

Um Estudo Astrométrico e Fotométrico do Sistema Solar Exterior

Altair Ramos Gomes Júnior

Orientador: Marcelo Assafin

Conteúdo

- Introdução
- Astrometria
- Ocultações Estelares
- Centauros e TNOs
- Ceres
- Satélites Irregulares
- Netuno e Tritão
- Conclusão
- Perspectivas

Introdução

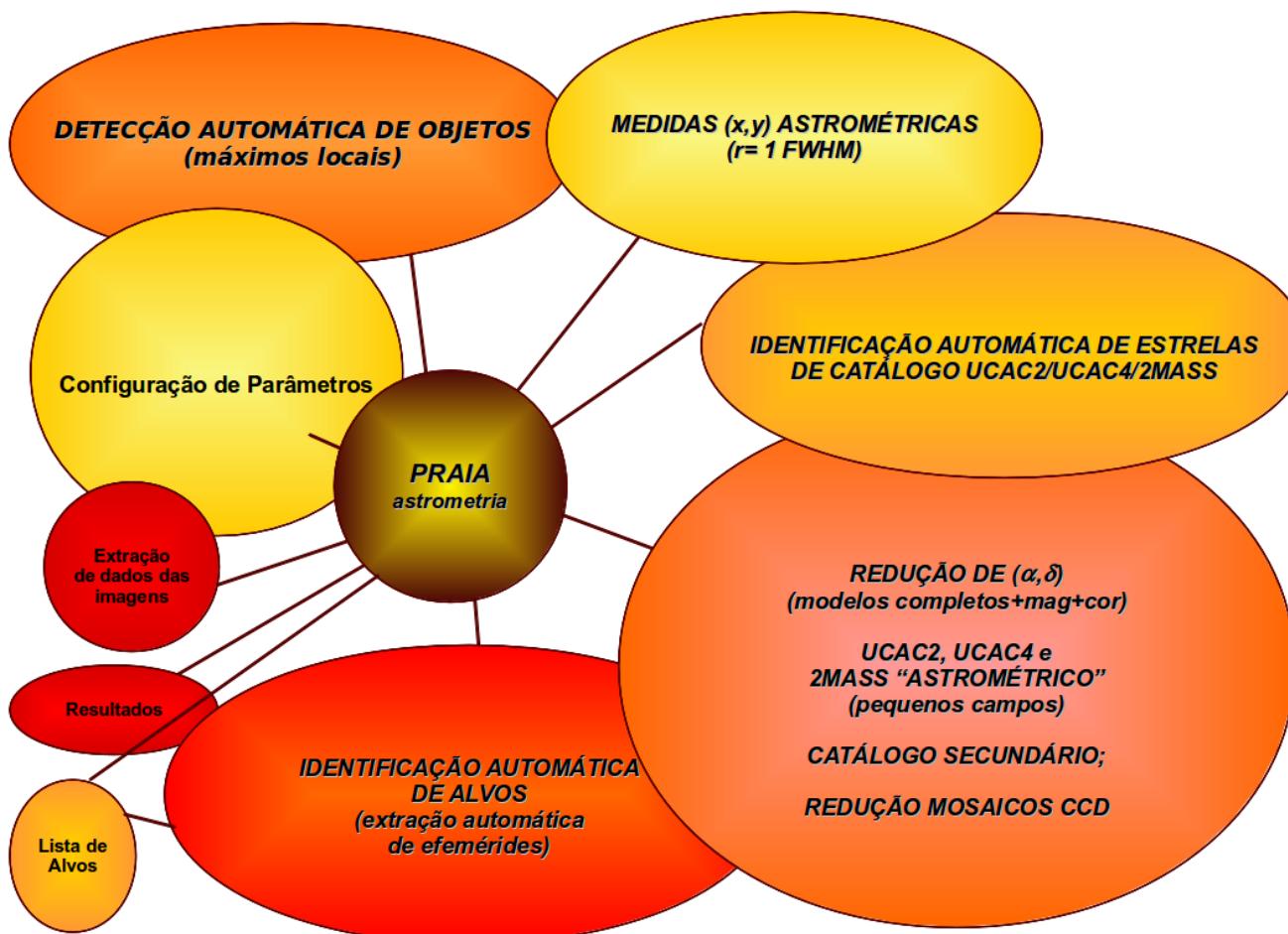
- Objetos do Sistema Solar Externo:
 - Planetas Gigantes Gelados;
 - Planetas-Anões (Plutão, Eris, ..., Ceres*);
 - TNOs;
 - Centauros;
 - Satélites Naturais Irregulares*;
 - Cometas.
- * Objetos peculiares
- Remanescentes do Sistema Solar primordial.

Introdução

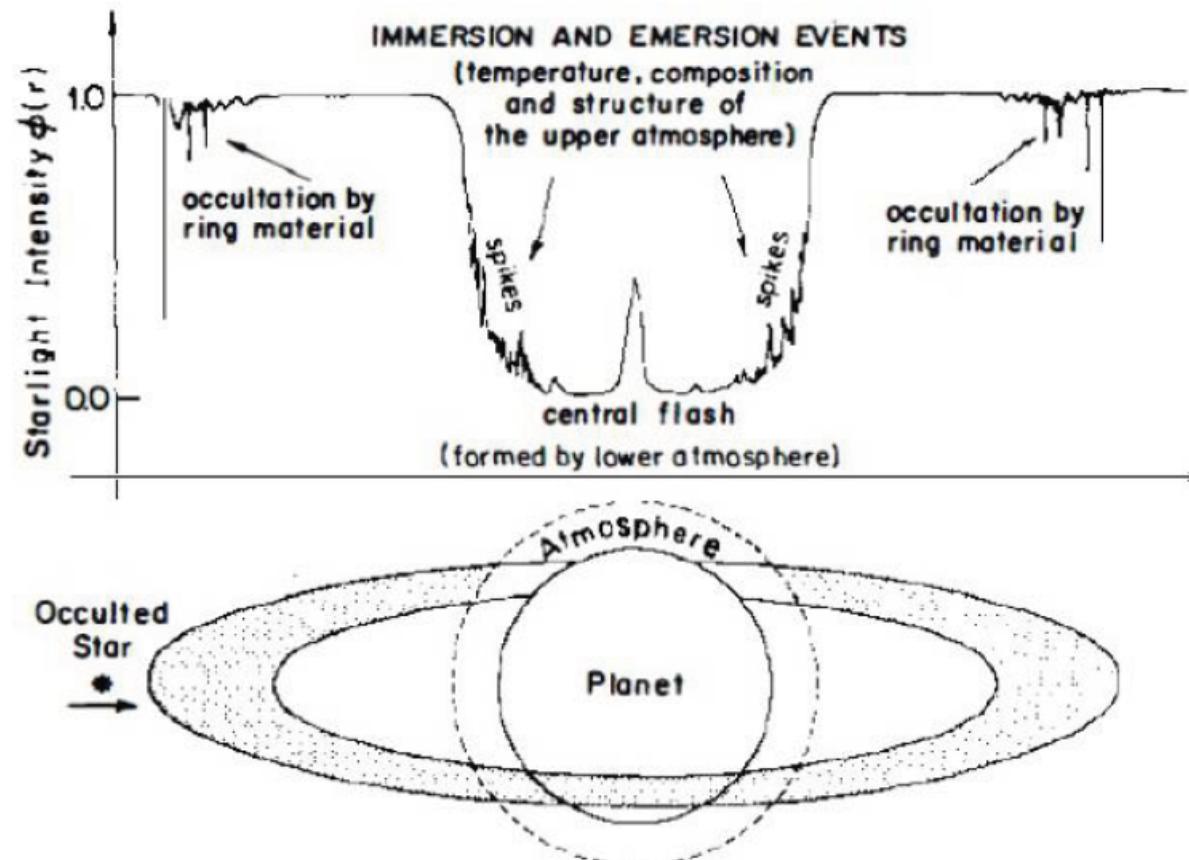
- Acredita-se que tenham sido formados nas partes mais internas do Sistema Solar;
- Poucas sondas enviadas para o Sistema Solar Exterior;
- Utilização de observações de solo:
 - Posições astrométricas para corrigir efemérides;
 - Predição e observação de ocultações estelares.

Técnicas

Astrometria



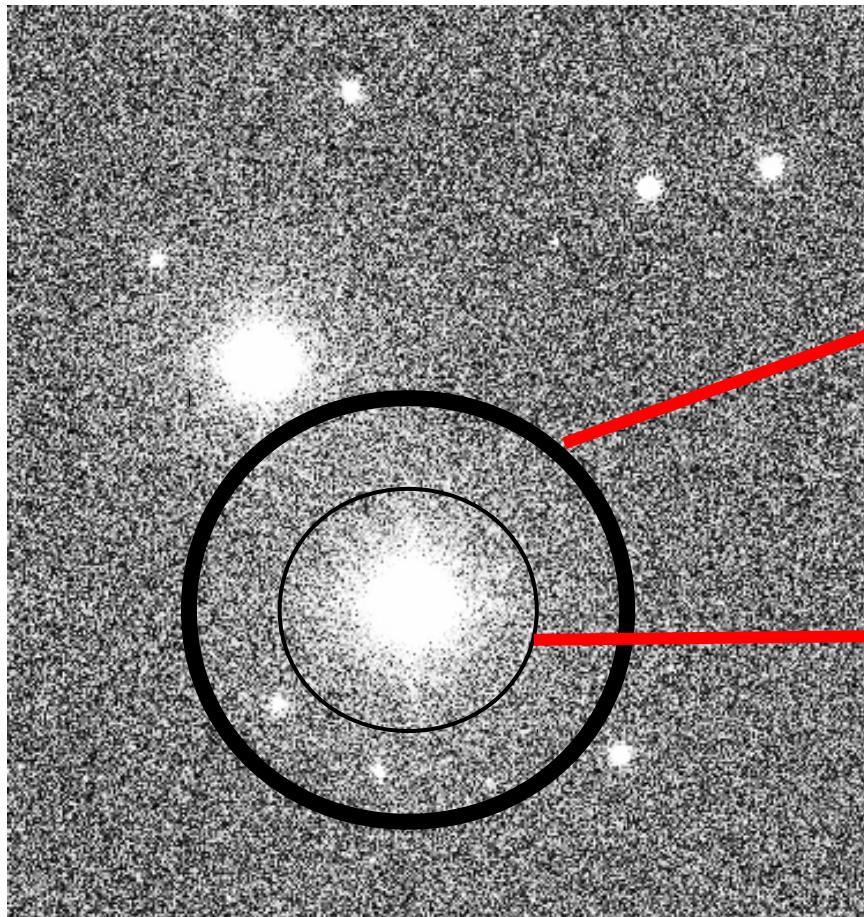
Ocultações Estelares



Elliot et al, 1979

Ocultações Estelares

- Fotometria diferencial de abertura com o PRAIA;

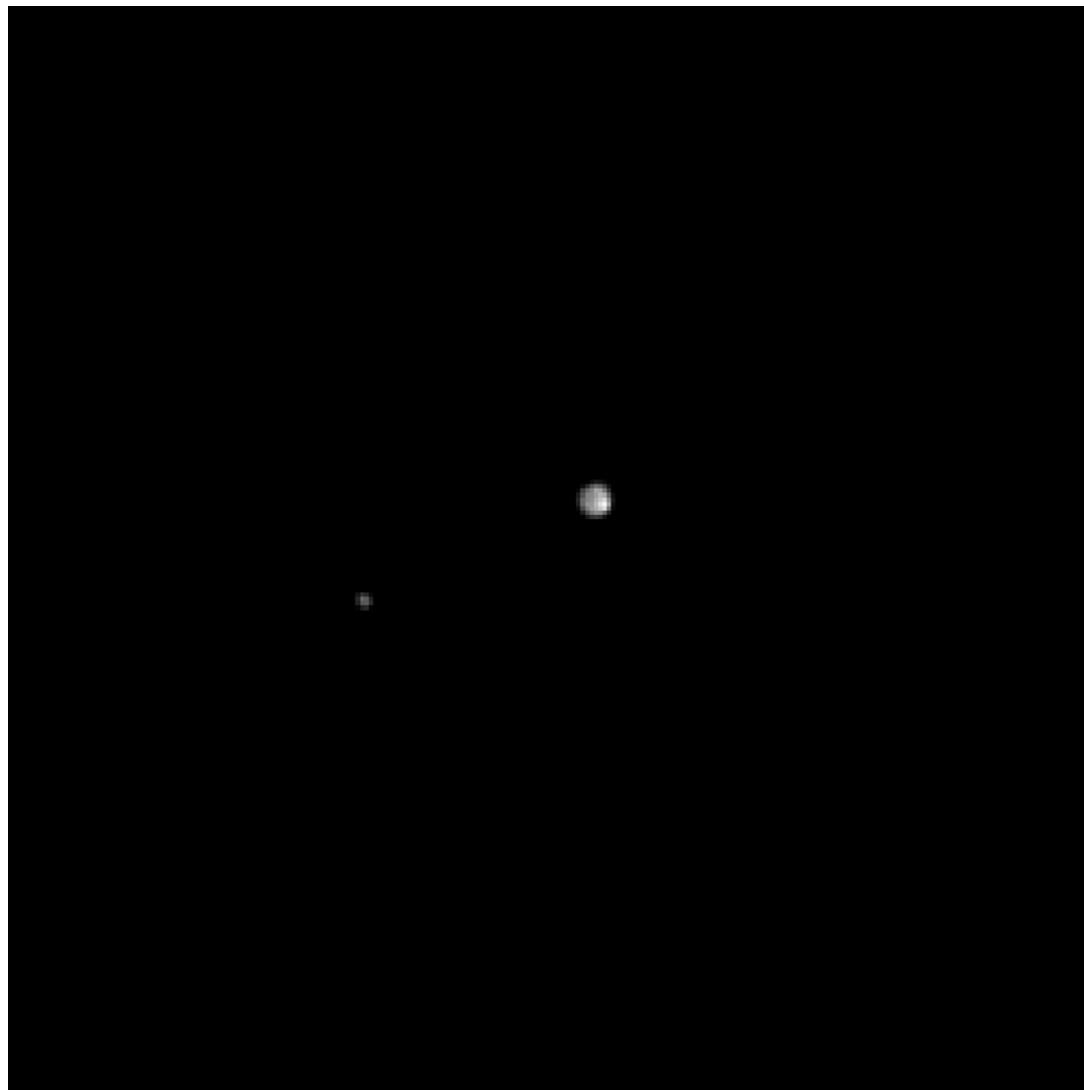


**anel de contagens
de fundo de céu**

**círculo de
contagens**

Estudos

Centauros e TNOs



Plutão-Caronte
Fonte: *New Horizons*

Centauros e TNOs

- Fósseis do Sistema Solar primordial;
- Centauros e TNOs possuem origem em comum;
- Plutão será o primeiro objeto da classe a ser visitado por sonda, a *New Horizons*;
- Observação de ocultações estelares através de observações de solo.

Predição de Ocultações

- Observação dos caminhos de TNOs no ESO utilizando a câmera WFI;
- Integração numéricas das posições dos TNOs para cálculo de órbita;
- Observação da estrela e do TNO para cálculo de offsets;
- Objetos muito distantes.

Predição de occultações

Astronomy & Astrophysics manuscript no. paper
March 10, 2015

©ESO 2015

Orbit determination of Transneptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations

J. Desmars^{1,2}, J.I.B. Camargo^{1,3}, F. Braga-Ribas^{1,3,4}, R. Vieira-Martins^{1,3}, M. Assafin⁵, F. Vachier², F. Colas²,
J. L. Ortiz⁶, R. Duffard⁶, B. Sicardy⁷, A.R. Gomes-Júnior⁵, and G. Benedetti-Rossi¹

Ocultações - resultados

- Campanha de observações internacional liderada por pesquisadores brasileiros, franceses e espanhóis;
- Várias occultações observadas, muitos do sistema Plutão-Caronte;

Resultados - Eris

LETTER

doi:10.1038/nature10550

A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation

B. Sicardy^{1,2,3}, J. L. Ortiz⁴, M. Assafin⁵, E. Jehin⁶, A. Maury⁷, E. Lellouch¹, R. Gil Hutton⁸, F. Braga-Ribas^{1,9}, F. Colas¹⁰, D. Hestroffer¹⁰, J. Lecacheux¹, F. Roques¹, P. Santos-Sanz¹, T. Widemann¹, N. Morales⁴, R. Duffard⁴, A. Thirouin⁴, A. J. Castro-Tirado⁴, M. Jelínek⁴, P. Kubánek⁴, A. Sota⁴, R. Sánchez-Ramírez⁴, A. H. Andrei^{5,9}, J. I. B. Camargo^{5,9}, D. N. da Silva Neto^{9,11}, A. Ramos Gomes Jr⁵, R. Vieira Martins^{5,9,10}, M. Gillon⁶, J. Manfroid⁶, G. P. Tozzi¹², C. Harlingten¹³, S. Saravia⁷, R. Behrend¹⁴, S. Mottola¹⁵, E. García Melendo^{16,17}, V. Peris¹⁸, J. Fabregat¹⁸, J. M. Madiedo¹⁹, L. Cuesta²⁰, M. T. Eibe²⁰, A. Ullán²⁰, F. Organero²¹, S. Pastor²², J. A. de los Reyes²², S. Pedraz²³, A. Castro²⁴, I. de la Cueva²⁵, G. Muler²⁶, I. A. Steele²⁷, M. Cebrián²⁸, P. Montañés-Rodríguez²⁸, A. Oscoz²⁸, D. Weaver²⁹, C. Jacques³⁰, W. J. B. Corradi³¹, F. P. Santos³¹, W. Reis³¹, A. Milone³², M. Emilio³³, L. Gutiérrez³⁴, R. Vázquez³⁴ & H. Hernández-Toledo³⁵

Resultados - Chariklo

LETTER

doi:10.1038/nature13155

A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo

F. Braga-Ribas¹, B. Sicardy², J. L. Ortiz³, C. Snodgrass⁴, F. Roques², R. Vieira-Martins^{1,5,6}, J. I. B. Camargo¹, M. Assafin⁵, R. Duffard³, E. Jehin⁷, J. Pollock⁸, R. Leiva⁹, M. Emilio¹⁰, D. I. Machado^{11,12}, C. Colazo^{13,14}, E. Lellouch², J. Skottfelt^{15,16}, M. Gillon⁷, N. Ligier², L. Maquet², G. Benedetti-Rossi¹, A. Ramos Gomes Jr⁵, P. Kervella², H. Monteiro¹⁷, R. Sfair¹⁸, M. El Moutamid^{2,6}, G. Tancredi^{19,20}, J. Spagnotto²¹, A. Maury²², N. Morales³, R. Gil-Hutton²³, S. Roland¹⁹, A. Ceretta^{20,24}, S.-h. Gu^{25,26}, X.-b. Wang^{25,26}, K. Harpsøe^{15,16}, M. Rabus^{9,27}, J. Manfroid⁷, C. Opitom⁷, L. Vanzi²⁸, L. Mehret¹⁰, L. Lorenzini¹¹, E. M. Schneiter^{14,29,30,31}, R. Melia¹⁴, J. Lecacheux², F. Colas⁶, F. Vachier⁶, T. Widemann², L. Almenares^{19,20}, R. G. Sandness²², F. Char³², V. Perez^{19,20}, P. Lemos²⁰, N. Martinez^{19,20}, U. G. Jørgensen^{15,16}, M. Dominik³³, F. Roig¹, D. E. Reichart³⁴, A. P. LaCluyze³⁴, J. B. Haislip³⁴, K. M. Ivarsen³⁴, J. P. Moore³⁴, N. R. Frank³⁴ & D. G. Lambas^{14,30}

Resultados - Plutão

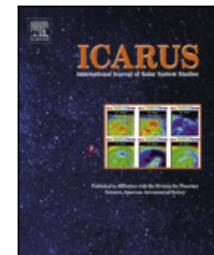
Icarus 246 (2015) 220–225



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Icarus

journal homepage: www.elsevier.com/locate/icarus



Evidence that Pluto's atmosphere does not collapse from occultations
including the 2013 May 04 event



C.B. Olkin ^{a,*}, L.A. Young ^a, D. Borncamp ^{a,1}, A. Pickles ^b, B. Sicardy ^c, M. Assafin ^d, F.B. Bianco ^e, M.W. Buie ^a,
A. Dias de Oliveira ^{c,j}, M. Gillon ^f, R.G. French ^g, **A. Ramos Gomes Jr.** ^d, E. Jehin ^f, N. Morales ^h, C. Opitom ^f,
J.L. Ortiz ^h, A. Maury ⁱ, M. Norbury ^b, F. Braga-Ribas ^j, R. Smith ^k, L.H. Wasserman ^l, E.F. Young ^a,
M. Zacharias ^m, N. Zacharias ^m

Outras ocultações

- Artigo sobre a atmosfera de Plutão (Dias-Oliveira et al., 2015, submetido);
 - Pressão atmosférica na superfície aumentou 6% entre 2012 e 2013.
- Ocultação de Chariklo observada na África: determinação do pólo;
- Ocultação de 2003VS2 de 07 de Novembro de 2014 no OPD.

Ceres

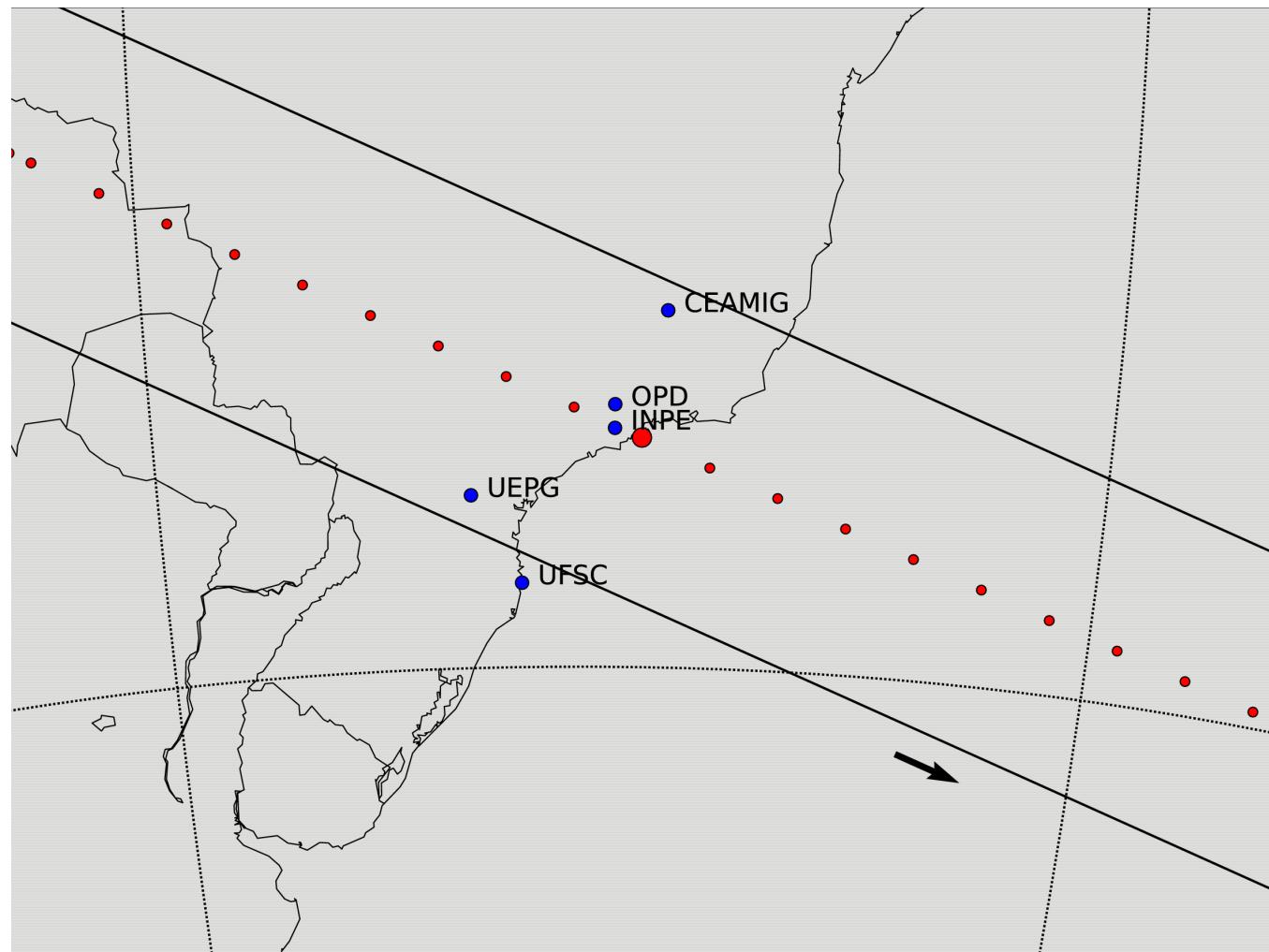


Fonte: *Dawn*

Ceres

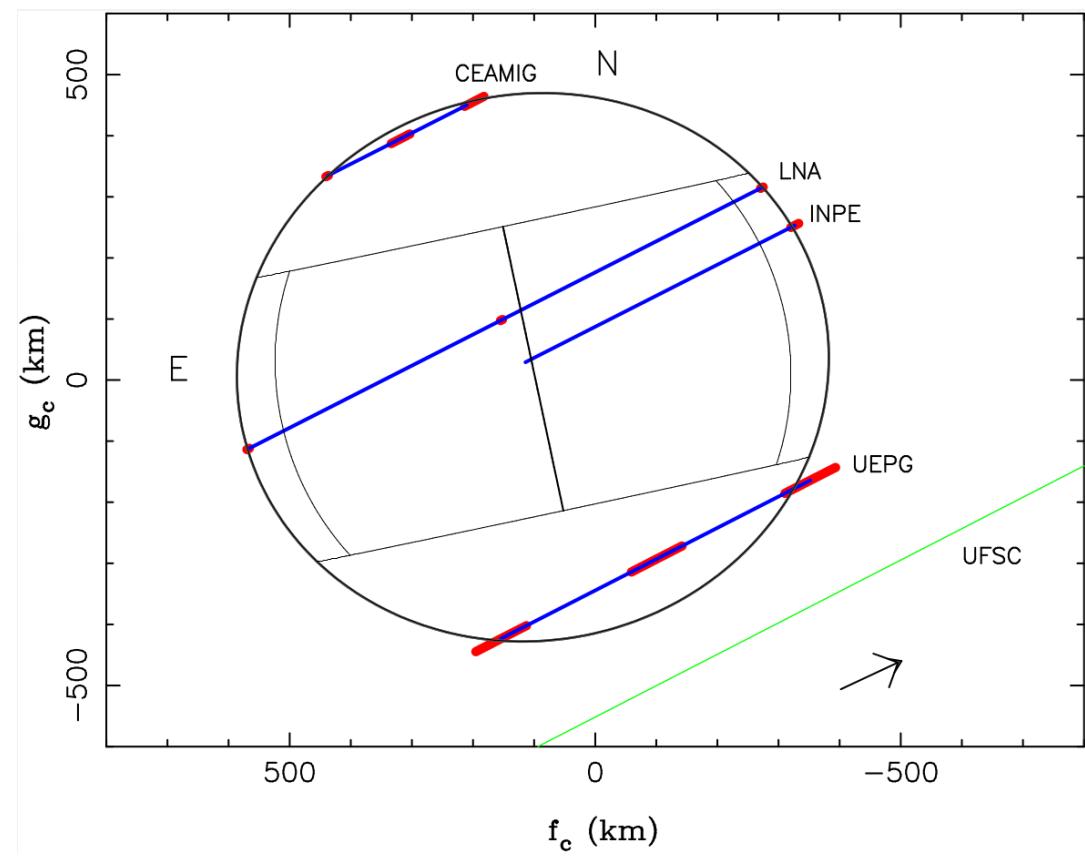
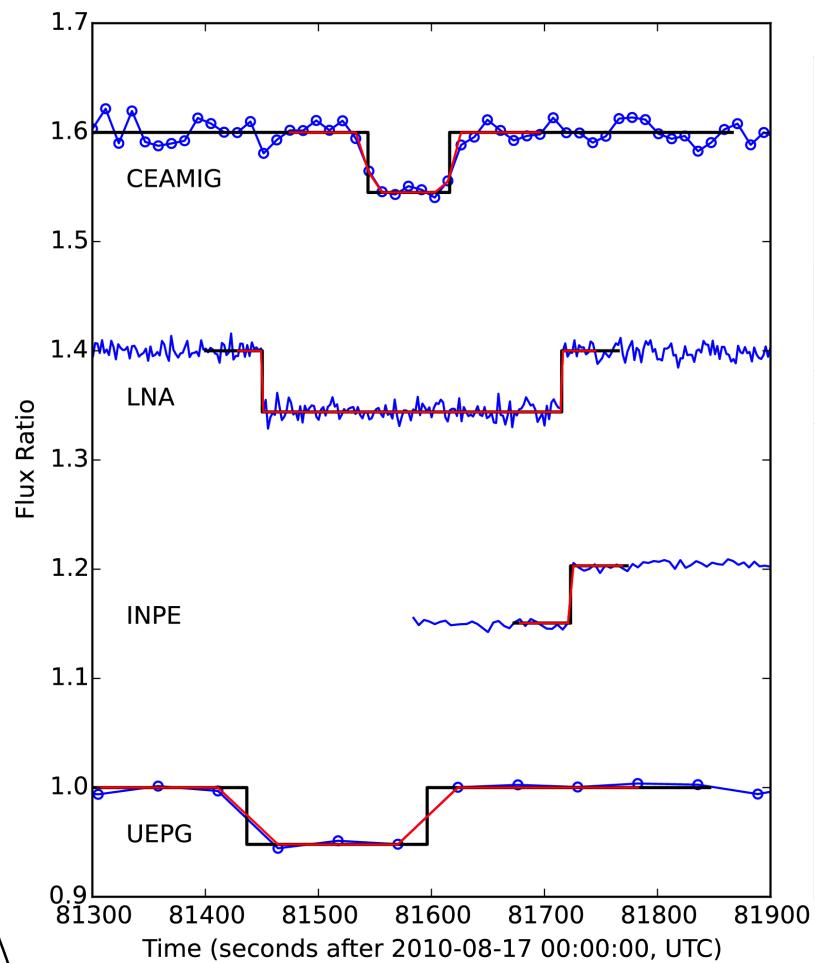
- É um planeta-anão;
- Pode ter origem comum à população dos TNOs (McKinnon, 2012);
- Contém um quinto de toda a massa do Cinturão Principal de Asteroides;
- 5 ocultações por Ceres já foram observadas (1984, 1994, 2 em 2010 e 2013).

Ocultação de 2010

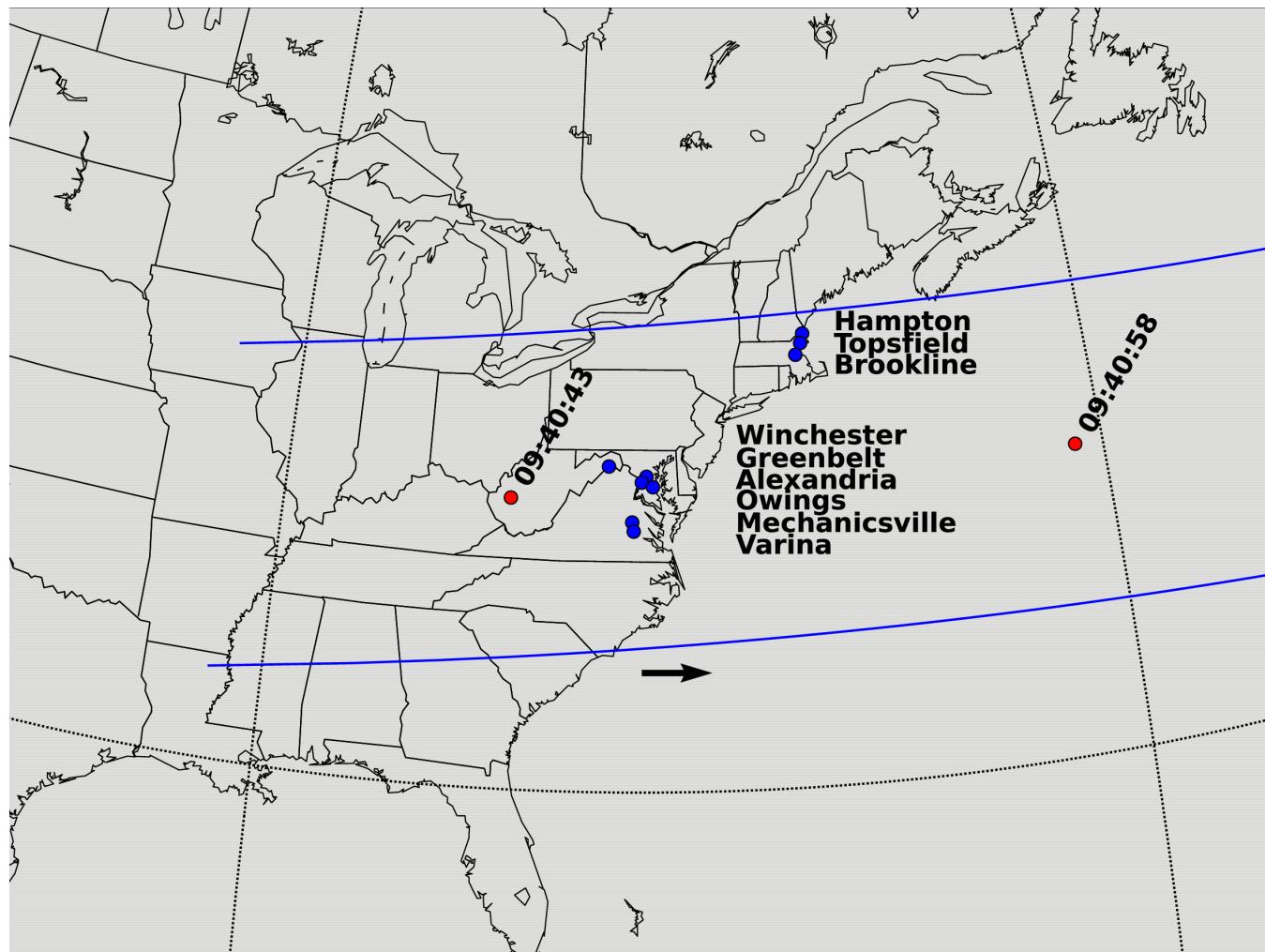


17 - Agosto - 2010

Ocultação de 2010

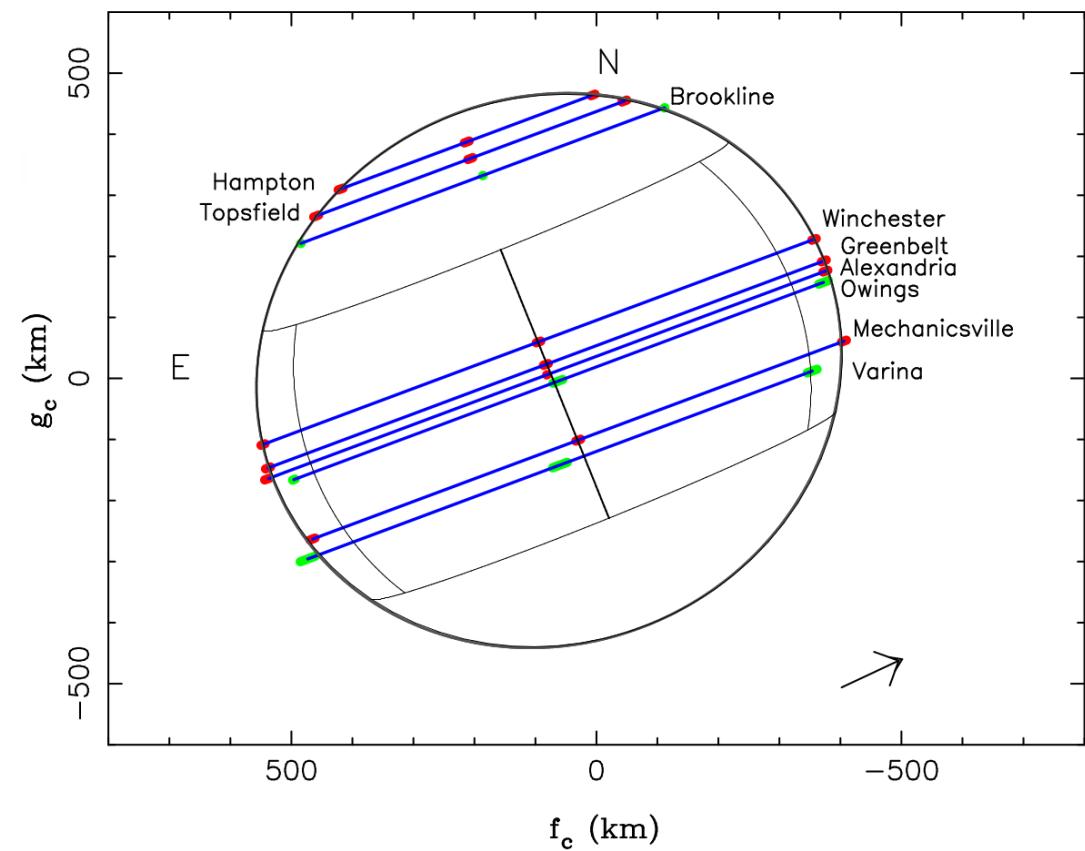
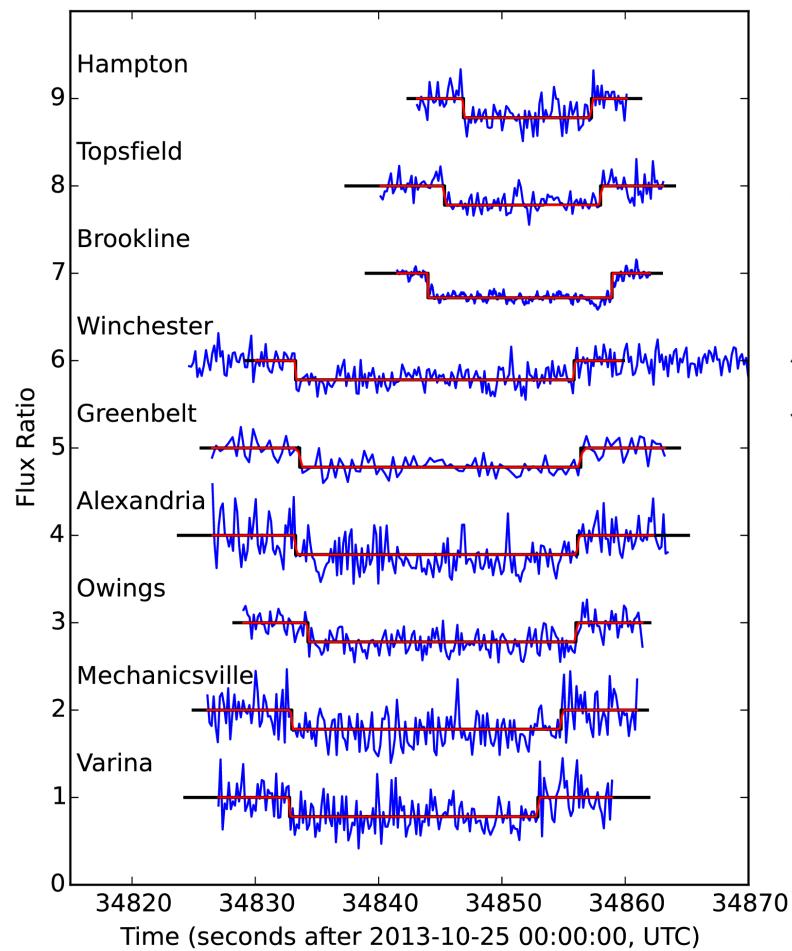


Ocultação de 2013



25 - Outubro - 2013

Ocultação de 2013



Ceres - Resultados

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

Ceres - Resultados

Tabela 5.2: Diâmetro equatorial e achatamento de Ceres

Diâmetro Equatorial (km)	Achatamento	Método	Ref.
972 ± 6	0.08 ± 0.03	Occultação	1
967 ± 10	0.078 ± 0.015	Keck+VTL	2
959 ± 5	0.074 ± 0.007	Keck	3
975 ± 4	0.067 ± 0.005	HST	4
959 ± 5	0.05 ± 0.01	Occultação	5

Referências. 1: Gomes-Júnior et al. (2015b). 2: Drummond et al. (2014). 3: Carry et al. (2008). 4: Thomas et al. (2005). 5: Millis et al. (1987).

- Sonda *Dawn* está orbitando Ceres.

Ceres

Monthly Notices

of the

ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY



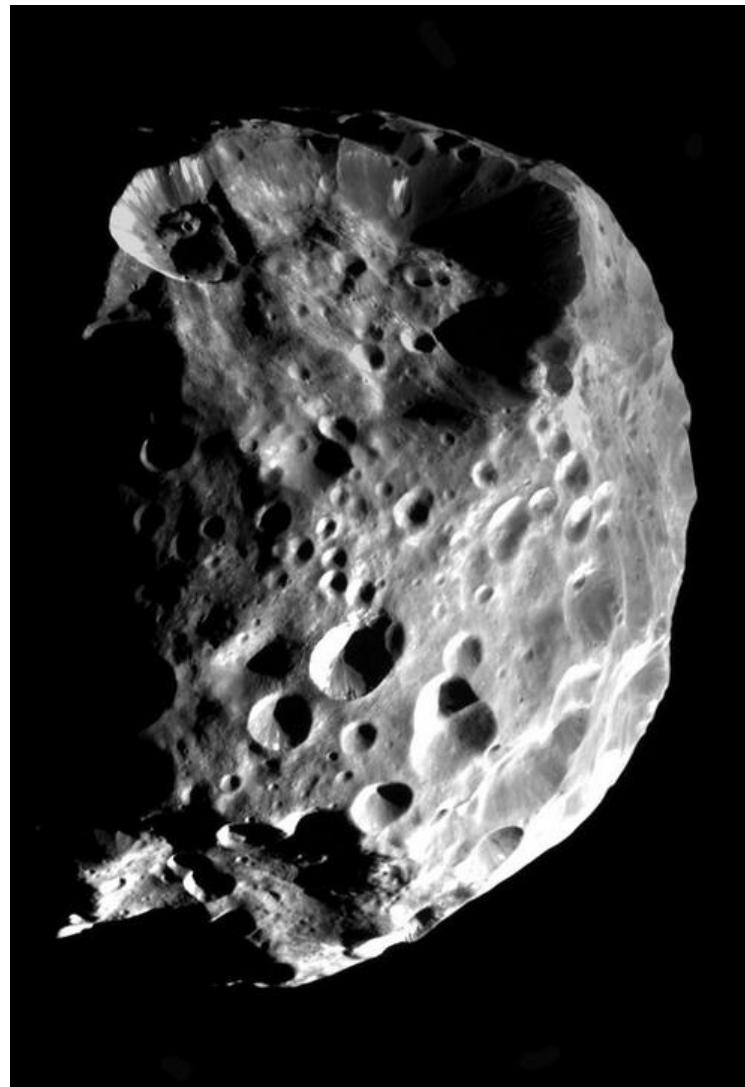
MNRAS **451**, 2295–2302 (2015)

doi:10.1093/mnras/stv1081

Results of two multichord stellar occultations by dwarf planet (1) Ceres

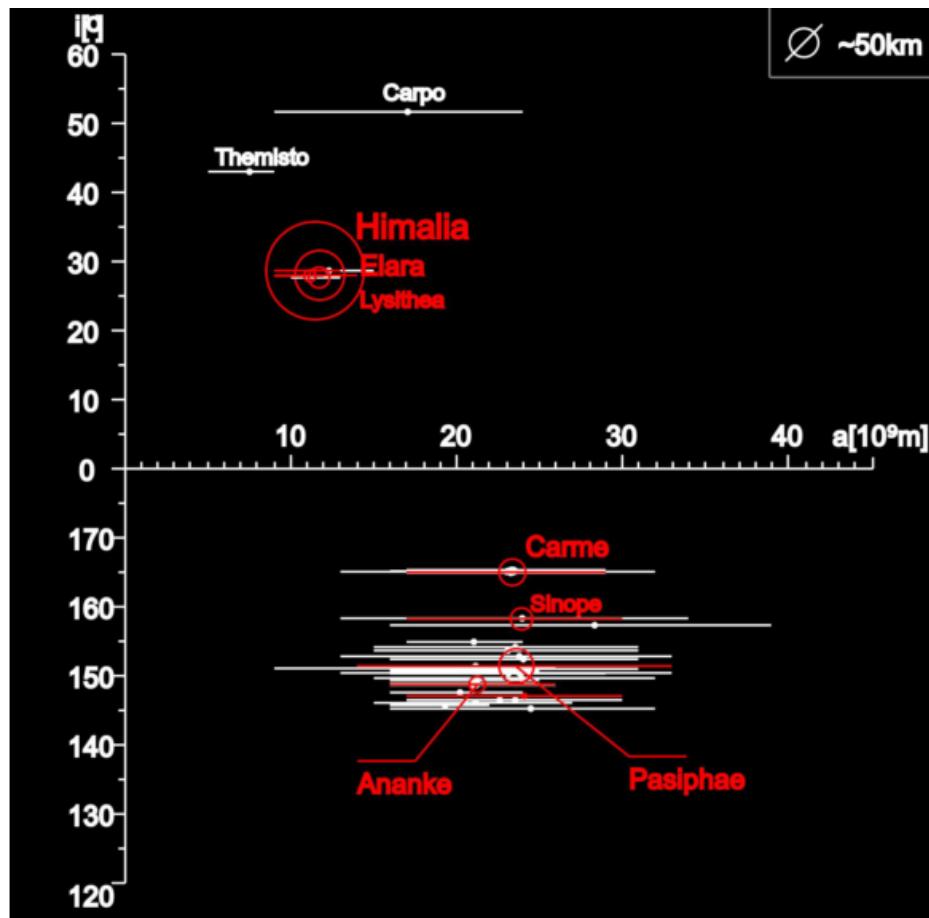
A. R. Gomes-Júnior,¹★ B. L. Giacchini,^{2,3,4}★ F. Braga-Ribas,^{5,6}† M. Assafin,¹†‡
R. Vieira-Martins,^{1,5}†‡ J. I. B. Camargo,⁵† B. Sicardy,⁷ B. Timerson,⁴ T. George,⁴
J. Broughton,⁸ T. Blank,⁴ G. Benedetti-Rossi,⁵ J. Brooks,⁴ R. F. Dantowitz,⁹
D. W. Dunham,⁴ J. B. Dunham,⁴ C. K. Ellington,⁴ M. Emilio,¹⁰ F. R. Herpich,¹¹
C. Jacques,^{3,12} P. D. Maley,^{4,13} L. Mehret,¹⁰ A. J. T. Mello,¹⁴ A. C. Milone,¹⁵
E. Pimentel,^{3,12} W. Schoenell¹¹ and N. S. Weber⁹

Satélites Irregulares

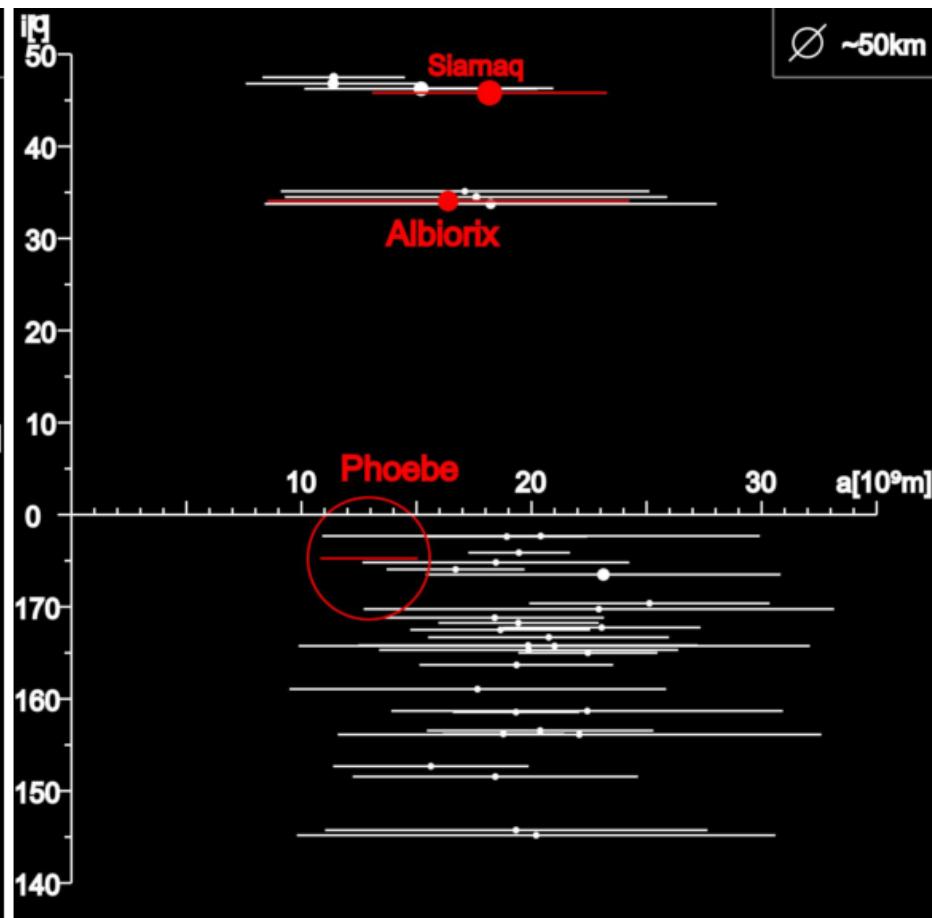


Phoebe
Fonte: *Cassini*

Satélites Irregulares



Satélites de Júpiter



Satélites de Saturno

Satélites Irregulares

- Provavelmente capturados pelos planetas gigantes;
- Possível origem comum aos TNOs (Jewitt et al., 2006);
- Apenas Himalia, Phoebe e Nereida foram observados por sondas;
- Estudos mostram que os satélites irregulares tem cores semelhantes a asteroides tipo C, P e D ou a Centauros e TNOs.

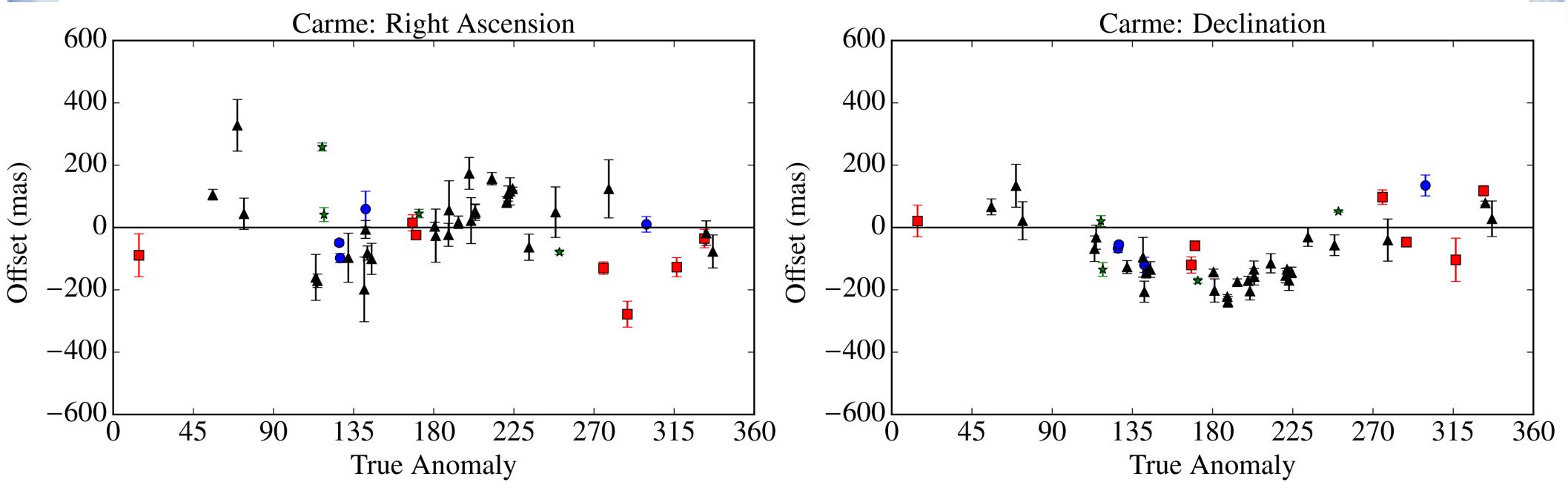
Astrometria

- Observações feitas no OPD, ESO e OHP entre 1992 e 2014;
- 3 sítios, 5 telescópios, mais de 10 câmeras e mais de 10 filtros;
- Mais de 8000 posições identificadas onde 6523 selecionadas como boas posições.

Astrometria

Satélite	Diâm. (km) ³	Mag V	OPD	OHP	ESO	Total	Jacobson
Himalia	170	14	854	357	23	1234	1757
Elara	86	16	403	187	46	636	1115
Lysithea	36	18	60	84	90	234	431
Leda	20	19	6	48	44	98	178
Pasiphae	60	17	295	248	66	609	1629
Callirhoe	9	21	9	-	16	25	95
Megaclite	5	22	-	-	10	10	50
Ananke	28	18	52	141	57	250	600
Praxidike	7	21	-	-	2	2	59
Carme	46	18	90	204	37	331	973
Sinope	38	18	41	169	11	221	854
Themisto	8	21	-	-	16	16	55
Phoebe	213	16	1239	516	32	1787	3479
Siarnaq	40	20	-	20	56	76	239
Paaliaq	22	21	-	-	11	11	82
Albiorix	32	20	-	-	46	46	137
Sycorax	150	21	-	-	35	35	237
Nereid	340	19	803	-	99	902	716

Satélites Irregulares



Satélites Irregulares

Astronomy & Astrophysics manuscript no. Irregulares
June 1, 2015

©ESO 2015

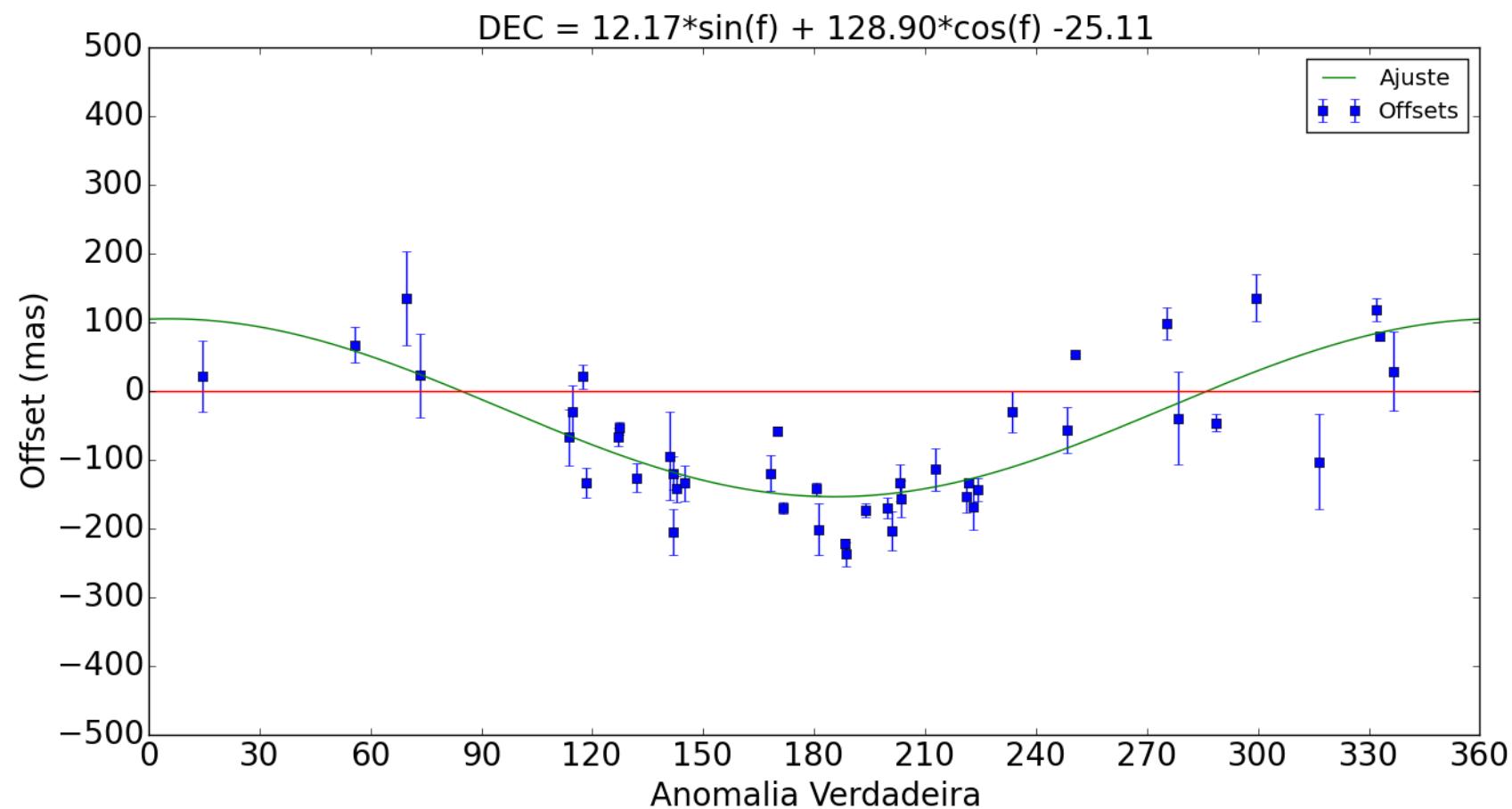
Astrometric positions for 18 irregular satellites of giant planets from 23 years of observations^{*,★★,★★★,★★★★}

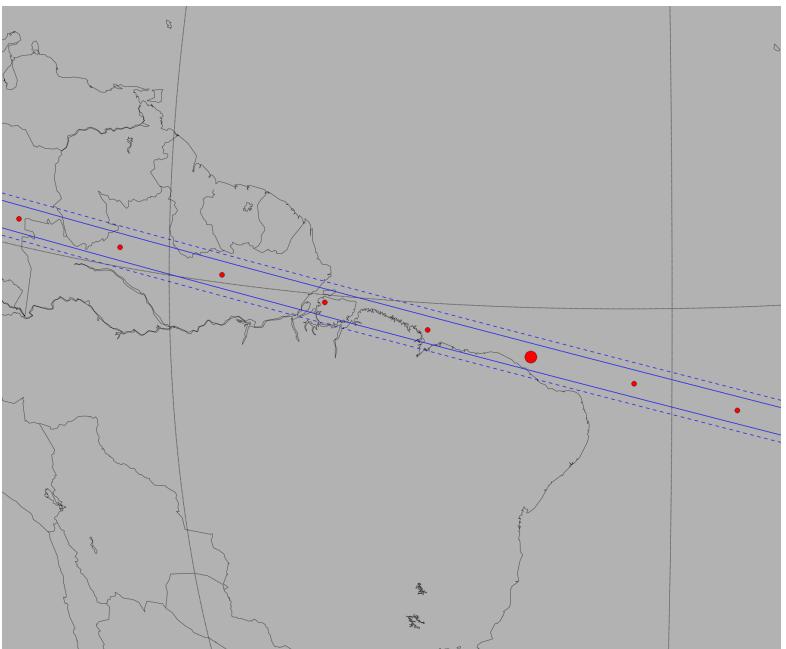
A. R. Gomes-Júnior¹, M. Assafin^{1,†}, R. Vieira-Martins^{1,2,3,‡}, J.-E. Arlot⁴, J. I. B. Camargo^{2,3}, F. Braga-Ribas^{2,5}, D. N. da Silva Neto⁶, A. H. Andrei^{1,2,§}, A. Dias-Oliveira², B. E. Morgado¹, G. Benedetti-Rossi², Y. Duchemin^{4,7}, J. Desmars⁴, V. Lainey⁴, W. Thuillot⁴

Ocultações

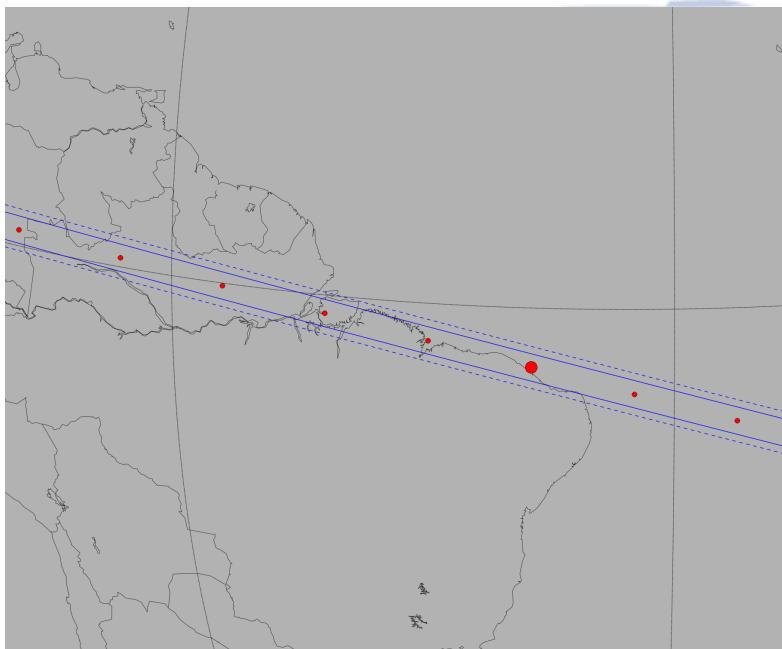
- Predição de ocultações para 7 satélites de Júpiter (Himalia, Elara, Pasiphae, Sinope, Lysithea, Carme, Ananke), Phoebe e Nereida;
- Estrelas do catálogo UCAC4 e efemérides do JPL;
- 588 eventos identificados entre Janeiro de 2015 e Dezembro de 2017.

Teste - ajuste

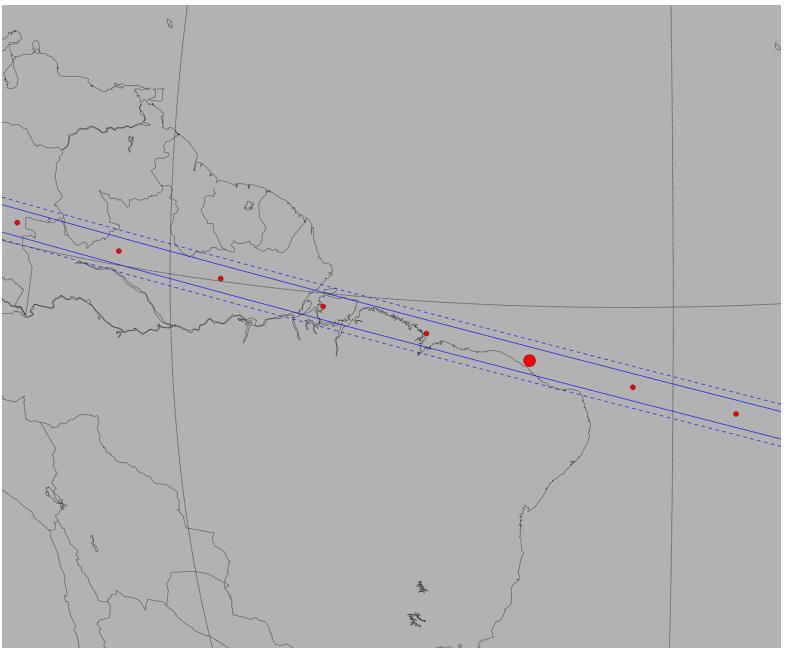




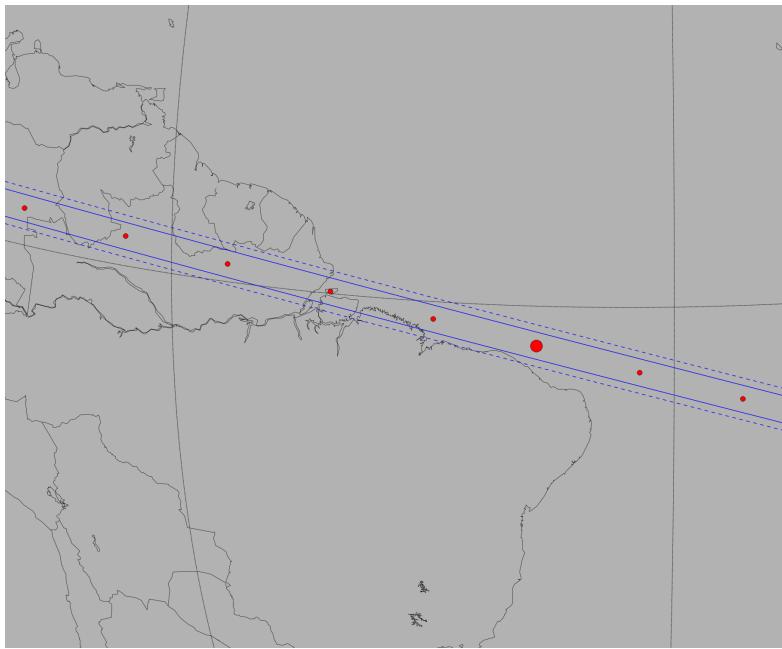
Predição nominal



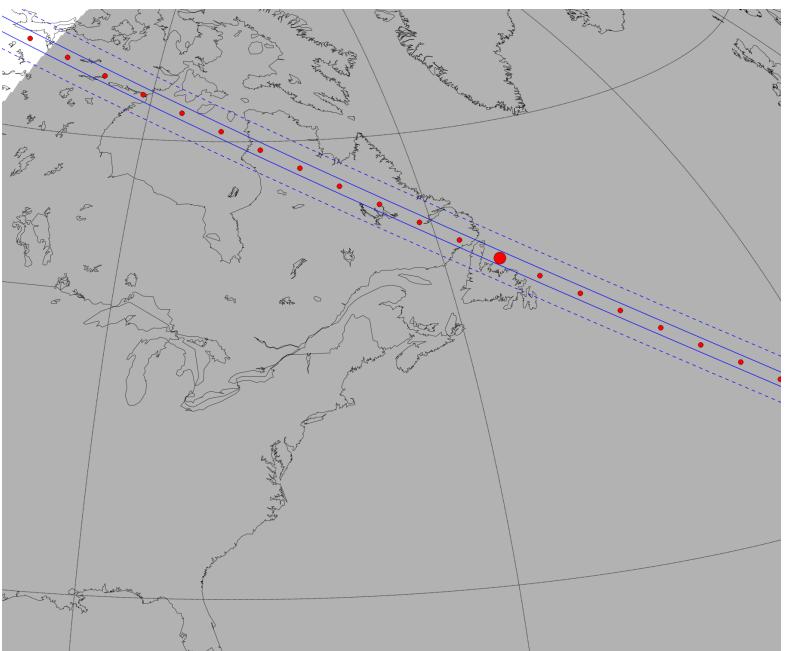
Ajuste dos offsets



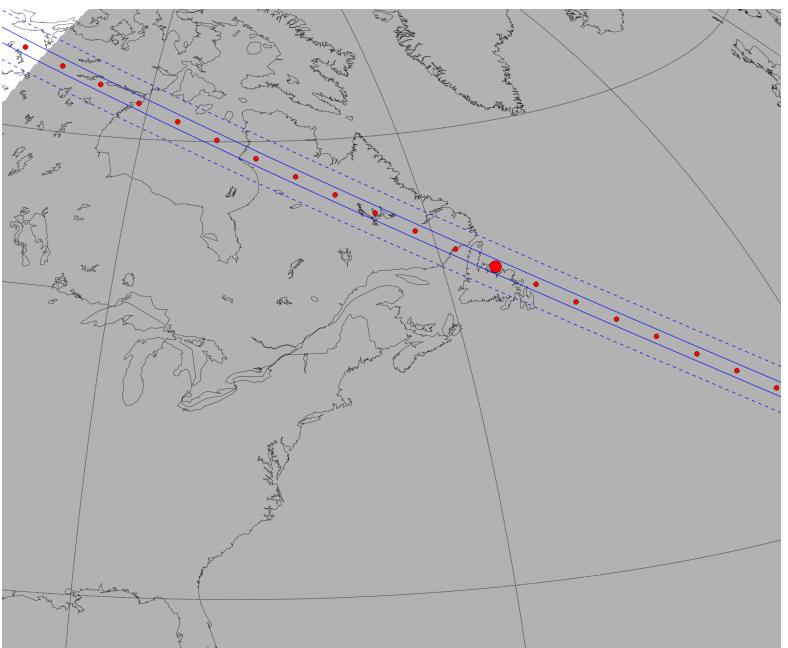
Obs. 22 de Fevereiro de 2015



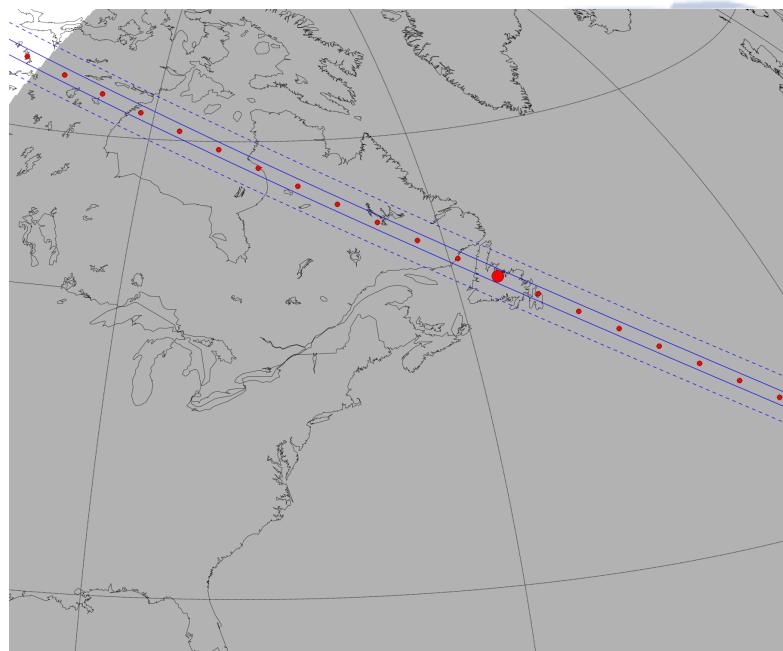
Obs. 03 de Março de 2015



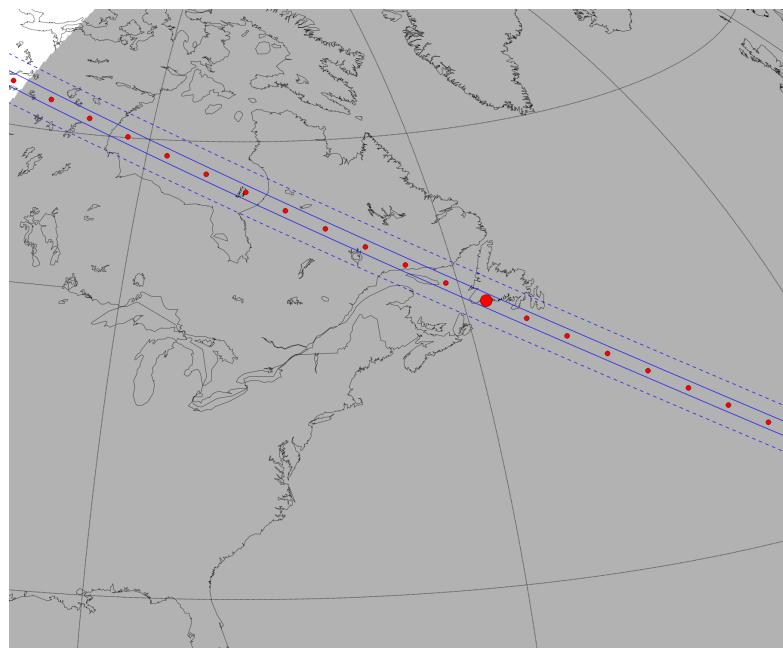
Predição nominal



Obs. 25 de Março de 2015



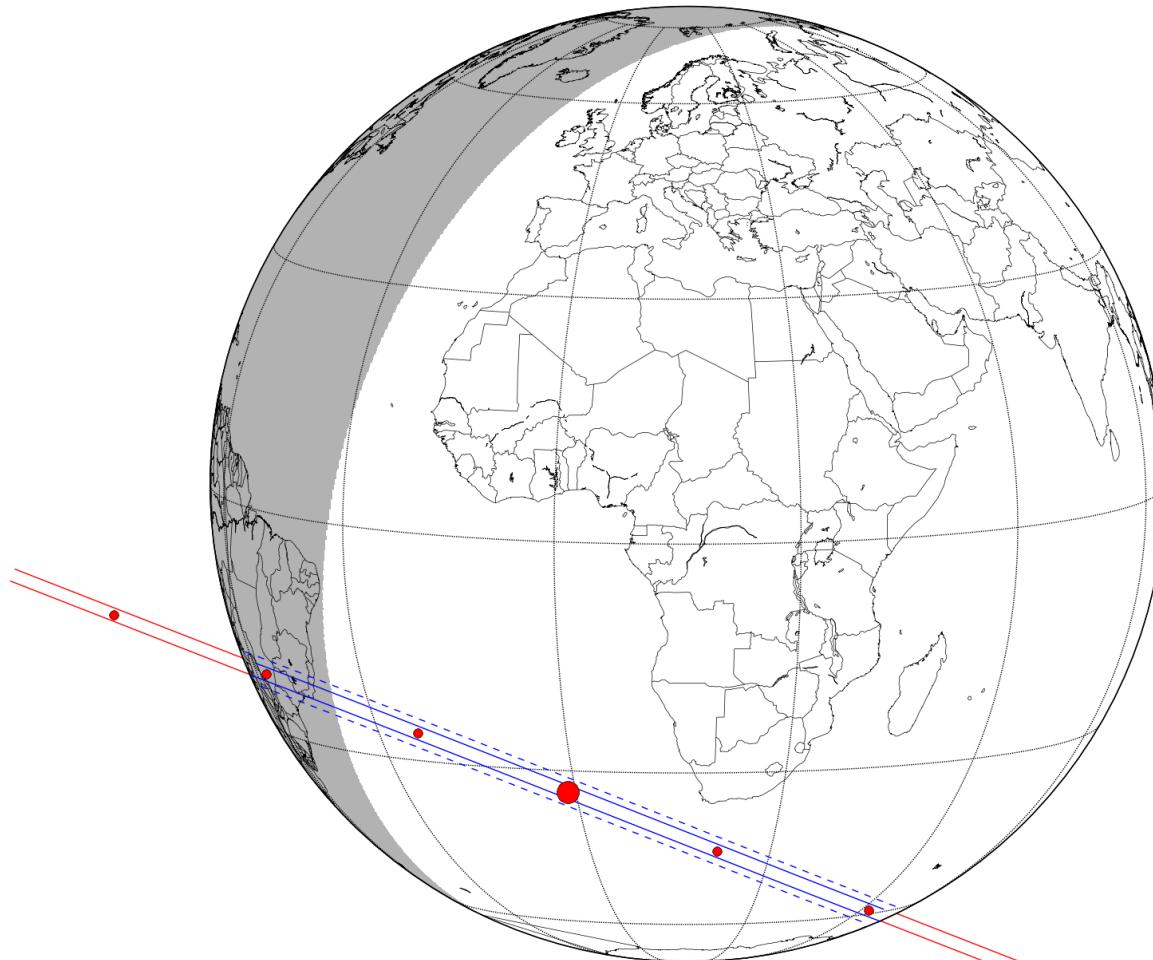
Ajuste dos offsets



Obs. 02 de Abril de 2015

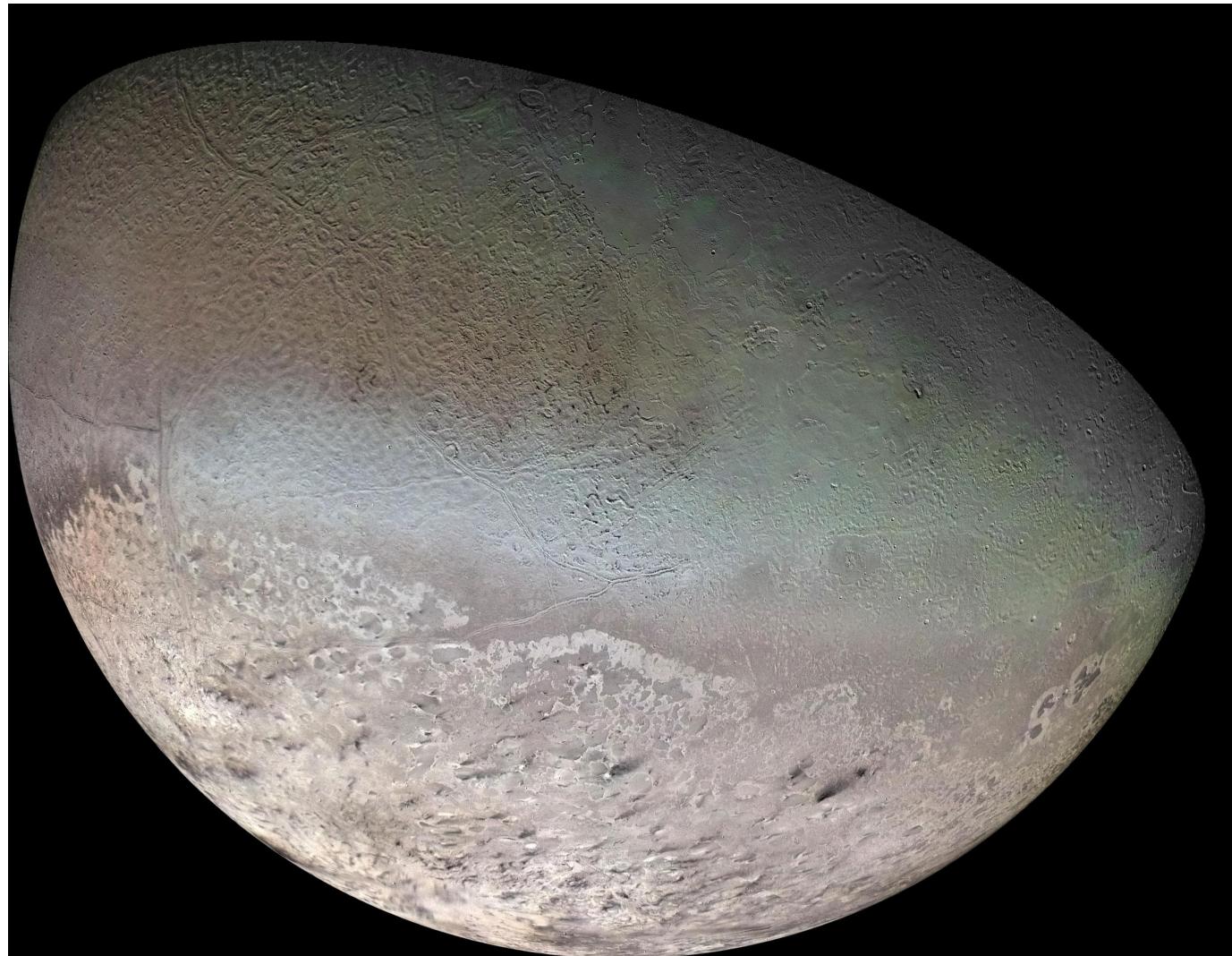
Ocultação de Himalia

Object Himalia Diam 170 km Tmax 4.7s dots <> ra_off_obj_de +0.0 ra_of_star_de +0.0



year-m-d h:m:s UT ra dec J2000 candidate C/A P/A vel Delta R* K* long
2015-10-23 07:54:47.000 11 05 26.6037 +07 14 32.030 0.993 201.33 36.11 6.12 15.5 0.6 16

Tritão



Fonte:
Voyager 2

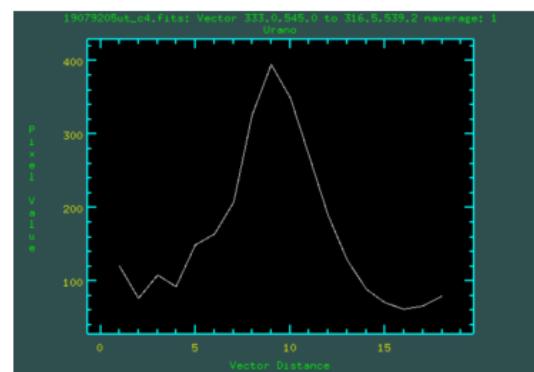
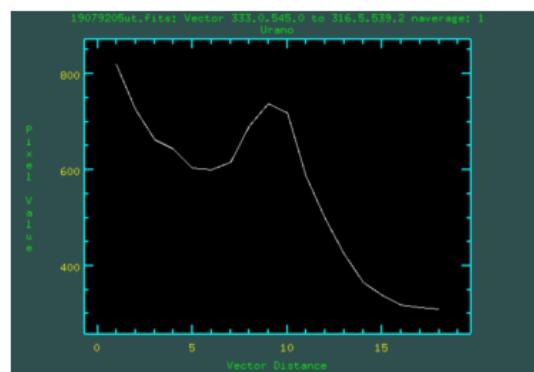
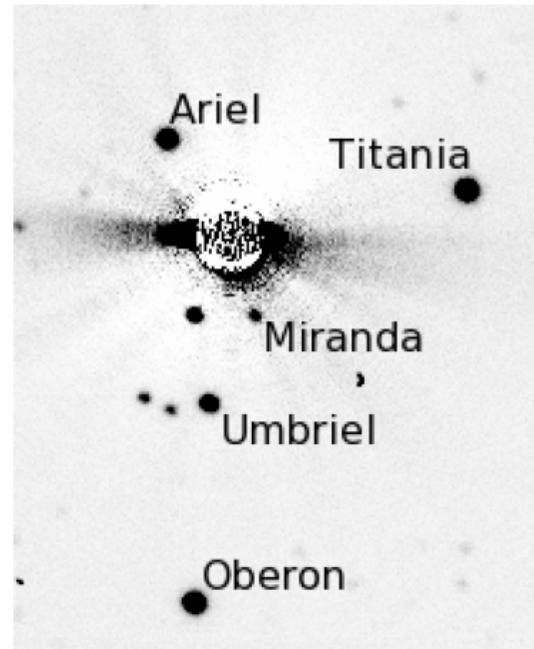
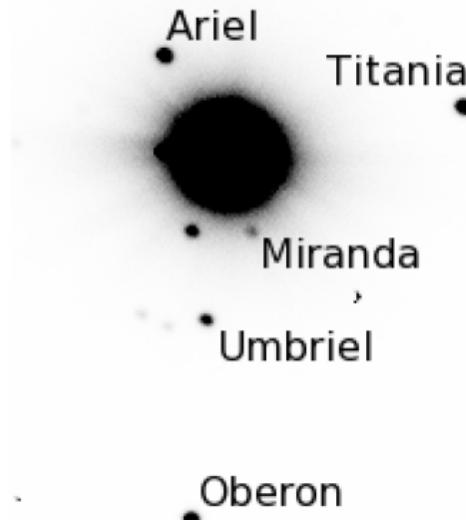
Tritão

- Órbita retrógrada, circular e altamente inclinada;
- Provavelmente capturado através da dissociação de um sistema binário;
- Parâmetros físicos similares aos de Plutão (Raio: 1353-1190km, Densidade: 2.061-2.030 g.cm⁻³);
- Um dos poucos objetos a possuir atmosfera;
- Possui grande variação sazonal.

Astrometria

- Astrometria de mais de 7000 observações de Netuno-Tritão obtidas no OPD;
- PSF numérica para obter o centroide de Netuno;
- Posições de telemetria de sondas espaciais dentro do projeto ESPaCE;
- Estudo de efeitos dissipativos de energia por efeitos de maré.

Coronografia Digital



Camargo et al., 2015, submetido

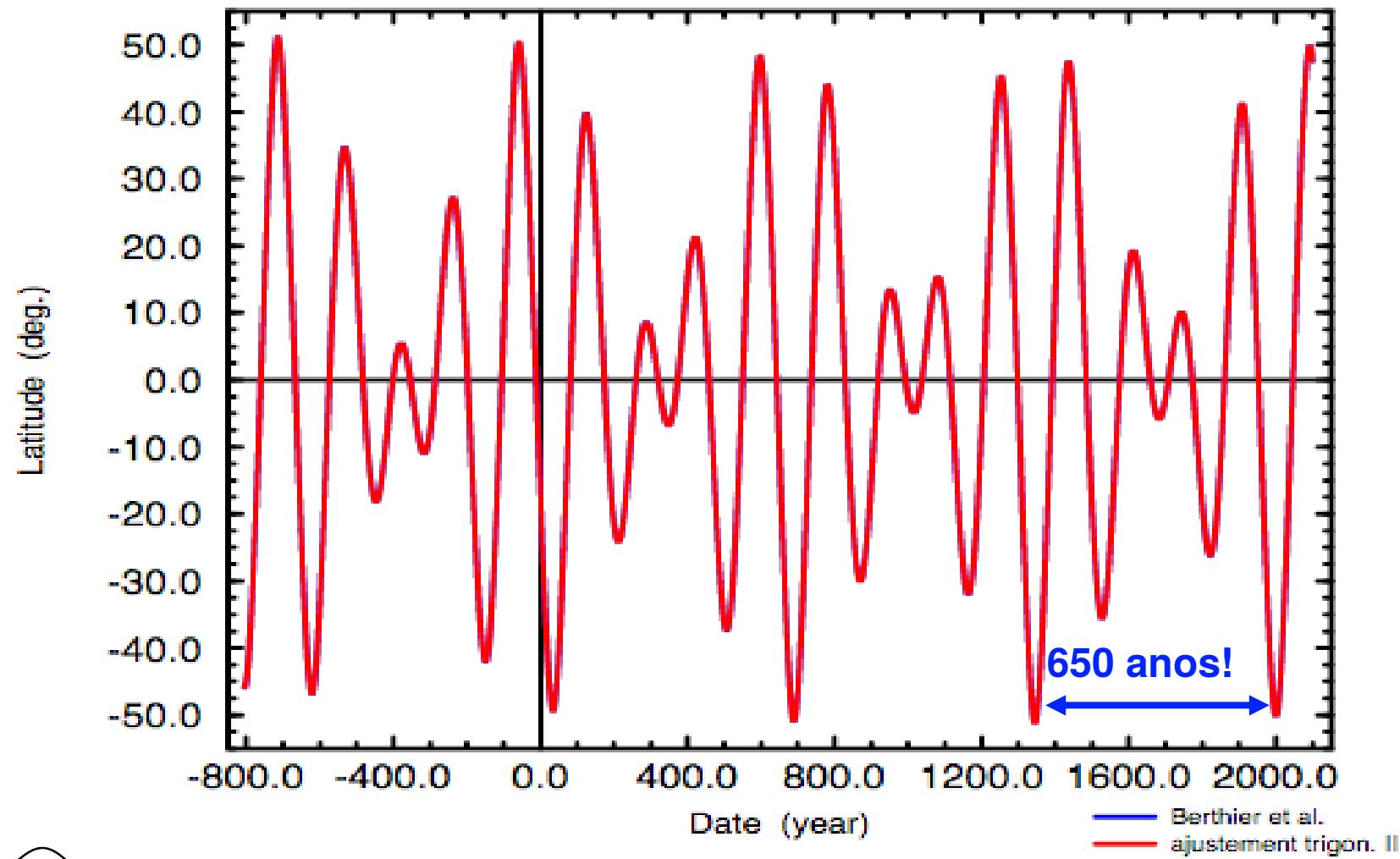
PSF numérica

- Tamanho angular de Netuno ~2 arcsec;

$$\begin{aligned} F_{\text{cf}}(x, y) = & \\ &= A \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \left\{ \int_{-R}^0 e^{-\frac{((x-x_0)\cos\varphi+(y-y_0)\sin\varphi-\mu)^2}{2\sigma^2}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{-(x-x_0)\sin\varphi+(y-y_0)\cos\varphi+\sqrt{R^2-\frac{R^2}{r^2}\mu^2}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{-(x-x_0)\sin\varphi+(y-y_0)\cos\varphi-\sqrt{R^2-\frac{R^2}{r^2}\mu^2}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] d\mu \right. \\ &\quad + \int_0^{+R} e^{-\frac{((x-x_0)\cos\varphi+(y-y_0)\sin\varphi-\mu)^2}{2\sigma^2}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{-(x-x_0)\sin\varphi+(y-y_0)\cos\varphi+\sqrt{R^2-\mu^2}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right. \\ &\quad \left. \left. - \operatorname{erf} \left(\frac{-(x-x_0)\sin\varphi+(y-y_0)\cos\varphi-\sqrt{R^2-\mu^2}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] d\mu \right\} \end{aligned}$$

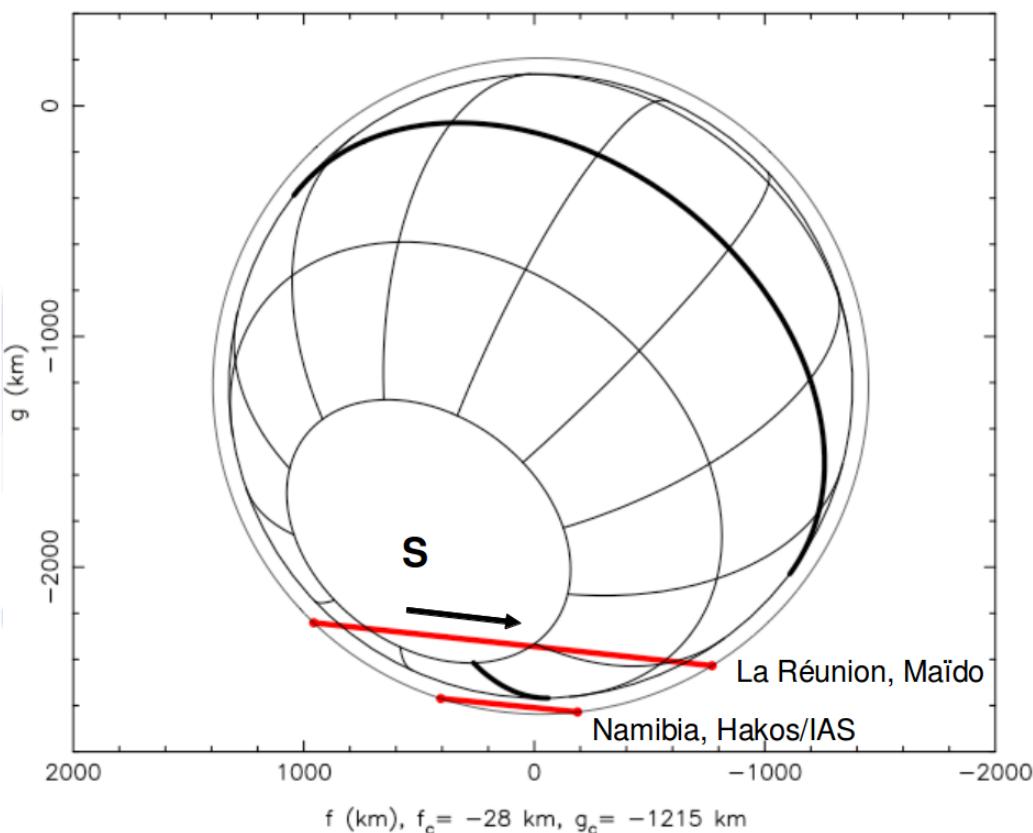
Variação sazonal de Tritão

Temporal variations of Triton subsolar latitude
from 09/06/-807 to 01/01/2100

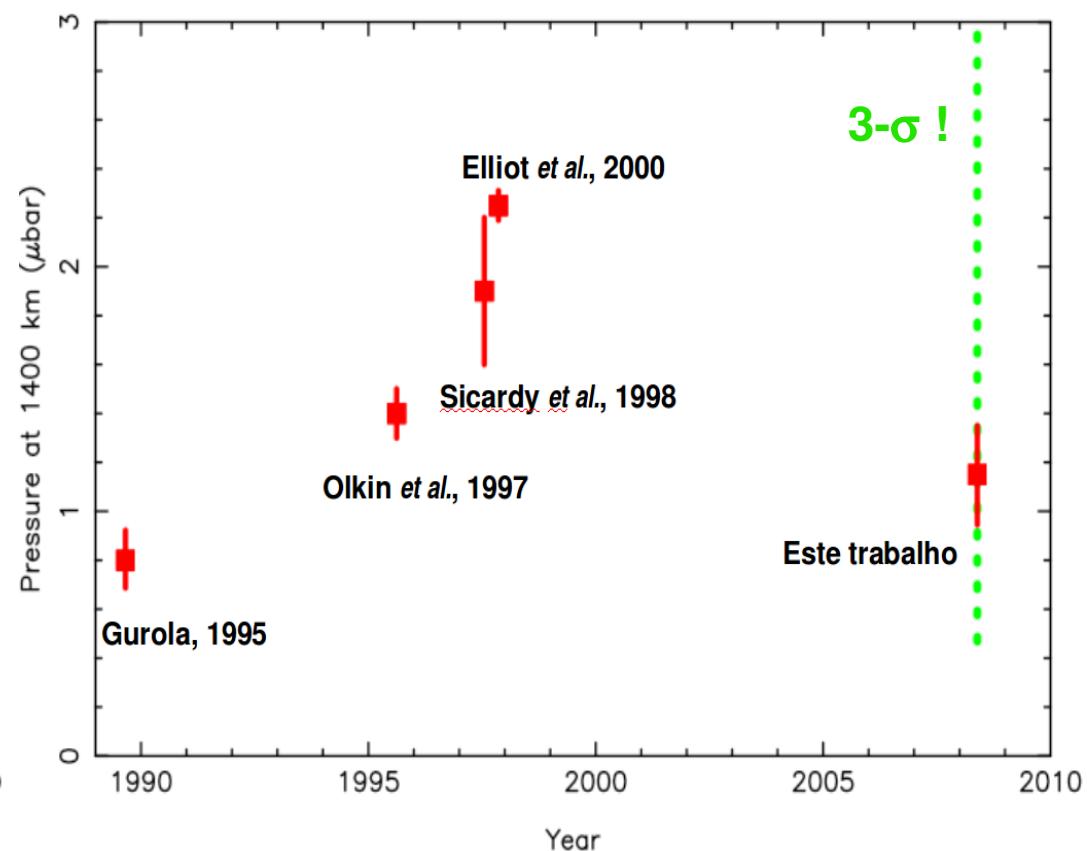


Ocultação de 21 de Maio de 2008

Triton, 21 May 2008, $r'_{1/2} = 1421.859$ km, $r_{1/2} = 1445.544$ km

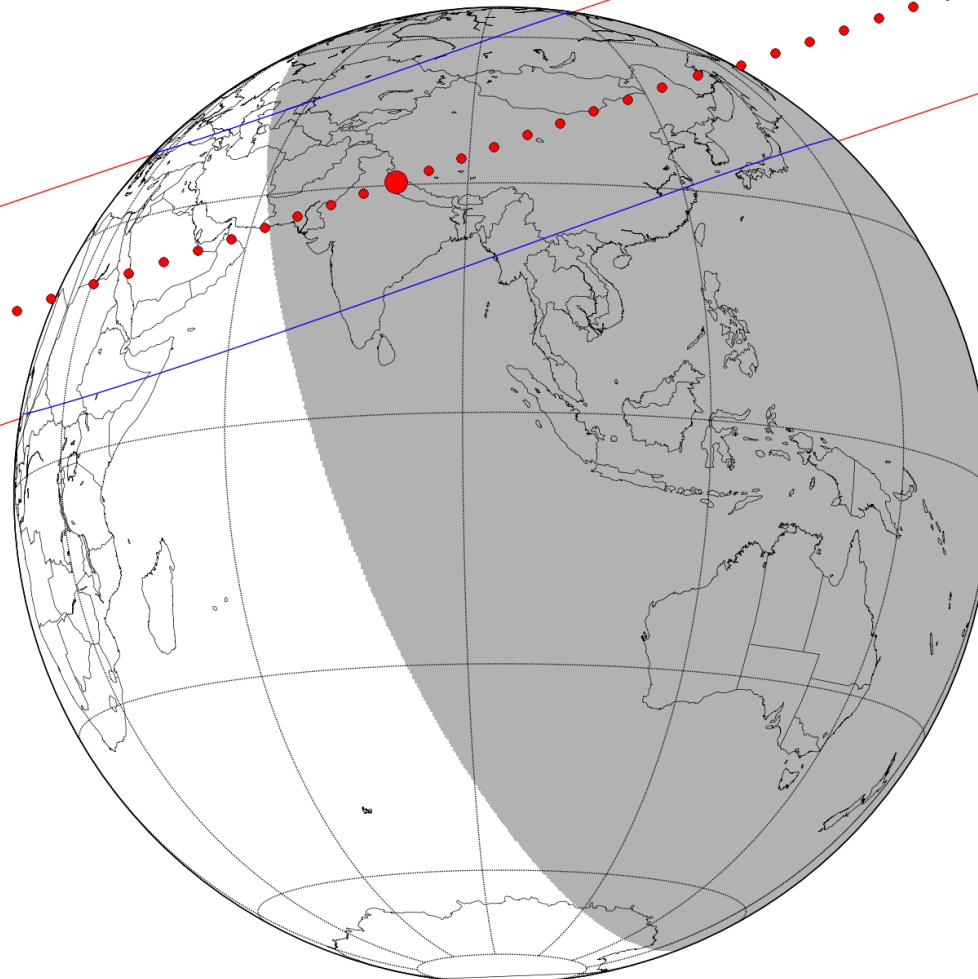


Triton atmospheric pressure



Ocultação de 10 de Novembro de 2015

Object	Diam	Tmax	dots <>	ra_off_obj_de	ra_of_star_de
Triton	2707 km	341.8s	60 s <>	+0.0	+0.0



year-m-d	h:m:s UT	ra_dec_J2000_candidate	C/A	P/A	vel	Delta	R*	K*	long
2015-11-10	12:59:24.000	22 35 24.2993 -09 45 50.996	0.201	341.27	-7.92	29.62	15.6	14.0	95

Marés

- Causa da circularização da órbita de Tritão;
- Fluxo de calor atingiu $2\sim4 \text{ W.m}^{-2}$ durante a fase de captura;
- Possui características tectônicas e criovulcânicas;
- A força de maré está desacelerando a órbita de Tritão. A órbita deve encolher cerca de 15% nos próximos 5 bilhões de anos.

Conclusão

- Utilizamos técnicas astrométricas e fotométricas precisas;
- Para prever, observar e reduzir ocultações estelares para obter parâmetros físicos;
- Estudar efeitos dissipativos causados por maré em Tritão;
- 1 artigo publicado, 1 no prelo e 1 em preparação;
- Em colaboração: 3 artigos publicados e 3 submetidos

Conclusão

- ## • Outros trabalhos

Astronomy & Astrophysics manuscript no. urano
March 17, 2015

©ESO 2015

Astrometry of the main satellites of Uranus: 18 years of observations*

Camargo, J.I.B.^{1,2}, Magalhães, F.P.^{1,3}, Vieira-Martins, R.^{1,2,4,★★}, Assafin, M.⁴, Braga-Ribas, F.^{1,2}, Dias-Oliveira, A.¹, Benedetti-Rossi, G.¹, Gomes-Júnior, A.R.⁴, Andrei, A.H.^{1,4,★★★,★★★★}, and da Silva Neto, D.N.⁵

Perspectivas

- Publicação das previsões de ocultações por satélites irregulares;
- Observar ocultações de Himalia de 23 de Outubro de 2015 e Tritão de 10 de Novembro de 2015;
- Outras ocultações de TNOs, Centauros e Satélites Irregulares;
- Melhoria das previsões com o catálogo GAIA.
- Publicação das previsões com o GAIA

Perspectivas

- Doutorado Sanduíche sob orientação do Dr. Valéry Lainey:
 - Coletar posições astrométricas do sistema Netuno-Tritão;
 - Coletar dados astrométricos de sondas, eventualmente dados do VLT e HST;
 - Integração numérica da órbita (com e sem efeitos de maré) utilizando o NOE;
 - Análise das efemérides de Netuno obtidas;
 - Publicação dos resultados.

Obrigado