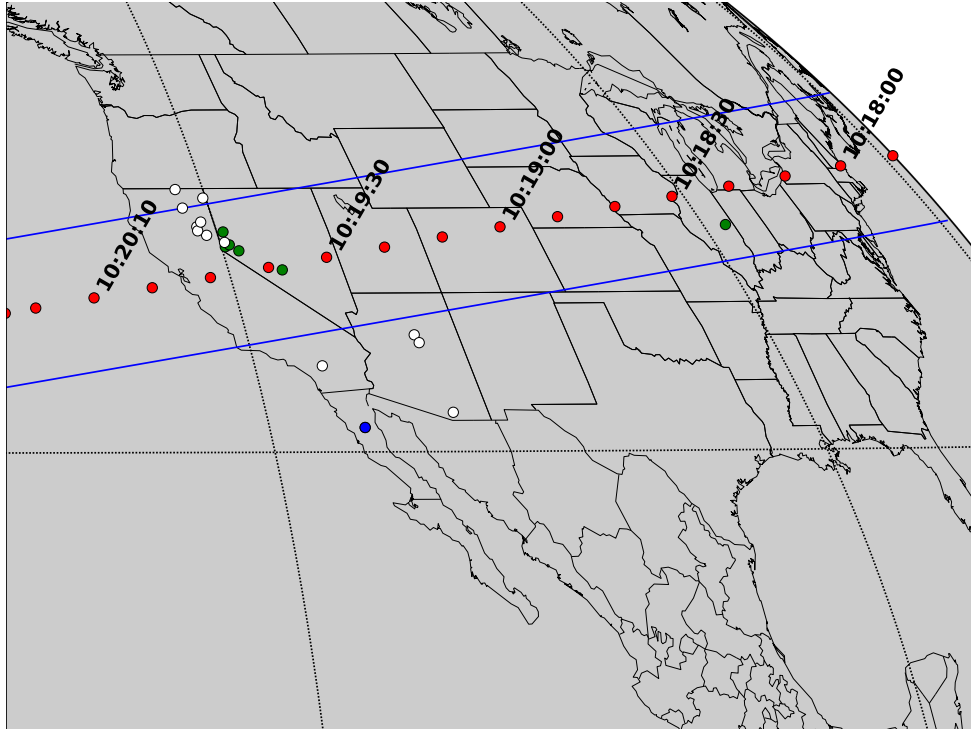


Fig. 1.— Post-occultation reconstruction of the 2007 UK₁₂₆'s shadow path on Earth for the 2014 November 15 event. The shadow moves from right to left; the red dots on the centerline are separated by 10 seconds. The green dots are the sites where the occultation was detected (Table 1). The blue dots are the two telescopes at San Pedro Martir, that had obtained data but did not detect the event, and the white dots are the sites that were clouded out or had technical failures (Table 2).

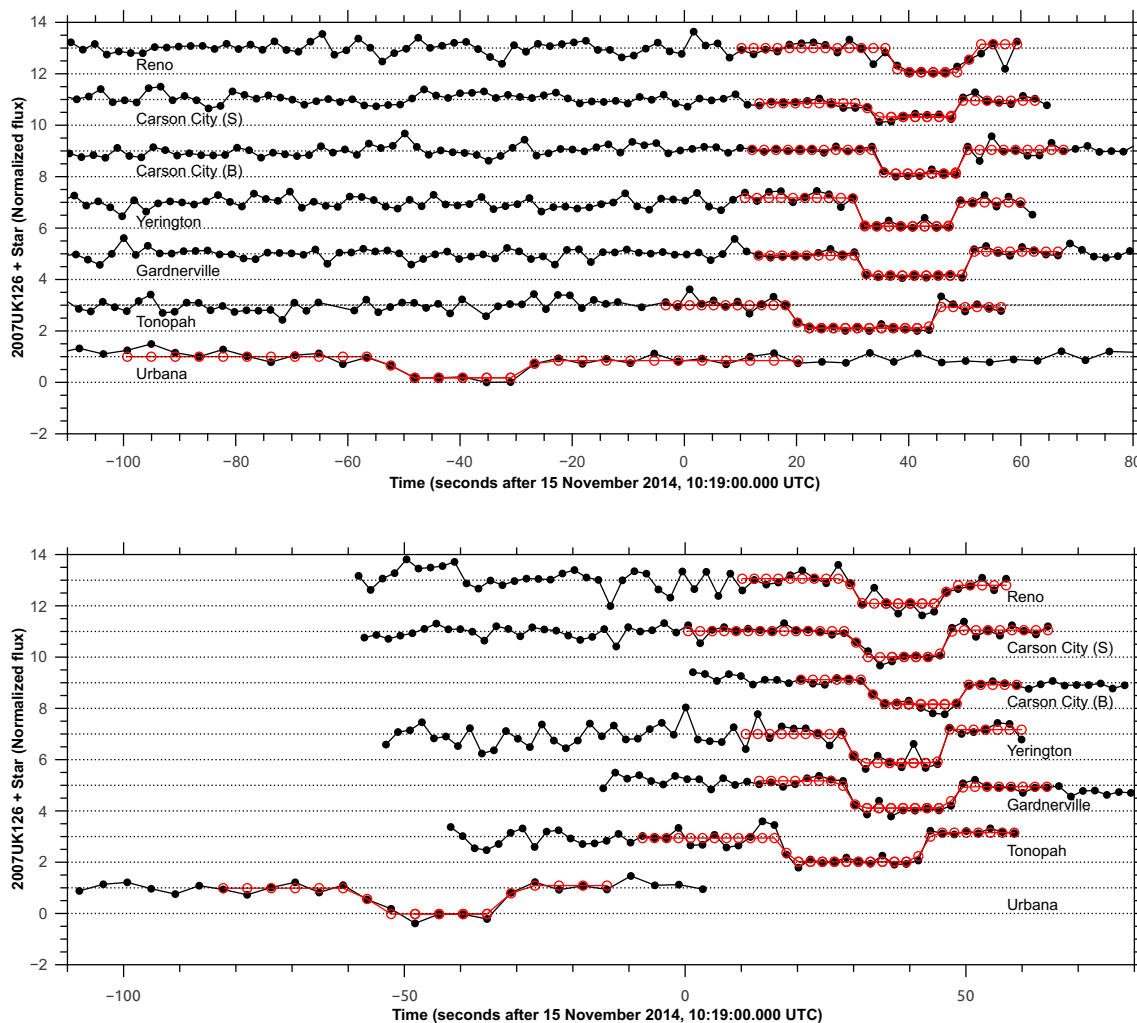


Fig. 2.— Top panel: the seven occultation light curves, obtained from GBR extraction, normalized to the unocculted star+2007 UK₁₂₆ flux and vertically shifted by values for better viewing. The red lines and circles are the square-well model convoluted by the Fresnel diffraction, the star apparent angular diameter, and the finite exposure time. The mid-times of the occultations do not coincide due to the propagation delays of the shadow due to the distinct longitudes of the sites (Fig. 1). Bottom panel: Same from MWB extraction. No secondary occultation is observed, as could be caused by a satellite.

Table 3. Disappearance (ingress) and re-appearance (egress) times.

Site	GBR		MWB	
	Ingress (UT)	Error (s)	Ingress (UT)	Error (s)
	Egress (UT)		Egress (UT)	
Reno	10:19:35.02	+0.80 -5.33	10:19:30.39	+5.43 -0.70
	10:19:46.68	0.47	10:19:46.64	0.65
Carson City (S)	10:19:30.85	0.66	10:19:30.60	0.60
	10:19:46.32	0.41	10:19:46.30	0.42
Carson City (B)	10:19:32.47	0.51	10:19:32.20	0.50
	10:19:47.19	0.35	10:19:47.30	0.41
Yerington	10:19:29.42	0.40	10:19:29.30	0.41
	10:19:45.97	0.35	10:19:46.00	0.35
Gardnerville	10:19:29.40	0.42	10:19:29.71	0.46
	10:19:48.35	0.29	10:19:48.07	0.30
Tonopah	10:19:17.49	0.54	10:19:17.23	0.55
	10:19:42.39	0.26	10:19:42.60	0.30
Urbana	10:18:03.76	0.90	10:18:03.61	0.90
	10:18:27.62	0.90	10:18:27.60	0.90

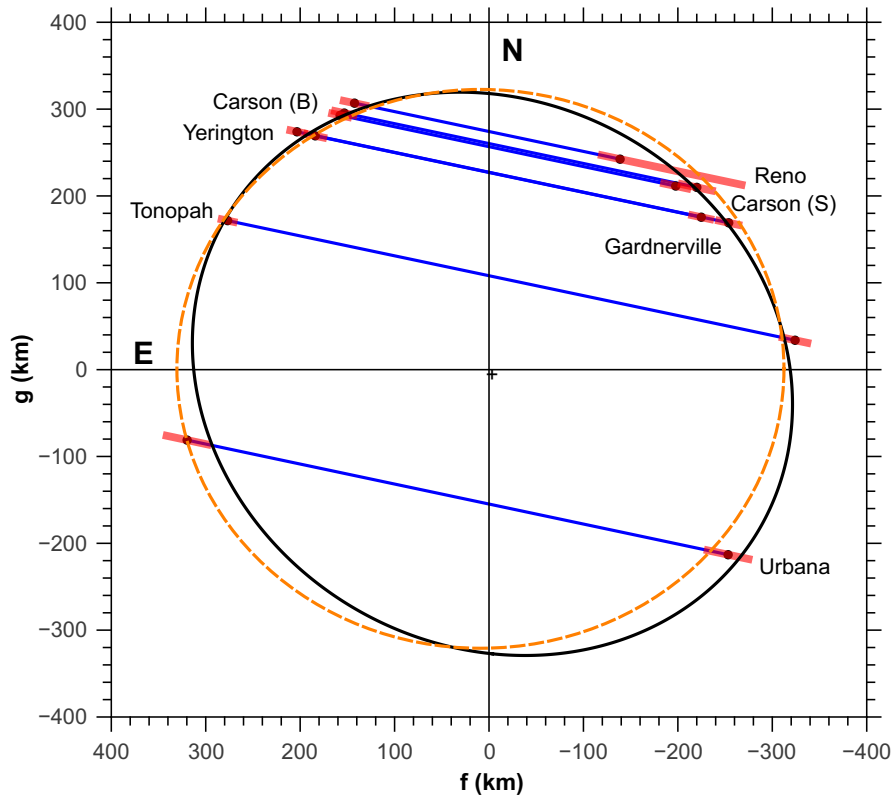


Fig. 3.— Observed positive chords and the nominal GBR solution. The best elliptical fit to the occultation chords are shown in black and the dashed orange line is the circular fit. The red segments are the 1σ error bars on each occultation chord extremity.

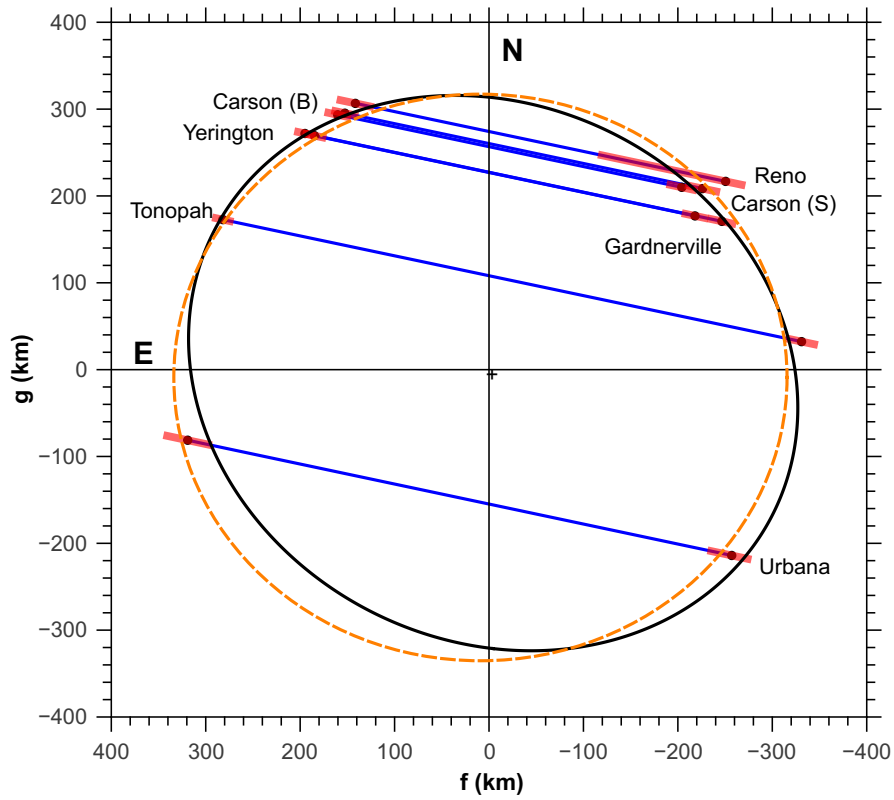


Fig. 4.— Observed positive chords and the nominal MWB solution. The best elliptical fit to the occultation chords are shown in black and the dashed orange line is the circular fit. The red segments are the 1σ error bars on each occultation chord extremity.

Table 4. Physical Parameters of 2007 UK_{126} from the three studied solutions.

Solution	Nominal GBR	Nominal MWB
Semimajor axis (km)	338^{+15}_{-10}	340^{+12}_{-8}
Equivalent Radius (km)	319^{+14}_{-7}	319^{+12}_{-6}
Circular fit Radius (km)	324^{+27}_{-23}	328^{+26}_{-21}
Oblateness	$0,105^{+0,050}_{-0,040}$	$0,118^{+0,055}_{-0,048}$
f_c (km)	-3699 ± 12	-3699 ± 13
g_c (km)	-3457 ± 13	-3456 ± 13
Position angle (deg)	129^{+14}_{-22}	134^{+14}_{-17}
χ_{pdf}^2 (elliptical fit)	0,59	0,56
χ_{pdf}^2 (circular fit)	1,69	1,46
p_R (Thirouin) ^a	$0,189^{+0,009}_{-0,015}$	$0,189^{+0,008}_{-0,013}$
p_V (Perna) ^b	$0,159^{+0,007}_{-0,013}$	$0,159^{+0,006}_{-0,011}$
Density (kg· m ⁻³) ^c	< 1742	< 1620

^a p_V (Thirouin)' means p_V using H from Thirouin et al. (2014)

^b p_V (Perna)' means p_V using H from Perna et al. (2010)

^cUpper limit based on a hydrostatic shape with a rotation period of 11.05h