

Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Programa de Pós Graduação em Astronomia
Observatório Nacional

Redução de imagens astronômicas obtidas a partir do
solo: preparando-se para a astrometria da missão
espacial Gaia

Taysa Bassallo

2017



Observatório
Nacional

REDUÇÃO DE IMAGENS ASTRONÔMICAS OBTIDAS A PARTIR DO SOLO:
PREPARANDO-SE PARA A ASTROMETRIA DA MISSÃO ESPACIAL GAIA

Taysa Bassallo da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada à
Divisão de Programas de Pós-graduação,
do Observatório Nacional, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título de
Mestre em Astronomia.

Orientador: Julio Ignacio Bueno de Camargo

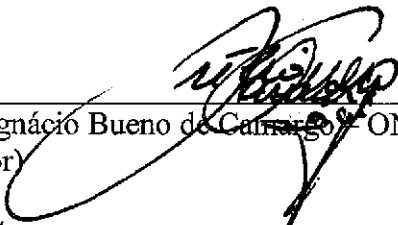
Rio de Janeiro
Setembro de 2017

"REDUÇÃO DE IMAGENS ASTRONÔMICAS OBTIDAS A PARTIR DO SOLO:
PREPARANDO-SE PARA A ASTROMETRIA DA MISSÃO ESPACIAL GAIA"


TAYSA BASSALLO DA SILVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRA EM ASTRONOMIA.

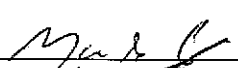
Aprovada por:



Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo – ON/MCTIC
(Orientador)



Dr. Fernando Virgílio Roig – ON/MCTIC



Dr. Marcelo Assafin – OV/UFRJ

RIO DE JANEIRO – BRASIL

29 DE SETEMBRO DE 2 017

Bassallo da Silva, Taysa

Redução de imagens astronômicas obtidas a partir do solo: preparando-se para a astrometria da missão espacial GAIA/Taysa Bassallo da Silva. – Rio de Janeiro: DPPG/ON, 2017.

XV, 57 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Julio Ignacio Bueno de Camargo

Dissertação (mestrado) – MCTI/ON/Programa de Astronomia, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 51 – 57.

1. *GAIA* Missão. 2. redução ao dia. 3. Refração cromática. I. Bueno de Camargo, Julio Ignacio. II. Observatório Nacional, ON, Programa de Astronomia. III. Mestrado

*À minha vó, que hoje já se
tornou estrelinha.*

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Dr. Julio Camargo, por todo o trabalho desenvolvido nos últimos anos, pelas muitas horas de dedicação à minha formação e por toda a compreensão. Ao Dr Roberto Martins, líder do nosso grupo de pesquisa, e a alguns membros em especial, como o Dr. Marcelo Assafin, Dr. Felipe Ribas, Dr. Gustavo Rossi, Bruno Morgado e Altair Gomes. Todos estes auxiliaram muito no meu aprendizado, sempre dispostos a tirar dúvidas e discutir os assuntos da pesquisa.

Ao Dr. Ricardo Ogando, que foi meu professor de e-science, por toda a sua paciência e boa vontade essenciais para quem estava no início da aprendizagem de programação. Ao Dr. Márcio Maia, que junto ao meu orientador e ao Dr. Roberto Martins, me ensinaram a teoria da astronomia observacional, que foi fundamental para que eu me tornasse uma das observadoras do grupo e pudesse realizar tantas missões nos telescópios do OPD. Nesse contexto, agradeço também ao Bruno Morgado, que me ensinou na prática, a manusear os telescópios.

Ao Dr. Álvaro Candal, que além de ter auxiliado na minha formação como professor de astronomia do sistema solar, apresentou trabalhos seus contendo espectros de alvos do sistema solar, utilizados na pesquisa descrita nesta dissertação. Ao Dr. Eduardo Amôres, por discussões sobre o cálculo da extinção interestelar.

Agradeço à minha família. Em especial a minha avó Léa, que hoje não está mais comigo, mas foi quem me inspirou a gostar da área de exatas, gostar de olhar para o céu e me deu todo o apoio possível para que eu fizesse tal mestrado. À minha mãe Leda e à minha tia Lúcia, por serem compreensivas nos momentos mais difíceis e por me incentivarem a não desistir.

Um muito obrigada aos meus amigos mais especiais. À Julia, que além de amiga se tornou uma colega de sala e de trabalho, sempre preocupada se eu estava me alimentando direito ou não, à Gabi, por estar sempre presente mesmo quando longe, à Marcella, amiga desde a matrícula da faculdade, à Marcele, minha única amiga de infância, sempre compreensiva e me dando força pra continuar, à Bibi, minha companheira de SAB, amiga que muitas vezes soube me entender melhor do que eu mesma e à Carol, minha amiga astrônoma mais especial. Ao Raphael, por todo o apoio e compreensão nos momentos difíceis. Aos amigos que conheci na astronomia: Altair, sempre disposto a ajudar e ensinar o que precisasse, e ao Bruno, por todo o vasto apoio no dia a dia do observatório. Estes e outros fizeram parte desta jornada. Muito obrigada a todos.

“Happiness can be found even in the darkest of times, if one only remembers to turn on the light.”

Alvo Dumbledore

Resumo

Este trabalho visa contribuir para uma astrometria mais refinada a partir do solo, em particular aquela de pequenos corpos do sistema solar, feita através do código PRAIA (Plataforma para Redução Automática de Imagens Astronômicas). Tal refinamento viabiliza-se a partir dos resultados oriundos da missão espacial Gaia, que irá prover, até seu término (2019+), precisões astrométricas da ordem de até o microssegundo de arco. Com esta precisão, chegamos a um cenário no qual os erros na astrometria pretendida dependerão quase que exclusivamente tanto da nossa capacidade de aperfeiçoamento do procedimento de observação como da forma com a qual é feita a redução da posição das imagens (ao invés de estarmos limitados, por exemplo, por erros sistemáticos do catálogo de referência). Neste contexto, nos concentramos em oferecer uma correção à refração cromática, essencial para se chegar a precisões em posição da ordem do milésimo do segundo de arco através de imagens obtidas em solo. Para isto, preparamos um software de apoio ao PRAIA com o auxílio de rotinas disponíveis no SOFA (*Standandards of Fundamental Astronomy*), de bancos de espectros estelares, e de um código para cálculo de extinção interestelar. Tal esforço nos colocará, por exemplo, em condições de prever ocultações estelares por satélites ou ocultações estelares rasantes por anéis de pequenos corpos.

Palavras-chave: Astrometria, Gaia, Redução ao dia, Refração cromática.

Abstract

This work aims at contributing to a more refined ground-based astrometry from the PRAIA code (Platform for the Reduction of Astronomical Images Automatically), more specifically, that of small solar system bodies. Such refinement is now possible thanks to the results of the Gaia space mission that will provide, until its end (2019+), astrometric accuracies reaching the micro-arcsecond.

This leads us to a new scenario, where the errors from ground-based astrometry will depend almost exclusively on our ability to improve both the quality of the observations and the reduction procedure (instead of, for instance, being limited by the systematic errors in reference catalogs).

In this context, we focus on writing a code to support PRAIA to correct the star positions for the chromatic refraction, essential to reach the milliarcsecond accuracy level from ground-based CCD images.

To accomplish this task, we use fortran routines made available by the SOFA (*Standards of Fundamental Astronomy*), a stellar spectra data set, and a code to determine interstellar extinction.

Such an effort will enable us, for example, to accurately predict stellar occultations by satellites or grazing stellar occultations by rings of small bodies.

Keywords: Astrometry, Gaia, Reduction of celestial coordinates, Chromatic refraction.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
2 Catálogos Estelares	3
2.1 FK5	4
2.2 ICRF	5
2.3 HIPPARCOS	6
2.4 Série de catálogos UCAC	7
3 Nova era para o estudo de pequenos corpos do sistema solar a partir de ocultações estelares	12
3.1 A missão espacial Gaia	12
3.2 <i>Large Synoptic Survey Telescope – LSST</i>	15
4 Aspectos sobre o tratamento astrométrico de imagens	18
4.1 Astrometria CCD e o PRAIA	18
4.2 A interação do código desenvolvido com o PRAIA	20
4.2.1 Refração atmosférica	21
4.2.1.1 Modelo plano-paralelo	21
4.2.1.2 Modelo de camadas esféricas	22
4.2.2 Movimento próprio	25
5 Comprimento de onda médio e espectros	29
5.1 Determinação do espectro estelar	30
5.2 Espectro dos alvos: TNOs e Centauros	32
6 Análise e resultados	35
6.1 Testes realizados com as observações de Plutão	35
6.2 Testes realizados com as observações de Haumea	41
6.3 Testes realizados com as observações de Chariklo	46
7 Conclusão e comentários	49

Lista de Figuras

2.1	Diferenças, para a época J1991.25, em ascensão reta entre o FK5 e o HIPPARCOS como função da ascensão reta (painel esquerdo) e da declinação (painel direito). Créditos: Perryman et al. [40], Vol3., 419.	4
2.2	Diferenças, para a época J1991.25, em declinação entre o FK5 e o HIPPARCOS como função da ascensão reta (painel esquerdo) e da declinação (painel direito). Créditos: Perryman et al. [40], Vol3., 419.	5
2.3	Distribuição das fontes definidoras do ICRF2 sobre a esfera celeste.	6
2.4	Princípio de funcionamento do HIPPARCOS, com as grades de modulação relativas às medidas do <i>star mapper</i> (por onde se dá a passagem indicada por I_1) e da missão principal HIPPARCOS (por onde se dá a passagem indicada por I_2). Figura extraída de Kovalevsky [28].	7
2.5	Diferença (linha contínua negra) em declinação para Chariklo no sentido efeméride refinada menos efeméride do JPL. Círculos azuis: diferenças entre declinações de Chariklo oriundas de observações CCD e aquelas oriundas do JPL. Círculos vermelhos: diferenças entre declinações de Chariklo oriundas de ocultações estelares e aquelas oriundas do JPL. Toda a astrometria é baseada no UCAC4. Área cinza: incerteza (1σ) da órbita refinada. Cortesia: B. Sicardy (Observatório de Paris). . .	9
2.6	Similar à Fig. 2.5. Agora, os pontos vermelhos são dados com referência ao Gaia DR1. Note que a incerteza na órbita, para um futuro não muito distante da data da última observação, é menor que o tamanho angular do corpo principal. Cortesia: B. Sicardy (Observatório de Paris).	10
2.7	Similar à Fig. 2.5. Agora, os pontos vermelhos e os azul-claros (reduções recentes e re-reduções dos respectivos pontos azul-escuros da Fig. 2.6) são dados com referência ao Gaia DR1. Note como as declinações oriundas da astrometria Gaia, mesmo na ausência de movimentos próprios, acompanha a órbita. Situação similar ocorre para a ascensão reta. Estes são os dados mais recentes que temos até a escrita deste trabalho. Cortesia: J. Desmars (Observatório de Paris).	11
3.1	Lei de varredura do Gaia. O eixo de rotação possui precessão e mantém-se a 45° do Sol, evitando assim que sua luz incida diretamente sobre os dois telescópios enquanto efetuam a varredura do céu. Créditos: P. Tanga, ciclo de Webinars do LIneA (http://www.linea.gov.br/wp-content/uploads/lineadbfiles/apresentacao/Tanga-Gaia_SSO_webinar_red.pdf). . .	13

3.2	Montagem do conjunto óptico do Gaia, com os CCDs sobre os quais incide a luz oriunda do plano focal combinado de ambos os telescópios, separados pelo ângulo de 106.5°. Créditos: P. Tanga, ciclo de Webinars do LIneA (http://www.linea.gov.br/wp-content/uploads/lineadbfiles/apresentacao/Tanga-Gaia_SSO_webinar_red.pdf).	13
3.3	Ilustração de uma posição da linha de varredura em relação ao eixo das ascensões retas. As incertezas ao longo da perpendicular à direção de varredura são bastante diferentes daquelas obtidas ao longo dela. Isto faz com que as incertezas em R.A. e DEC. fiquem fortemente correlacionadas no caso de poucas medidas. Créditos: P. Tanga, ciclo de Webinars do LIneA (http://www.linea.gov.br/wp-content/uploads/lineadbfiles/apresentacao/Tanga-Gaia_SSO_webinar_red.pdf). . .	14
3.4	Contagem cumulativa de objetos do cinturão de Kuiper a serem detectados pelo LSST em função do diâmetro. O número total esperado de objetos detectados pelo LSST é 40 0000 TNOs (marcados como KBO). Créditos: LSST Science Collaboration et al. [35] – <i>LSST Science Book</i> , pg. 100.	15
3.5	Eficiência de descobertas do LSST e mediana das observações do LSST para algumas populações do sistema solar. TNOs: linhas sólidas vermelhas. Objetos do disco espalhado (um subconjunto dos TNOs, com maior inclinação orbital e excentricidade): linhas vermelhas tracejadas. Troianos jovianos: linhas cor-de-rosa. Asteroides do cinturão principal: linhas verdes. Asteroides próximos à Terra: linhas azuis sólidas. Asteroides potencialmente perigosos: linhas azuis tracejadas. Créditos: LSST Science Collaboration et al. [35] – <i>LSST Science Book</i> , pgs. 102 e 104.	16
4.1	Deslocamento relativo para estrelas de diferentes tipos espectrais, em diferentes filtros, como resultado da refração cromática. Tabela extraída de Ivantsov [26]. . .	20
4.2	Ilustração do modelo plano-paralelo. Figura extraída de Kovalevsky [28], pg. 34. .	21
4.3	Figura extraída de Kovalevsky [28], pg. 35.	23
4.4	Efeito de paralaxe. Identificam-se os vetores posição baricêntrico e geocêntrico da estrela bem como a posição baricêntrica do geocentro.	28
5.1	Destacados entre linhas vermelhas, estão os coeficientes de extinção retornados pelo código python. Circulado, está o valor associado a uma distância de 500 pc. . . .	30
5.2	Tabela 6 de Schlafly and Finkbeiner [44]. Destacada entre linhas vermelhas, encontra-se a coluna de valores que devem ser utilizadas em combinação com os resultados exemplificados na Fig. 5.1. Circulado, está o valor a ser multiplicado por 0.254 para calcularmos então a extinção a 500 pc no filtro <i>J</i>	31
5.3	Em vermelho: espectro de uma estrela G2V (painel esquerdo) e M2V (painel direito). Em azul, os respectivos espectros avermelhados segundo Calzetti et al. [9]. Em verde, a eficiência quântica para o CCD 105 do OPD. As pequenas barras verticais sobre o eixo <i>x</i> indicam os valores de (λ_m) antes e depois do avermelhamento, respectivamente. Painel esquerdo: 606 nm e 613 nm. Painel direito: 703 nm e 706 nm. A distância assumida para a estrela é 500 pc. As coordenadas de apontamento são $\alpha = 269^\circ$ e $\delta = -16.5^\circ$ ($l = 12^\circ$ e $b = 4.3^\circ$).	32

5.4	Espectros de reflectância relativa para TNOs e Centauros. Esses espectros foram deslocados ao longo dos eixos das ordenadas por valores entre 0.5 e 0.8 para melhor clareza visual. Créditos: Fornasier et al. [17].	33
5.5	Espectros de reflectância relativa para TNOs e Centauros em comprimentos de onda no visível. Esses espectros foram deslocados ao longo dos eixos das ordenadas por valores entre 0.57 e 1.0 para melhor clareza visual. Créditos: Alvarez-Candal et al. [2].	34
6.1	Visualização do efeito da refração cromática. A linha horizontal representa uma paralela ao horizonte do observador. A linha vertical representa uma perpendicular a esse horizonte.	36
6.2	Visualização do efeito da refração cromática diferencial sobre a ascensão reta de Plutão, ilustrando os resultados apresentados em Benedetti-Rossi et al. [6].	36
6.3	Efeito da refração cromática diferencial em ascensão reta. Pontos (cinza): diferenças (O-C) oriundas diretamente das observações. Triângulos (preto): correção desse efeito de refração como determinado por Benedetti-Rossi et al. [6].	37
6.4	Correção da refração cromática (pontos vermelhos) a partir dos resultados deste trabalho. Em azul, valores de (O-C) para a ascensão reta de Plutão sem se considerar efeitos de refração.	38
6.5	Painel esquerdo: histograma dos resíduos dados pelos pontos vermelhos da Fig. 6.4. Painel direito: histograma dos resíduos dados pelos pontos azuis da mesma figura, após correção da inclinação. Em ambos os histogramas, a gaussiana ajustada é mostrada. Os tamanho dos <i>bins</i> é de 5 <i>mas</i>	38
6.6	Painel esquerdo: correção à refração cromática (pontos vermelhos) a partir dos resultados deste trabalho. Em azul, valores de (O-C) para a declinação de Plutão sem se considerar efeitos de refração. Painel direito: resultados de Benedetti-Rossi et al. [6] para declinação. Os símbolos são como na Fig. 6.3.	40
6.7	Painel esquerdo: espectro de Plutão dado por Lorenzi et al. [33], normalizado em $0.6\mu\text{m}$ e oriundo da média de 6 outros espectros estudados pelos mesmos autores. Painel direito: espectro de uma estrela K2V dividido por aquele de uma estrela G2V.	41
6.8	Perfis do CCD IKON (azul) e filtro <i>R</i> (vermelho) utilizados nas observações de Haumea.	42
6.9	Pontos azuis: redução sem consideração à refração cromática. Pontos vermelhos: redução com correção à refração cromática. Painel esquerdo: dados obtidos em 08 de junho de 2015 com o telescópio Perkin-Elmer (1.6m) do OPD. Painel direito: dados obtidos em 09 de junho de 2015 com o telescópio Perkin-Elmer (1.6m) do OPD.	43
6.10	Espectro de reflectância composto de Haumea, como dado por Pinilla-Alonso et al. [42]. A região do espectro que nos interessa aqui é aquela $< 1\mu\text{m}$	43
6.11	Painel esquerdo: curva de luz rotacional de Haumea com informações de 4 bandas: <i>B</i> , <i>R</i> , <i>J</i> , <i>H</i> . Painel direito: medida dos desvios das cores $B - J$, $B - H$, $R - J$, $R - H$, e $J - H$ com respeito às suas respectivas curvas rotacionais medianas. Crédito: Lacerda [30].	44

6.12	Probabilidade de que cada uma das curvas oriundas das diferenças em cor, apresentadas na Fig. 6.11 (painel direito), seja equivalente às respectivas medianas dadas pelas linhas pontilhadas. Quanto mais uma sequência de pontos se afasta dessa mediana, maior é o pico apresentado. Crédito: Lacerda [30].	45
6.13	Pontos azuis: redução sem consideração à refração cromática. Pontos vermelhos: redução com correção à refração cromática, a exemplo do que foi feito para a Fig. 6.9, mas utilizando um tipo espectral MOV para Haumea.	46
6.14	Perfis do CCD IKON (azul) e filtro <i>I</i> (vermelho) utilizados nas observações de Chariklo.	47
6.15	Pontos azuis: redução sem consideração à refração cromática. Pontos vermelhos: redução com correção à refração cromática.	48

Lista de Tabelas

6.1	Plutão: informações sobre as observações	36
6.2	Haumea: informações sobre as observações	41
6.3	Desvios-padrão – Haumea	42
6.4	Chariklo: informações sobre as observações	47
6.5	Desvios-padrão – Chariklo	47

Capítulo 1

Introdução

Com os resultados oriundos da missão espacial Gaia (Gaia Collaboration et al. [19, 20], Perryman et al. [39]), uma nova era se apresenta para a astronomia em geral e, em particular, para a astrometria de pequenos corpos do sistema solar a partir do solo. Isto vem como consequência da precisão sem precedentes (desde micro a sub milissegundo de arco) com a qual parâmetros astrométricos serão entregues ao fim da missão.

Até o final da escrita deste trabalho, apenas a primeira versão do catálogo com dados da missão Gaia estava disponível - *Gaia Data Release 1*¹ (*DR1*) [19]. Entre outros, esse catálogo oferece posições, magnitudes na banda *G* ($\sim V$), e respectivas precisões² para mais de um bilhão de objetos. Para cerca de 2 000 000 de estrelas em comum com o catálogo Tycho-2 [24], movimentos próprios e paralaxes trigonométricas também são oferecidos.

Apesar da astrometria do Gaia DR1 estar aquém daquela das liberações futuras de dados da missão, sua qualidade já é excepcional e superior a qualquer outra disponível em comprimentos de onda ópticos. Isto pode ser inferido pelos seguintes pontos:

1. O catálogo possui grande densidade de objetos (mais de 1 bilhão espalhados por toda a esfera celeste). Isto faz com que imagens CCD tenham sempre uma grande quantidade de objetos para referência astrométrica oriundos do Gaia DR1.
2. O catálogo possui erros sistemáticos virtualmente nulos [38]. Esta é uma qualidade excepcional. Com ela, por exemplo, podemos assegurar que se determinarmos a posição atual de um dado TNO através de imagens obtidas em solo e tendo o Gaia DR1 como referência para astrometria, saberemos que a posição determinada é coerente com aquela de uma estrela que será por ele ocultada daqui a um ano. Em outras palavras, subconjuntos de poucas (por exemplo, < 100) estrelas materializam eixos coordenados que estão alinhados com aqueles que seriam dados pelo catálogo inteiro.
3. O catálogo não possui rotação [38]. Isto significa que os eixos coordenadas definidos pelo catálogo estão virtualmente fixos (sem rotação) em relação à matéria distante no Universo.

¹Veja também <https://gaia.esac.esa.int/documentation/GDR1/>

²Em astrometria, essas precisões variam desde 1 a 20 milésimos de segundos de arco como função da magnitude.

Um segundo ponto que devemos considerar aqui são os grandes levantamentos, como o *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST, [35]). Este levantamento varrerá o céu visível desde Cerro Pachón cerca de duas vezes a cada 10 dias e irá detectar objetos tão fracos quanto $r \sim 24.5$ em imagens simples. Em particular, o LSST deverá descobrir uma grande quantidade de objetos, dezenas de milhares de objetos transnetunianos (TNOs) e Centauros³ entre eles.

No que diz respeito ao estudo de corpos do sistema solar através de ocultações estelares, não há dúvida quanto à excepcional sinergia entre Gaia e LSST. Ela permitirá que predições de ocultações estelares sejam feitas com grande precisão. De fato, sob *seeing* e razão sinal/ruído (SNR) adequados, o LSST espera fornecer posições tão precisas quanto 10 milésimos de segundos de arco (ou *mas*, do inglês *milliarcseconds*).

Assim, além do inevitável aumento tanto no número de eventos de ocultação como no número de corpos envolvidos, algumas opções estarão mais ao alcance. Por exemplo, teremos interesse na observação de ocultações por satélites de TNOs, em eventos rasantes de anéis (o que permite uma melhor resolução angular dos anéis), ou mesmo no estudo de características topográficas do corpo (por exemplo, Dias-Oliveira et al. [11]). Tais casos requerem uma determinação cuidadosa da posição dos corpos, pois suas efemérides devem possuir incertezas inferiores a 2 *mas*.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo dar um passo na direção de uma astrometria mais precisa a partir de imagens CCD obtidas em solo. Este passo é dado aqui através da construção de um módulo para consideração da refração cromática a ser utilizada no pacote astrométrico PRAIA [5].

No capítulo 2, *Catálogos estelares*, apresentaremos e descreveremos alguns dos principais catálogos utilizados antes da era Gaia. No terceiro capítulo, *Nova era para o estudo de pequenos corpos do sistema solar a partir de ocultações estelares* iremos levantar os principais aspectos de projetos que nos possibilitarão esta melhoria na astrometria de pequenos corpos do sistema solar, a saber, a missão Gaia e o *Survey LSST*. No quarto capítulo, *Aspectos sobre o tratamento astrométrico de imagens*, discursaremos sobre código PRAIA, movimentos próprios estelares e refração atmosférica. No quinto capítulo, *Comprimento de onda médio e espectros*, discutiremos como determinamos o comprimento de onda médio e os espectros (tanto das estrelas quanto dos alvos), dados que são necessários para a utilização do código. No sexto capítulo, *Análise e resultados*, vamos descrever o código desenvolvido e analisar os resultados oriundos de sua aplicação em alguns casos selecionados. No sétimo capítulo, *Conclusão e comentários*, abordaremos as dificuldades encontradas ao longo da pesquisa, apresentaremos pontos positivos e negativos do produto final e discutiremos sua eficácia. Também vamos falar de possíveis trabalhos futuros a partir desta dissertação, em especial a partir do lançamento completo dos dados provenientes da missão GAIA.

³Objetos com órbitas instáveis situados entre Júpiter e Netuno, considerados similares, em suas propriedades físicas, aos TNOs.

Capítulo 2

Catálogos Estelares

Catálogos estelares com finalidades astrométricas servem para materializar eixos coordenados, que idealmente não possuem rotação com relação à matéria distante no Universo, através de posições de objetos espalhados pela esfera celeste. Em outras palavras, tais catálogos têm como razão primeira a materialização de um referencial inercial celeste.

A UAI¹ recomenda, entre outros pontos, que coordenadas espaciais com origens no baricentro do sistema solar e no centro de massa da Terra não possuam rotação com respeito a um conjunto de objetos extragalácticos distantes. Este novo conceito na história dos referenciais celestes fez com que os eixos coordenados fossem fixos em relação a objetos distantes no Universo. As definições anteriores adotaram eixos privilegiados na dinâmica do movimento da Terra no espaço, a saber, o equador médio e equinócio dinâmico em épocas de referência (por exemplo B1950 ou J2000.0). Neste novo conceito, direções fixas não precisam mais estar associadas a uma época particular, e a determinação dos eixos coordenados não depende da modelagem precisa do movimento de corpos do sistema solar [4] [13].

De maneira geral, como já exposto no capítulo anterior, são desejáveis três qualidades em um catálogo de referência:

1. Inercialidade. Ou seja, os eixos coordenados definidos pelo seu sistema de posições não apresenta rotação em relação à matéria distante no Universo.
2. Coerência. Ou seja, conjuntos diferentes de objetos definem os mesmos eixos coordenados. Em outras palavras, ausência de erros sistemáticos.
3. Acessibilidade. Ou seja, grande quantidade de objetos espalhados por toda a esfera celeste. Um exemplo prático é, por exemplo, podermos contar com número suficiente de estrelas de referência na imagem obtida sempre que apontarmos um telescópio para uma região qualquer do céu.

Previamente à era Gaia, sem demérito a esforços e resultados que claramente marcaram (ou ainda marcam) época, nenhum catálogo satisfaz todas essas três qualidades. A seguir, descreveremos brevemente alguns deles e daremos um exemplo concreto do efeito que erros sistemáticos oriundos dos catálogos de referência podem ter sobre a astrometria realizada.

¹<https://www.iers.org/IERS/EN/Science/Recommendations/recommendation2.html> - IAU(1991) RECOMMENDATION II.

2.1 FK5

Começando pela série alemã de catálogos fundamentais FK (*Fundamental Katalog*), a materialização de um referencial inercial celeste era dada por um conjunto de posições e movimentos próprios estelares. O último catálogo dessa série a ser referendado pela União Astronômica Internacional (UAI) foi o FK5 [18] e, até o final do ano de 1997, constituiu-se na materialização do referencial celeste referendada pela UAI. Esses catálogos estelares usam como referência para suas posições o equinócio e equador J2000 sendo, portanto, primariamente baseados na dinâmica do sistema solar [13].

O qualitativo "Fundamental" refere-se a catálogos instrumentais de observação absolutas, ou seja, aqueles cujas respectivas observações foram realizadas sem referência a posições estelares previamente determinadas. O qualitativo aplica-se também à combinação de vários catálogos de observações absolutas, desde que referidas a um mesmo referencial [1]. Este é o caso do FK5, que também inclui em sua compilação catálogos ditos *quasi*-absolutos, ou seja, declinações absolutas mas apenas diferenças absolutas em ascensão reta². O FK5 possui posições e movimentos próprios para 1535 estrelas mais brilhantes que $V = 7.5$. Destas, um pequeno conjunto de 59 estrelas possuem paralaxes trigonométricas, com valores dados por [27], e velocidades radiais, com valores dados por [50].

As Figs. 2.1 e 2.2 mostram claramente, levando em conta a precisão das medidas HIPPARCOS (seção 2.3) em relação àsquelas do FK5, que o item "coerência", apresentado anteriormente, não é preenchido por este último.

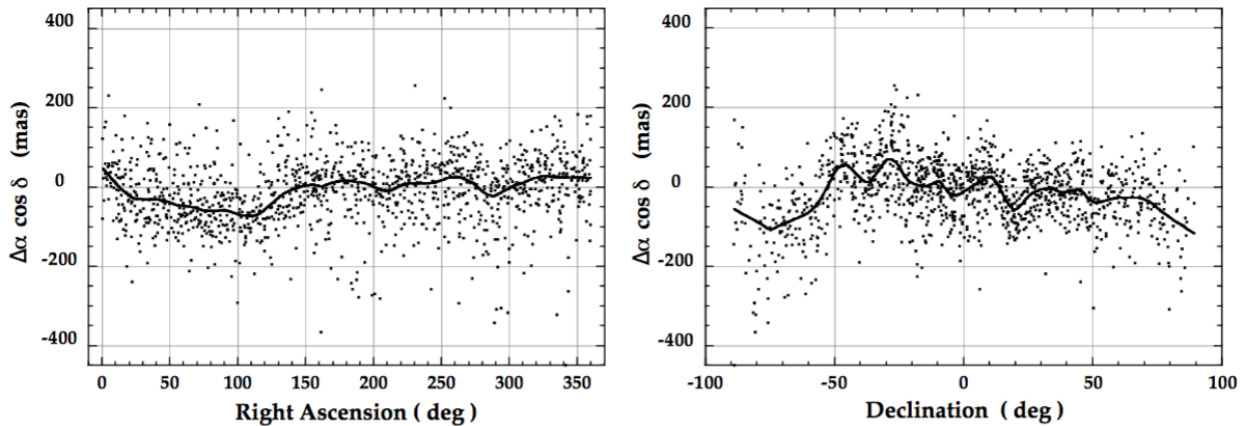


Figura 2.1: Diferenças, para a época J1991.25, em ascensão reta entre o FK5 e o HIPPARCOS como função da ascensão reta (painel esquerdo) e da declinação (painel direito). Créditos: Perryman et al. [40], Vol3., 419.

²Nesse caso, a origem das ascensões retas precisaria ser adotada de fonte externa.

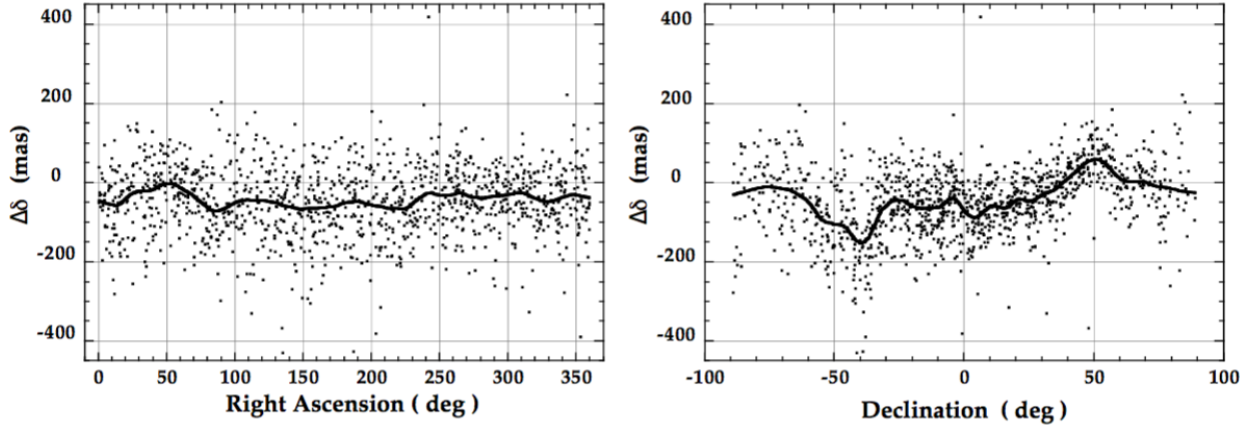


Figura 2.2: Diferenças, para a época J1991.25, em declinação entre o FK5 e o HIPPARCOS como função da ascensão reta (painel esquerdo) e da declinação (painel direito). Créditos: Perryman et al. [40], Vol3., 419.

2.2 ICRF

A partir de 01 de janeiro de 1998, a UAI passa a adotar um novo referencial celeste, o *International Celestial Reference Frame* (ICRF, [36]).

Vale novamente lembrar a importante mudança de paradigma com relação aos referenciais anteriores. O ICRF dá posições de objetos extragalácticos os quais, por conta de suas grandes distâncias, podem ser considerados como fixos. Com isto, a determinação de seus eixos coordenados não mais depende da modelagem precisa do movimento de corpos do sistema solar e tampouco a direção destes eixos está associada a uma época particular. Posições muito precisas (poucos *mas*) de tais objetos são determinadas na banda rádio através de técnicas de interferometria de base muito longa (*Very Long Baseline Interferometry* – VLBI). A versão atual desse catálogo é o ICRF2³ e é, desde 01 de janeiro de 2010, a materialização primária do referencial celeste referendada pela UAI [7].

O ICRF2 contém um total de 3414 fontes extragalácticas, das quais 295 (Fig. 2.3) são ditas definidoras. Estas fontes possuem alta qualidade astrométrica⁴ segundo as observações realizadas pelo VLBI e, por consequência, definem os eixos do ICRF. As outras possuem posições coerentes com aquelas das definidoras e servem, entre outros, para densificar o referencial.

Note que a acessibilidade do referencial rádio é seu ponto fraco, não apenas pelo pequeno número de fontes mas também pela magnitude das mesmas (maioria com $V > 21$ e algumas poucas fontes com magnitude V entre 17 e 19).

³<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn35.html>.

⁴Esta qualidade é avaliada a partir de um conjunto de números conhecidos como *índice de estrutura* [14] [15] [8]. Números pequenos estão associados às fontes mais espacialmente compactas. Quanto menor esse número, melhor a qualidade astrométrica da fonte.

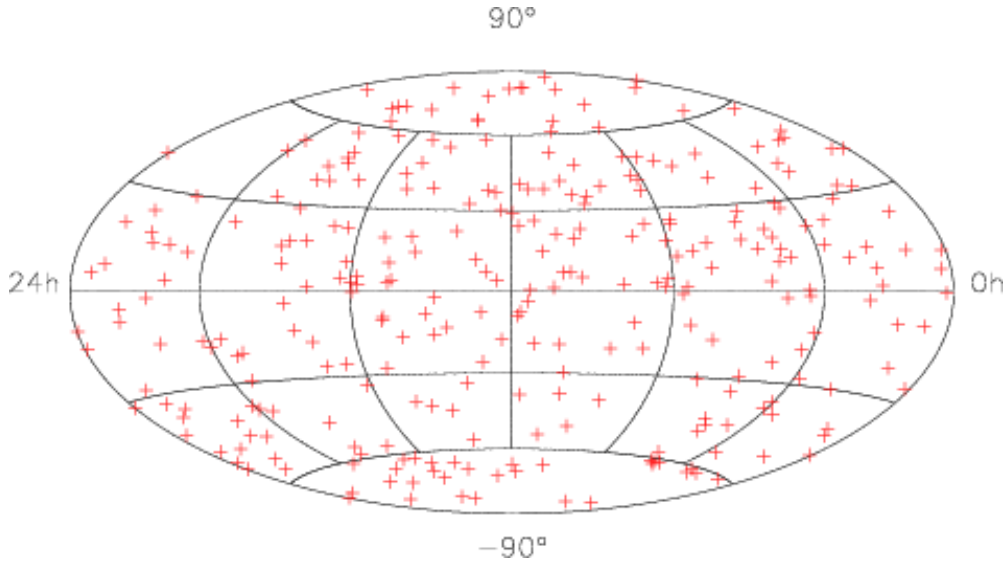


Figura 2.3: Distribuição das fontes definidoras do ICRF2 sobre a esfera celeste.

2.3 HIPPARCOS

Na banda óptica, a extensão primeira do ICRF é dada pelo catálogo HIPPARCOS (*High Precision PARallax Collecting Satellite* [12]). Este catálogo é derivado da missão astrométrica espacial homônima, lançada ao espaço em agosto de 1989.

O catálogo HIPPARCOS possui 118 218 objetos espalhados por toda a esfera celeste e uma precisão mediana em posição, movimentos próprios, e paralaxes, menor que 1 *mas*. Trata-se também de um catálogo brilhante, completo até $V = 7.3 - 9.0$.

Um segundo produto derivado dessa missão espacial foi o catálogo Tycho. Ele foi obtido a partir das leituras do *star mapper* (utilizado para o controle de atitude do satélite, Fig. 2.4), contém informações astrométricas e fotométricas para mais de 1 050 000 de estrelas, e é completo até $V_T \sim 10.5$ mag. A mediana da precisão dos parâmetros astrométricos é 25 *mas*. Uma nova e mais avançada técnica de redução dos mesmos dados utilizados no catálogo Tycho deram lugar ao catálogo Tycho-2 [23]. Como resultado, este último possui em torno de 2 500 000 de estrelas. Ainda, movimentos próprios tão precisos quanto 2.5 *mas*/ano foram obtidos combinando-se posições do Tycho-2 com as do Catálogo Astrográfico⁵. Este último determinou milhões de posições de estrelas com $V \lesssim 11.5$, através de placas fotográficas, observadas entre 1895 e 1920. Envolveu 20 observatórios espalhados pelo mundo e fez parte, junto com a *Carte du Ciel*⁶, de um grande projeto internacional para mapear o céu até $V \sim 14$. Mais detalhes sobre esse grande projeto pode ser visto em Urban et al. [48].

⁵Veja Urban et al. [48] para uma breve história desse catálogo.

⁶Não completado por várias instituições devido ao custo das placas.

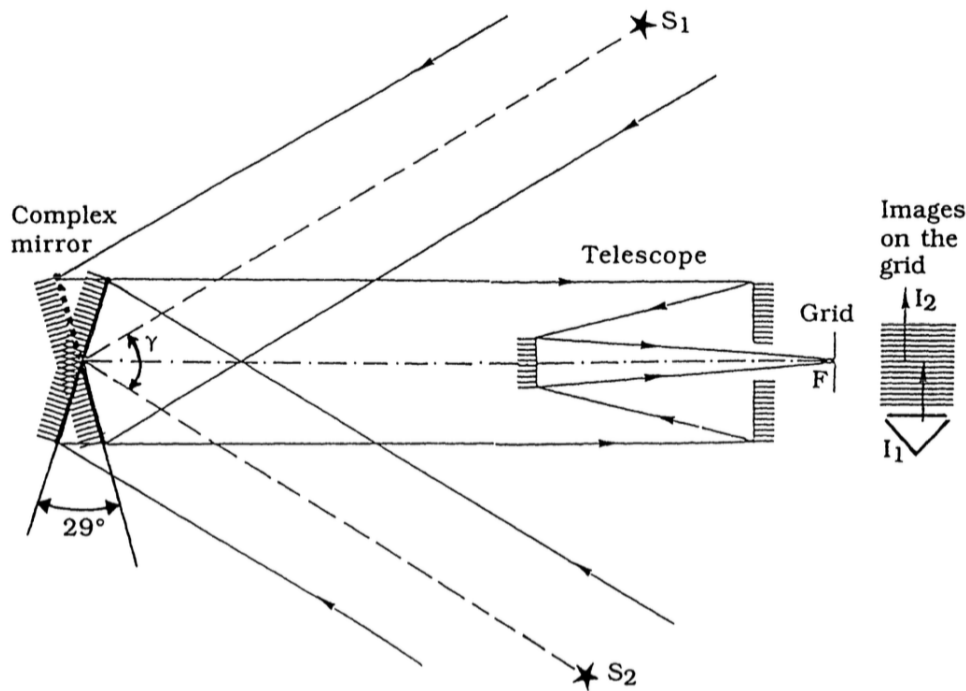


Figura 2.4: Princípio de funcionamento do HIPPARCOS, com as grades de modulação relativas às medidas do *star mapper* (por onde se dá a passagem indicada por I_1) e da missão principal HIPPARCOS (por onde se dá a passagem indicada por I_2). Figura extraída de Kovalevsky [28].

Note que, no que diz respeito às observações realizadas pela missão HIPPARCOS (grade com passagem I_2 na Fig. 2.4), medidas eram realizadas apenas ao longo da varredura, isto é, perpendicular à grade. Devido à lei de varredura, que inclui a precessão do eixo de rotação do satélite, uma mesma estrela é observada várias vezes, nas quais a direção de varredura também é diferente. Podemos pensar então que direções diferentes fixam a posição da estrela na esfera celeste com relação a um dado plano de referência e uma origem arbitrária nesse plano.

Vale notar que, apesar da clara superioridade astrométrica do catálogo HIPPARCOS sobre o Tycho-2, este último foi mais utilizado como referência para astrometria a partir do solo. A razão? O HIPPARCOS possui uma densidade de ~ 3 estrelas por grau quadrado, o que torna improvável termos alguma de suas estrelas em imagens que não as tenham explicitamente como alvos. Além disso, as estrelas HIPPARCOS são brilhantes e comumente ficam saturadas.

Esta lacuna foi providencialmente coberta pela série de catálogos do Observatório Naval dos Estados Unidos (*USNO CCD Astrometric Catalog – UCAC*).

2.4 Série de catálogos UCAC

Pode-se dizer que, desde a primeira versão do UCAC (UCAC-1, [53]), esta série de catálogos tem-se constituído no veículo através do qual o referencial celeste é efetivamente acessado sempre que necessitamos determinar posições de corpos celestes através de imagens CCD. Sua versão mais recente, o UCAC-5 [51], foi apresentada em 2017 e representa uma nova redução das observações

CCD realizadas pelo astrógrafo do Observatório Naval dos Estados Unidos utilizando um subconjunto de estrelas brilhantes do Gaia DR1 (próxima seção), para as quais movimentos próprios também são dados. Isto permitiu que posições fossem (re)determinadas com precisões tipicamente entre 20 *mas* e 30 *mas*. Combinando-se essas posições (época média próxima a 2001) com aquelas do Gaia DR1 (época 2015), foram determinados novos movimentos próprios com incertezas entre 1 *mas*/ano e 5 *mas*/ano para mais de 107 milhões de estrelas ($R \lesssim 16$) espalhadas pela esfera celeste. Sem dúvida, até a liberação dos dados do Gaia DR2 (prevista para Abril de 2018 e que conterá os cinco parâmetros astrométricos para mais de 1 bilhão de objetos), o UCAC-5 é material importante na redução de imagens CCD para datas afastadas de 2015. Obviamente, posições Gaia, que constam no UCAC5, são aquelas que devem ser usadas em conjunto com os movimentos próprios determinados.

Até recentemente, portanto, o UCAC4⁷ [52] foi a principal referência astrométrica para um grande número de trabalhos envolvendo cinemática estelar e astrometria CCD. Em particular, esse catálogo foi de fundamental importância nos trabalhos de nosso grupo de pesquisa no quesito de predição de ocultações estelares por corpos do sistema solar.

Entre os vários corpos para os quais mantemos uma rotina de observações para melhorarmos suas órbitas, o Centauro (10199) Chariklo é aquele para o qual possuímos a efeméride mais precisa. Um histórico da evolução dessa precisão, como mostrado pelas Figs. 2.5, 2.6, e 2.7, nos mostra a diferença entre resultados obtidos com o UCAC4 (com erros sistemáticos nominais de 20 *mas* [52], sem considerarmos aqueles devidos aos movimentos próprios) e aqueles oriundos do Gaia, cujas posições são virtualmente livres de tais erros. O uso da efeméride de Chariklo como exemplo é válido por conta do sucesso com que ocultações por ele promovidas têm sido previstas.

A Fig. 2.5 mostra uma comparação entre a órbita de Chariklo que nosso grupo utiliza, como calculada pelo código NIMA *Numerical Integration of the Motion of an Asteroid* [10], e aquela oriunda do JPL (*Jet Propulsion Laboratory, sistema Horizons*). Os círculos azuis referem-se à astrometria de Chariklo como dada pela redução de imagens CCD, utilizando-se o catálogo UCAC4 como referência astrométrica. Os círculos vermelhos são dados por ocultações estelares, a partir das quais a posição relativa entre a estrela ocultada e Chariklo é conhecida com precisão de poucos *mas* (por exemplo, [49] e [45]). Assim, uma boa astrometria da estrela oferece uma boa posição do objeto ocultador. Os círculos em vermelho são aqueles de maior peso no cálculo das efemérides.

Na Fig. 2.6, posições estelares do Gaia DR1 são utilizadas para se determinar as posições de Chariklo através das ocultações estelares. Vale comparar a distância entre os círculos vermelhos e a linha negra contínua nas Figs. 2.6 e 2.5.

Na Fig. 2.7, a diferença entre os círculos em azul-claro e em azul-escuro vem basicamente da substituição do UCAC4⁸ pelo Gaia DR1 como catálogo de referência. Obviamente, se podemos dizer que a órbita de Chariklo é boa, então é razoável que posições observadas de Chariklo não fiquem distantes dela.

As diferenças entre os círculos azul-escuros e a efeméride de Chariklo, quando comparadas com aquelas dadas pelos outros círculos, é reflexo não apenas das incertezas das estrelas utilizadas na

⁷Vale lembrar que o UCAC4, diferentemente do UCAC5, não se beneficiou da presença de posições muito precisas oriundas da missão Gaia.

⁸Certamente, não se deixa de reconhecer o excelente e árduo trabalho realizado na compilação do UCAC4, bem como seus resultados.

redução das imagens mas também dos erros sistemáticos do catálogo de referência.

É importante ressaltar ainda que após iniciar o uso do Gaia para a melhoria das efemérides, todas as ocultações por Chariklo observadas (que não foram perdidas por mal tempo, por exemplo) foram previstas com sucesso, o que nos fornece mais pontos em vermelho, que como foi mencionado anteriormente, são aqueles de maior peso no cálculo das efemérides. Dessa forma, assim como incertezas baixas nos permitem prever ocultações com maior sucesso, quanto mais ocultações são observadas menor se torna a incerteza da órbita.

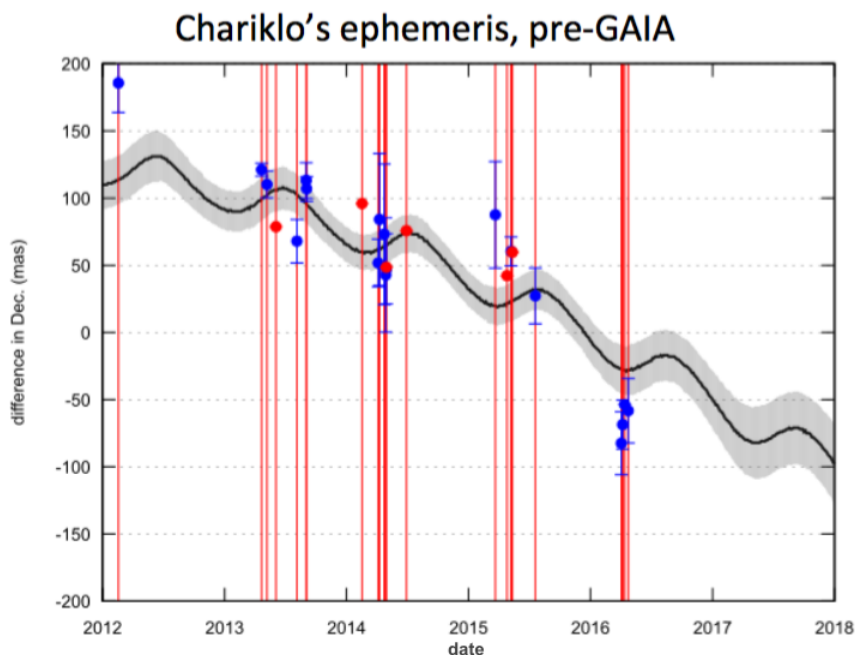


Figura 2.5: Diferença (linha contínua negra) em declinação para Chariklo no sentido efeméride refinada menos efeméride do JPL. Círculos azuis: diferenças entre declinações de Chariklo oriundas de observações CCD e aquelas oriundas do JPL. Círculos vermelhos: diferenças entre declinações de Chariklo oriundas de ocultações estelares e aquelas oriundas do JPL. Toda a astrometria é baseada no UCAC4. Área cinza: incerteza (1σ) da órbita refinada. Cortesia: B. Sicardy (Observatório de Paris).

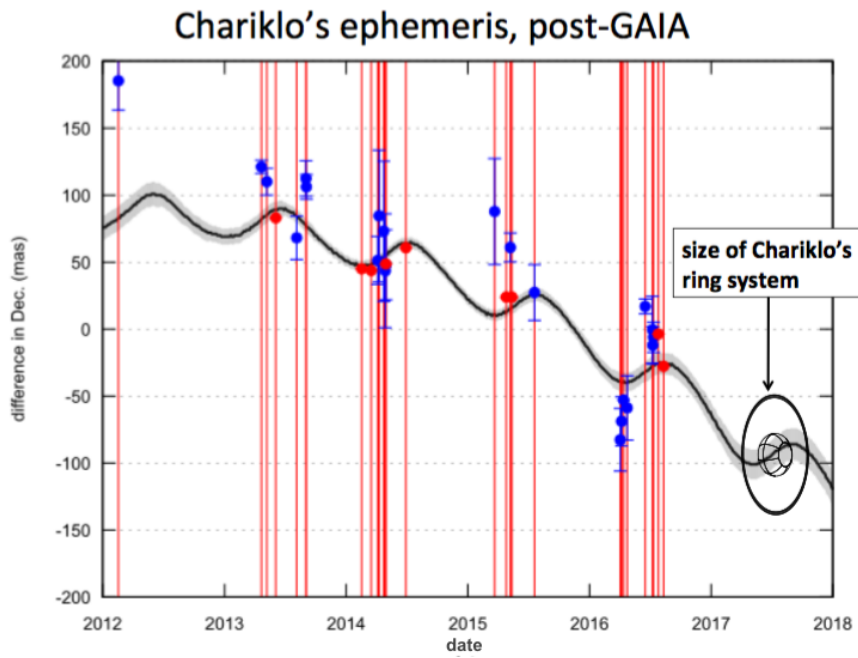


Figura 2.6: Similar à Fig. 2.5. Agora, os pontos vermelhos são dados com referência ao Gaia DR1. Note que a incerteza na órbita, para um futuro não muito distante da data da última observação, é menor que o tamanho angular do corpo principal. Cortesia: B. Sicardy (Observatório de Paris).

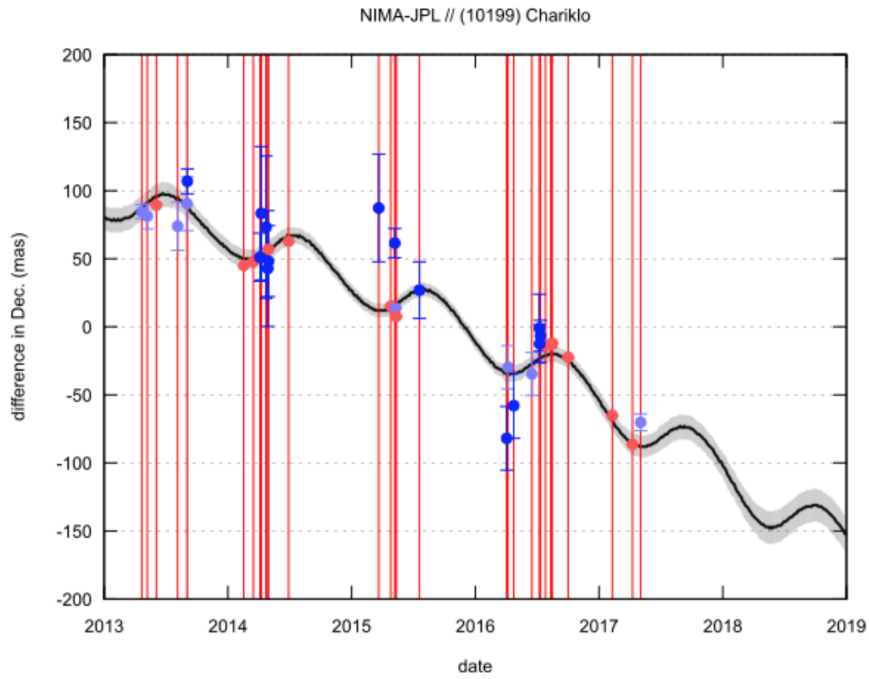


Figura 2.7: Similar à Fig. 2.5. Agora, os pontos vermelhos e os azul-claros (reduções recentes e re-reduções dos respectivos pontos azul-escuros da Fig. 2.6) são dados com referência ao Gaia DR1. Note como as declinações oriundas da astrometria Gaia, mesmo na ausência de movimentos próprios, acompanha a órbita. Situação similar ocorre para a ascensão reta. Estes são os dados mais recentes que temos até a escrita deste trabalho. Cortesia: J. Desmars (Observatório de Paris).

Capítulo 3

Nova era para o estudo de pequenos corpos do sistema solar a partir de ocultações estelares

No que diz respeito ao estudo do sistema solar com auxílio de ocultações estelares, é inegável a sinergia entre a missão espacial Gaia e grandes levantamentos de céu profundo, como o *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST).

A primeira fornecerá parâmetros astrométricos com precisões sem precedentes para mais de um bilhão de estrelas espalhadas por todo o céu. O segundo irá imagear o céu visível a partir de Cerro Pachón cerca de 2 vezes por semana, detectando objetos tão fracos quanto $r \sim 24.5$ em imagens simples (isto é, não co-adicionadas). Em particular, algumas dezenas de milhares de TNOs e Centauros serão descobertos.

Como consequência, predições precisas de ocultações por dezenas de milhares de objetos tornar-se-ão possíveis, impulsionando assim o estudo dos pequenos corpos.

3.1 A missão espacial Gaia

De maneira geral, a Astronomia está fundada em três pilares metrológicos: a astrometria, a fotometria, e a espectroscopia. A missão espacial Gaia [21] efetua essas três medidas a partir do espaço e com a mesma instrumentação, sendo que as duas primeiras são apresentadas para mais de um bilhão de objetos.

O conceito básico de observação do Gaia é similar ao do HIPPARCOS: observar simultaneamente em seu detector dois campos no céu separados por um grande ângulo (106.5° no caso do Gaia), cujas variações precisam ser bem controladas e medidas. Assim, a distância entre dois objetos é dada pelo ângulo básico mais a separação que apresentarem sobre o detector. Observações simultâneas através de um grande ângulo permitem ao Gaia virtualmente eliminar a presença de erros sistemáticos em suas medidas bem como obter paralaxes absolutas [32]. A Fig. 3.1 ilustra a lei de varredura do Gaia, enquanto que a Fig. 3.2 ilustra seu conjunto óptico.

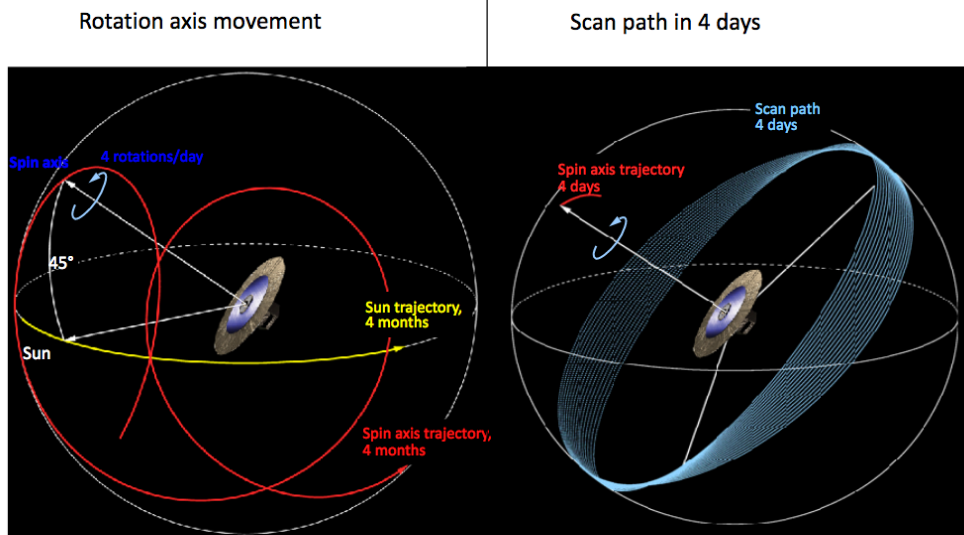


Figura 3.1: Lei de varredura do Gaia. O eixo de rotação possui precessão e mantém-se a 45° do Sol, evitando assim que sua luz incida diretamente sobre os dois telescópios enquanto efetuam a varredura do céu. Créditos: P. Tanga, ciclo de Webinars do LIneA (http://www.linea.gov.br/wp-content/uploads/lineadbfiles/apresentacao/Tanga-Gaia_SSO_webinar_red.pdf).

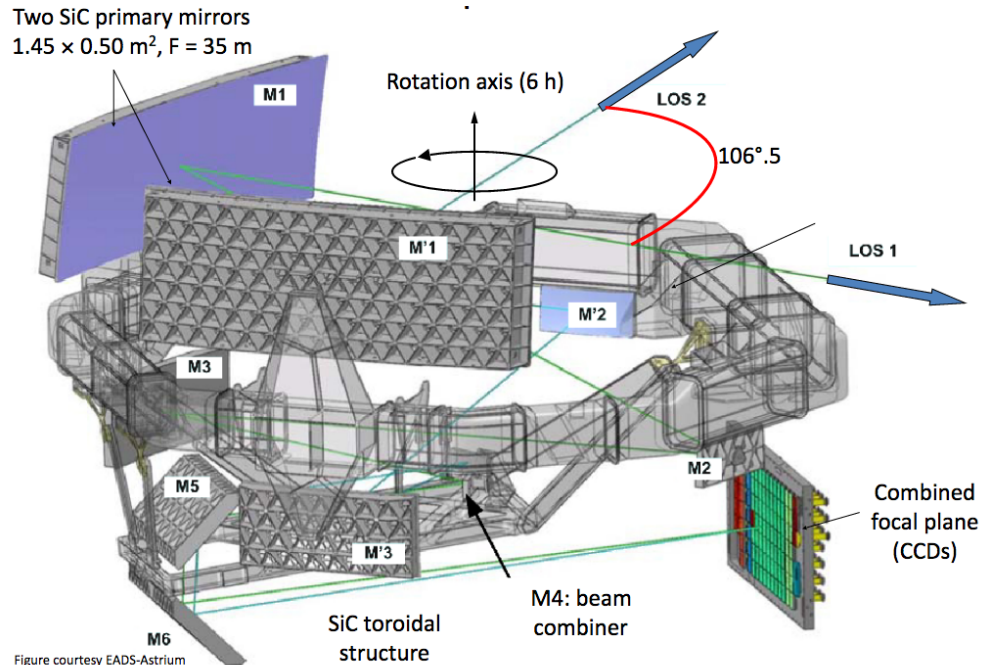


Figura 3.2: Montagem do conjunto óptico do Gaia, com os CCDs sobre os quais incide a luz oriunda do plano focal combinado de ambos os telescópios, separados pelo ângulo de 106.5° . Créditos: P. Tanga, ciclo de Webinars do LIneA (http://www.linea.gov.br/wp-content/uploads/lineadbfiles/apresentacao/Tanga-Gaia_SSO_webinar_red.pdf).

A medida fundamental efetuada pelo Gaia é o instante no qual o pico de brilho de uma fonte cruza uma linha fiducial no CCD. Vale lembrar que as medidas mais precisas realizadas pelo Gaia dão-se ao longo da linha de varredura (Fig. 3.1, linhas azuis no desenho à direita), em contraste com as medidas na direção perpendicular. Conforme uma mesma estrela é "varrida" em direções diferentes, no entanto, a qualidade de sua posição torna-se cada vez menos dependente da direção de varredura. Em média, uma estrela será visitada cerca de 70 vezes.

Asteroides, por sua vez, encontram-se numa situação diferente (Fig. 3.3). De fato, devido ao seu movimento muito rápido quando comparado ao estelar, asteroides não serão cobertos pela varredura do satélite da mesma forma que estrelas.

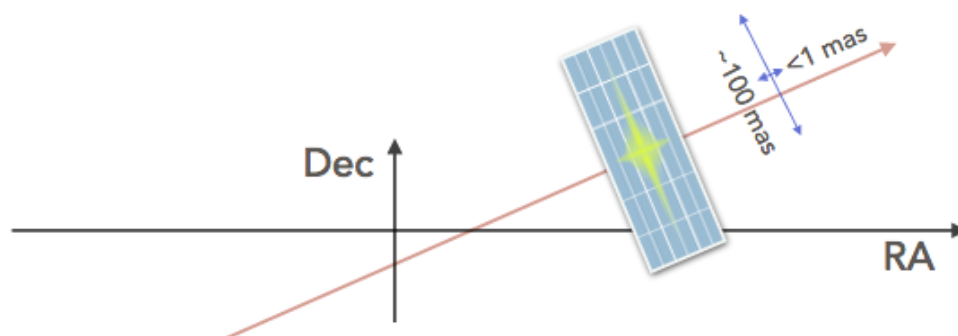


Figura 3.3: Ilustração de uma posição da linha de varredura em relação ao eixo das ascensões retas. As incertezas ao longo da perpendicular à direção de varredura são bastante diferentes daquelas obtidas ao longo dela. Isto faz com que as incertezas em R.A. e DEC. fiquem fortemente correlacionadas no caso de poucas medidas. Créditos: P. Tanga, ciclo de Webinars do LIneA (http://www.linea.gov.br/wp-content/uploads/lineadbfiles/apresentacao/Tanga-Gaia_SSO_webinar_red.pdf).

O satélite foi lançado na Guiana Francesa em dezembro de 2013 e os preparos para as observações foram completados em julho de 2014 [21].

Os dados finais possuirão incertezas entre o microssegundo de arco e o sub-*mas* para posições, paralaxes, e movimentos próprios anuais. Isto significa, por exemplo, que será possível medir efeitos tão pequenos quanto a aberração em movimento próprio por conta do movimento do baricentro do sistema solar ao redor da Galáxia [29]. Ou então, poderemos reduzir placas fotográficas datando de 100 anos atrás e ainda termos posições Gaia de referência, na data de observação dessas placas, com precisões da ordem do *mas*.

A primeira liberação dos dados do Gaia (Gaia DR1 – *Data Release 1*) ocorreu em 14 de setembro de 2016. Apesar da qualidade dos dados estarem distantes daquela esperada para o produto final, os resultados já se mostram bastante impressionantes.

O Gaia DR1 é apresentado com dois conjuntos distintos de dados no que diz respeito à astrometria: o oriundo da solução astrométrica Tycho-Gaia (*TGAS – Tycho-Gaia astrometric solution*, também chamada de solução primária) e a solução secundária.

O *TGAS* possui 2 057 050 de um total de 1 142 679 769 fontes fornecidas pelo Gaia DR1. Para esse subconjunto, a chamada solução de cinco parâmetros astrométricos é apresentada: posições

(α, δ) , movimentos próprios $(\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta)$ e paralaxe (π). A magnitude limite desse catálogo é $G \sim 12.05$ e as precisões em astrometria são tipicamente melhores que 1 mas para posições e paralaxes e 3.2 mas/ano para movimentos próprios.

O segundo conjunto possui mais de um bilhão de fontes e, no que diz respeito à astrometria, apenas posições são fornecidas. Essa solução secundária possui estrelas tão fracas quanto $G \sim 21.0$ e posições tipicamente mais precisas que 16.3 mas . Precisão em posição são, como seria de se esperar, função da magnitude. Para $G = 18.0$, um valor que propicia suficiente número de estrelas de referência para redução de imagens CCD, a precisão em posição é melhor que 12 mas [32].

O conjunto completo de resultados oriundos do Gaia DR1 pode ser acessados em <https://gea.esac.esa.int/archive/>. Em particular, nesse endereço, notamos que as incertezas em magnitude não são fornecidas, mas sim as respectivas incertezas em fluxo. No entanto, a incerteza em magnitude pode ser calculada de forma simples:

$$\text{mag}_G = K - 2.5 \cdot \log_{10}(F_G) = K - 2.5 \cdot \frac{\ln(F_G)}{\ln(10)} \implies \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\text{mag}_G} = \frac{|-2.5|}{\ln(10)} \cdot \frac{\sigma_{F_G}}{F_G} = 1.0857362048 \cdot \frac{\sigma_{F_G}}{F_G} \quad (3.2)$$

3.2 Large Synoptic Survey Telescope – LSST

O número de TNOs e Centauros conhecido até a data de escrita deste trabalho, de acordo com os números constantes no *Minor Planet Center*¹, é de aproximadamente 2 600. Cores, taxonomia, e diâmetros, no entanto, são conhecidos para apenas uma fração desse número ($\lesssim 14\%$)².

Por outro lado, estima-se o número de TNOs com diâmetros maiores que 100 km em cerca de 70 000 [25]. Já o LSST estima observar cerca de 40 000 tais objetos (veja Figs. 3.4 e 3.5).

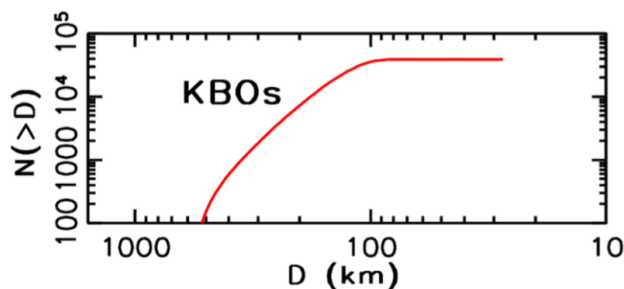


Figura 3.4: Contagem cumulativa de objetos do cinturão de Kuiper a serem detectados pelo LSST em função do diâmetro. O número total esperado de objetos detectados pelo LSST é 40 000 TNOs (marcados como KBO). Créditos: LSST Science Collaboration et al. [35] – *LSST Science Book*, pg. 100.

¹<http://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/MPLLists.html>.

²Segundo levantamento dado em <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>.

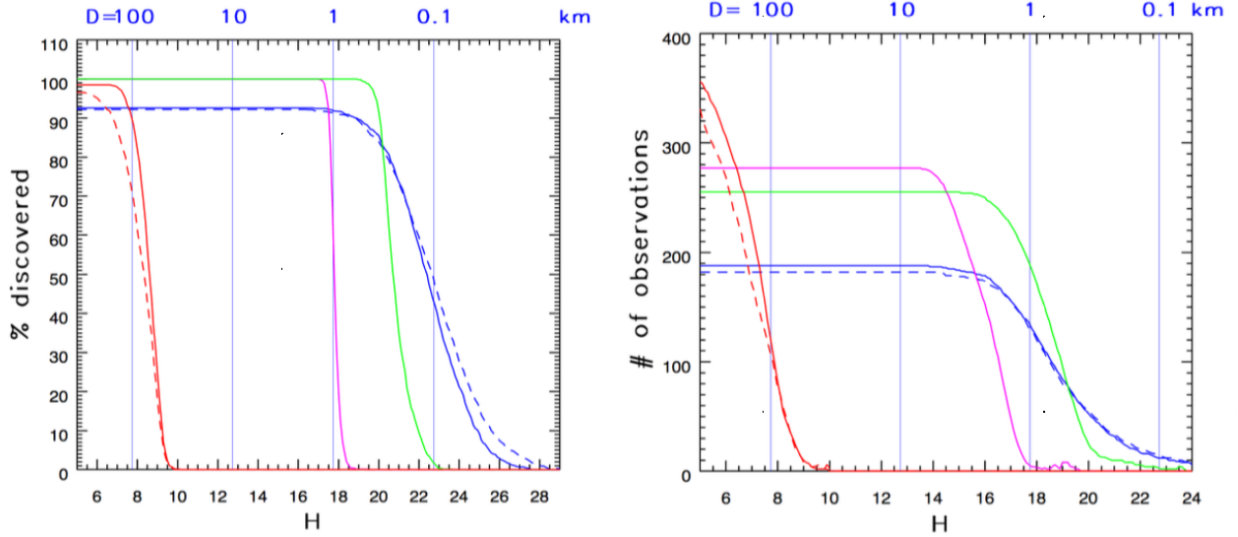


Figura 3.5: Eficiência de descobertas do LSST e mediana das observações do LSST para algumas populações do sistema solar. TNOs: linhas sólidas vermelhas. Objetos do disco espalhado (um subconjunto dos TNOs, com maior inclinação orbital e excentricidade): linhas vermelhas tracejadas. Troianos jovianos: linhas cor-de-rosa. Asteroides do cinturão principal: linhas verdes. Asteroides próximos à Terra: linhas azuis sólidas. Asteroides potencialmente perigosos: linhas azuis tracejadas. Créditos: LSST Science Collaboration et al. [35] – *LSST Science Book*, pgs. 102 e 104.

O LSST irá observar o céu visível a partir de Cerro Pachón cerca de 2 vezes a cada semana³ e detectar objetos tão tênues quanto $r \sim 24.5$ (imagens simples). Como resultado de medidas frequentes de posições, estaremos aptos a manter efemérides ”curtas”⁴ de alta precisão para objetos fracos do sistema solar. Levando em conta que numa ocultação não é necessário detectar-se o fluxo do ocultador, o LSST torna-se a ferramenta perfeita – junto com a astrometria Gaia e a técnica de ocultação estelar – para trazer mais conhecimento sobre um mundo até o momento escondido pela alta magnitude de seus objetos.

É esperado que o time do LSST também forneça astrometria entre os produtos da redução das imagens. Sob *seeing* e SNR adequados, uma precisão de 10 *mas* é esperada por objeto por observação. Isto significa que, com frequência, poderemos utilizar a astrometria oriunda do LSST diretamente para refinar as órbitas de TNOs e Centauros.

Em situações nas quais o objeto foi observado de tal forma que a SNR é dominada pelo sinal e a imagem desse objeto espalha-se por um número suficiente de píxels, a precisão na determinação do centroide (x, y) desse objeto é [37]

$$\frac{\sigma}{SNR}. \quad (3.3)$$

Se lembrarmos que a largura à meia altura (FWHM – *Full Width at Half Maximum*, tomada como medida do *seeing*) relaciona-se com σ através da igualdade $FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma$, podemos reescrever a Eq. 3.3 como

³<https://www.lsst.org/lsst/>.

⁴Efemérides precisas até 1-3 anos após a data da última observação.

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2} \cdot SNR}. \quad (3.4)$$

Então, tomando-se um *seeing* de 1'' e sabendo-se que a precisão do centroide não poderá ser pior que 10 *mas*⁵, notamos que valores de SNR superiores a 42.5 são adequados para se atingir a qualidade astrométrica mencionada acima.

Entretanto, em alguns casos, precisões maiores são necessárias. Por exemplo, pode-se desejar observar uma ocultação rasante pelo sistema de anéis de Chariklo (e ter melhor acesso à estrutura dos anéis) ou, para corpos com atmosfera, estudar as camadas atmosféricas mais próximas à superfície (o que necessita colocar o observador no centro da sombra de ocultação). Aqui, as efemérides necessitam de precisões de 1-5 *mas* ou melhor. Este trabalho busca oferecer ferramentas necessárias para isso.

⁵Caso contrário, a precisão na posição será pior que 10 *mas*.

Capítulo 4

Aspectos sobre o tratamento astrométrico de imagens

A redução astrométrica de uma imagem CCD dá-se, de maneira geral, pela tradução de coordenadas (x, y) sobre esse CCD, da forma mais precisa possível, em coordenadas equatoriais observadas. Essa tradução é auxiliada por posições estelares oriundas de um catálogo de referência.

Nessa redução, é fundamental ter-se em conta quaisquer efeitos que resultem em mudanças nas distâncias relativas¹ entre as estrelas dadas pelo catálogo de referência e suas respectivas imagens no CCD. Entre os efeitos não instrumentais mais relevantes para este contexto estão os movimentos próprios e a refração atmosférica.

A seguir, descreveremos brevemente o funcionamento do PRAIA bem como a refração atmosférica e os movimentos próprios.

4.1 Astrometria CCD e o PRAIA

O PRAIA (Plataforma de Redução Astrométrica de Imagens Astronômicas) [5] foi desenvolvido pelo Dr. M. Assafin (OV/UFRJ) para realizar astrometria de grande precisão e fotometria a partir de grandes quantidades de imagens CCD.

O PRAIA é rodado em 2 etapas. Na primeira, um arquivo com os nomes das imagens CCD é lido e informações contidas no cabeçalho são extraídas. Na segunda, a astrometria propriamente dita, objetos são automaticamente identificados e seus centroides são determinados. Catálogos, como o UCAC5², são lidos e a identificação entre objetos nesse catálogo e na imagem é feita automaticamente. O usuário também pode fornecer o catálogo de referência de sua preferência³. Uma vantagem disso é podermos selecionar o conjunto de objetos a ser fornecido através de, por exemplo, magnitude ou tipo espectral.

A conversão entre coordenadas (x, y) sobre o CCD e coordenadas equatoriais (α, δ) pode ser feita com auxílio das Eqs. 4.1 e 4.2 a seguir:

¹Em astrometria relativa, os resultados são invariantes por rotações rígidas e translações.

²Na versão do PRAIA que utilizamos, o UCAC4 ainda era utilizado

³Respeitando-se um formato fixo.

$$\xi_i = ax_i + by_i + c \quad (4.1)$$

$$\eta_i = dx_i + ey_i + f, \quad (4.2)$$

onde uma solução pode ser obtida da seguinte forma:

- Determina-se os centroides (x_i, y_i) dos objetos na imagem CCD.
- Dado um catálogo de referência, encontra-se as coordenadas (x_i, y_i) que correspondem às estrelas desse catálogo.
- Determina-se as coordenadas gnomônicas (ξ_i, η_i) dessas estrelas (estrelas de referência).
- Determina-se então as constantes a, b, c, d, e, f por mínimos quadrados.
- Com essas constantes, determinamos as coordenadas gnomônicas (ξ_i, η_i) dos objetos alvo sobre o CCD.
- Com a projeção gnomônica inversa, determinamos as coordenadas celestes dos alvos.

De maneira geral, por conta da pequena área do céu coberta por um CCD, efeitos como nutação, precessão, e aberração da luz, podem ser desconsiderados porque representam no CCD, com muito boa aproximação, rotações rígidas ou translações. Tais efeitos são perfeitamente absorvidos pelos coeficientes das Eqs. 4.1 e 4.2, não promovendo alteração dos resultados (posições estelares).

Por outro lado, é mais delicada a situação na qual a imagem sobre o CCD não preserva, a menos de um fator de escala, as distâncias angulares entre os objetos celestes como dadas pelo catálogo de referência. Por exemplo, movimentos próprios alteram a posição relativa entre as estrelas quando consideramos épocas diferentes daquelas das posições do catálogo no qual se encontram.

O mesmo ocorre com a refração. Embora seu efeito global possa frequentemente ser levado em conta, numa dada imagem, pelos termos não independentes das Eqs. 4.1 e 4.2⁴, o efeito diferencial varia como função não apenas da massa de ar mas também como função do espectro da estrela. Ele pode alterar a posição relativa entre as estrelas em algumas dezenas de *mas*, dependendo do filtro, tipo espectral, e massa de ar, e sua correção deve ser levada em conta quando se pretende determinar posições com precisões de poucos *mas* (ou, em última análise, se quisermos de fato nos aproximarmos do limite em posição imposto pela SNR). A magnitude desse efeito pode ser vista na Fig. 4.1.

⁴Considerando a luz monocromática, nos referimos aqui à diferença no valor da refração para objetos com diferentes distâncias zenitais numa mesma imagem.

Chromatic refraction in mas at a zenith distance of 45°

Passbands / Spectral types	O	B	A	F	G	K	M
U	101	36	-29	0	8	-4	-42
B	88	58	12	0	-28	-100	-115
V	26	17	12	0	-8	-35	-42
R	22	18	12	0	-6	-21	-35
I	6	5	2	0	-1	-4	-6

Figura 4.1: Deslocamento relativo para estrelas de diferentes tipos espectrais, em diferentes filtros, como resultado da refração cromática. Tabela extraída de Ivantsov [26].

Neste trabalho, optamos por tomar a projeção gnomônica dos objetos **já corrigidas** da refração cromática, ou seja, optamos por não incluir nas Eqs. 4.1 e 4.2 termos que levem em conta a cor do objeto. Tal opção deve-se à chegada da astrometria oriunda da missão espacial Gaia, que oferecerá posições, movimentos próprios, e paralaxes com precisão sem precedentes, além de fotometria multi-filtro, para mais de 1 bilhão de objetos espalhados pela esfera celeste, bem como velocidades radiais. A motivação principal é que as equações mencionadas levem em conta apenas efeitos devidos ao instrumento. Quanto mais isolados tais efeitos estiverem de fatores externos a ele, melhor podemos estudá-los e aprimorar os procedimentos de astrometria.

4.2 A interação do código desenvolvido com o PRAIA

Por construção, a versão do PRAIA que utilizamos determina os coeficientes de transformação entre coordenadas (x, y) sobre o CCD e coordenadas gnomônicas (ξ, η) a partir de ascensões retas e declinações dadas com respeito ICRF (aproximadamente, equador e equinócio médios J2000), devolvendo coordenadas observadas ascensão reta e declinação no mesmo referencial.

Por conta disso, visto que uma redução ao dia é parte do processo que desenvolvemos neste trabalho, servimo-nos de outros programas do pacote PRAIA para a implementação dos seguintes passos⁵:

1. Uma redução convencional de imagem, isto é, sem aplicação da correção à refração cromática, foi efetuada.
2. Redução ao dia dos resultados observacionais oriundos do passo anterior.
3. Redução ao dia, com aplicação da refração cromática, das posições das estrelas de referência.
4. Utilização do código PRAIA_redo_astrometry. Este código tem como ponto inicial um arquivo, gerado no passo 1, quem contém coordenadas (x, y) e as respectivas coordenadas

⁵De fato, o PRAIA não está adaptado para embarcar nosso código.

equatoriais (e não uma imagem CCD). O código pode, agora, determinar os coeficientes da transformação gnomônica a partir de um catálogo de referência que contempla a refração cromática (passo 3). Isto se deve ao fato de que os arquivos oriundos dos passos 2 e 3 possuem coordenadas equatoriais dadas num mesmo referencial (equador e equinócio da data de observação) e, portanto, a identificação entre posições observadas e de referência pode ser feita⁶ pelo PRAIA.

- Obviamente, para obtermos as diferenças entre posições observadas e calculadas dos objetos alvos (TNOs/Centauros), suas posições astrométricas, como dadas a partir de efemérides planetárias, também passam por um procedimento de redução ao dia e correção da refração cromática.

Vale lembrar que cada imagem é tomada num instante de tempo diferente e, portanto, sujeitas a uma massa de ar diferente. Por consequência, um catálogo de referência é criado para cada imagem. Da mesma forma, a posição de efeméride do objeto alvo, usada para formar as diferenças entre posições observadas e calculadas, são corrigidas individualmente da refração cromática.

4.2.1 Refração atmosférica

Uma breve apresentação sobre refração atmosférica é dada a seguir, como detalhadamente apresentada em Kovalevsky [28].

4.2.1.1 Modelo plano-paralelo

Talvez o modelo mais simples que se possa conceber para a refração atmosférica é aquele de camadas plano-paralelas, como dado pela Fig. 4.2. Embora simples, no entanto, este modelo já apresenta uma aspecto marcante da determinação da refração, como veremos a seguir.

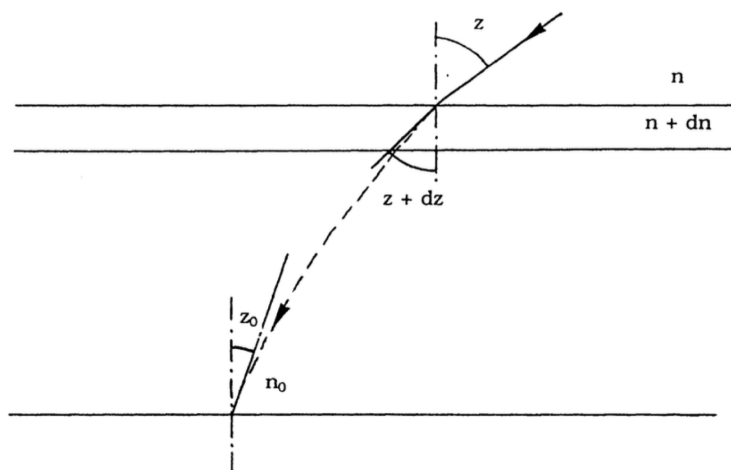


Figura 4.2: Ilustração do modelo plano-paralelo. Figura extraída de Kovalevsky [28], pg. 34.

⁶Note que a redução feita no passo 2 não necessita incluir a refração cromática porque os dados observacionais estão naturalmente afetados por ela.

Pela lei de refração de Snell, podemos escrever

$$n \sin z = (n + dn) \sin (z + dz). \quad (4.3)$$

Da mesma forma, imaginando uma fina camada de atmosfera sob aquela com índice de refração $n + dn$, também poderíamos escrever

$$(n + dn) \sin (z + dz) = (n_1 + dn) \sin (z_1 + dz), \quad (4.4)$$

onde n_1 e z_1 são, respectivamente, o índice de refração e a distância zenital associados a essa camada extra.

Imediatamente então, a partir das Eqs. 4.3 e 4.4, escrevemos

$$n \sin z = (n_1 + dn) \sin (z_1 + dz) \quad (4.5)$$

e concluímos que o produto $n \sin z$ é uma constante ao longo da trajetória do raio luminoso através da atmosfera. Assim,

$$n \sin z = n_0 \sin z_0. \quad (4.6)$$

Fora da atmosfera temos que $n = 1$ e a Eq. 4.6 se escreve simplesmente

$$\sin z = n_0 \sin z_0. \quad (4.7)$$

Se dissermos que R é o valor da refração, e tendo em conta a Fig. 4.2, os valores z e z_0 relacionam-se da seguinte forma:

$$z = R + z_0, \quad (4.8)$$

e, como consequência (Eq. 4.7)

$$\sin (R + z_0) = n_0 \sin z_0. \quad (4.9)$$

Desenvolvendo o primeiro membro da Eq. 4.9, e tomando $R \ll 1$, tem-se finalmente

$$R = (n_0 - 1) \tan z_0. \quad (4.10)$$

É importante notar, na Eq. 4.10, que tanto o índice de refração n_0 como a distância zenital z_0 são aqueles medidos no local de observação e não de fora da atmosfera.

4.2.1.2 Modelo de camadas esféricas

Um modelo mais rigoroso é obtido através da Fig. 4.3, que considera a atmosfera distribuída em camadas esféricas concêntricas.

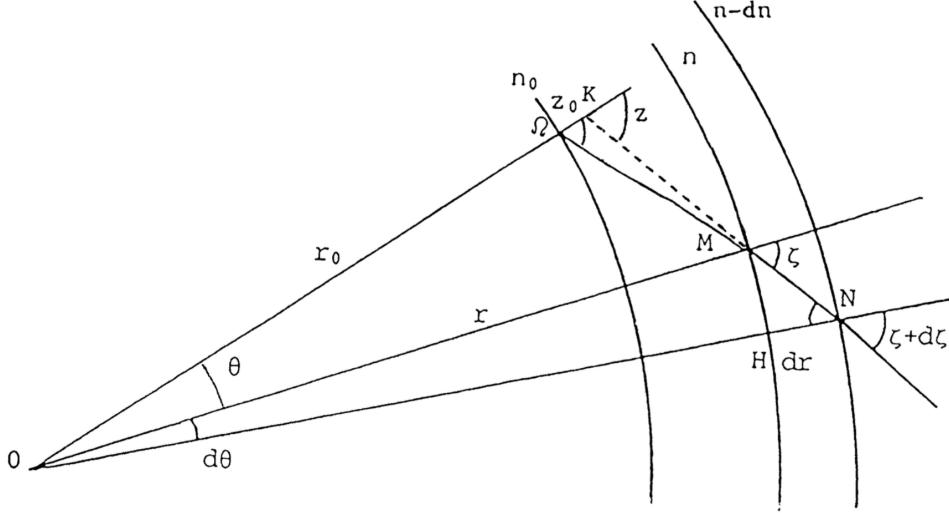


Figura 4.3: Figura extraída de Kovalevsky [28], pg. 35.

No triângulo de vértice OMN , o valor do ângulo N (oposto ao ângulo $\zeta + d\zeta$) é exatamente $\zeta - d\theta$. A lei dos senos nesse mesmo triângulo nos dá:

$$\frac{\sin(180 - \zeta)}{r + dr} = \frac{\sin(\zeta - d\theta)}{r} \quad (4.11)$$

e, portanto,

$$r \cdot \sin \zeta = (r + dr) \cdot \sin(\zeta - d\theta). \quad (4.12)$$

Usando a lei de Snell em N , obtemos

$$(n - dn) \cdot \sin(\zeta + d\zeta) = n \cdot \sin(\zeta - d\theta). \quad (4.13)$$

Substituindo o valor de $\sin(\zeta - d\theta)$ da Eq. 4.13 na Eq. 4.12, temos

$$r \cdot n \cdot \sin \zeta = (n - dn) \cdot (r + dr) \cdot \sin(\zeta + d\zeta) \quad (= n_0 \cdot r_0 \cdot \sin z_0) \quad (4.14)$$

e, com isso, temos a invariância do produto $n \cdot r \cdot \sin \zeta$, a exemplo do que vimos na seção anterior. A forma diferencial do produto invariante $n \cdot \sin \zeta \cdot dr$ (Eq. 4.14) é escrito, lembrando que o índice de refração varia com o inverso de r , como

$$n \cdot \sin \zeta \cdot dr - r \cdot \sin \zeta \cdot dn + r \cdot n \cdot \cos \zeta \cdot d\zeta = 0. \quad (4.15)$$

A Eq. 4.15 também poderia ter sido obtida desenvolvendo-se a igualdade dada pela Eq. 4.14 e conservando-se apenas os termos de primeira ordem.

Voltando à Fig. 4.3 e olhando para o triângulo OKM , vemos que na vertical do observador em Ω a distância zenital z depende do ângulo ζ através da relação $z = \theta + \zeta$ (similar ao que vimos para o ângulo N). Com isso, temos também

$$d\zeta = dz - d\theta. \quad (4.16)$$

Finalmente, a partir do triângulo MNH , temos que:

$$\tan(90 - \zeta) = \frac{dr}{r \cdot d\theta} \implies d\theta = \frac{\tan\zeta}{r} \cdot dr. \quad (4.17)$$

Substituindo-se o valor de $d\zeta$ da Eq. 4.15 por aquele obtido na Eq. 4.16 e o valor de $d\theta$ por aquele obtido na Eq. 4.17, obtemos

$$n \cdot \sin\zeta \cdot dr - r \cdot \sin\zeta \cdot dn + r \cdot n \cdot \cos\zeta \cdot \left(dz - \frac{\tan\zeta}{r} \cdot dr\right) = - \cdot \sin\zeta \cdot dn + \cdot n \cdot \cos\zeta \cdot dz = 0. \quad (4.18)$$

Assim, a Eq. 4.18 nos mostra que

$$dz = \frac{\tan\zeta}{n} dn. \quad (4.19)$$

A refração é definida pela integral de dz desde o chão até o espaço aberto e, por isso,

$$R = z - z_0 = - \int_{n_0}^1 \frac{\tan\zeta}{n} dn, \quad (4.20)$$

onde n_0 é o índice de refração no solo.

Voltando novamente à Eq. 4.15, vemos que

$$\sin\zeta = \frac{n_0 \cdot r_0 \cdot \sin z_0}{r \cdot n}. \quad (4.21)$$

Então,

$$\tan\zeta = \frac{\frac{n_0 \cdot r_0 \cdot \sin z_0}{r \cdot n}}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_0 \cdot r_0 \cdot \sin z_0}{r \cdot n}\right)^2}}. \quad (4.22)$$

Substituindo o valor de $\tan\zeta$ dado pela Eq.4.22 na Eq.4.20, obtemos finalmente

$$R = -\sin z_0 \int_{n_0}^1 \frac{1}{n \cdot \sqrt{\left(\frac{n \cdot r}{n_0 \cdot r_0}\right)^2 - \sin^2 z_0}} dn. \quad (4.23)$$

A Eq. 4.23 dá a solução exata para o cálculo da refração. A solução mais comumente utilizada, conhecida como fórmula de Laplace, vem principalmente através da lei de Gladstone-Dale⁷ e do desenvolvimento em série do termo $\left(\frac{n \cdot r}{n_0 \cdot r_0}\right)^2$. A solução final (fórmula de Laplace), então, é dada por

$$R = A \cdot \tan z_0 + B \cdot \tan^3 z_0, \quad (4.24)$$

onde as constantes A e B são função de parâmetros físicos do ar no local da observação: pressão, temperatura, e umidade. Em particular, o modelo dado pela Eq. 4.24 é aquele utilizado na rotina ATCO13 (capítulo 5) da biblioteca SOFA da qual este trabalho se serve para derivar seus resultados.

O efeito da refração atmosférica dá-se ao longo da perpendicular ao horizonte local. Assim, torna-se natural aplicá-la sobre as coordenadas horizontais aparentes do corpo, mais especificamente, sobre a altura. Assim, a redução ao dia é uma forma natural de se levar em conta a refração atmosférica.

A redução ao dia consiste num conjunto de transformações para passarmos de coordenadas

⁷Para pequenas densidades, o índice de refração é proporcional à densidade do gás.

equatoriais médias com origem no baricentro do sistema solar, e associadas a uma data t_0 , para coordenadas aparentes⁸. Daí, então, passamos para coordenadas observadas com a consideração ao efeito de refração.

Os procedimentos para redução ao dia são bem determinados e sua descrição está fora do escopo deste trabalho. Em particular, o SOFA⁹, que aqui utilizamos, possui o estado de arte das rotinas necessárias para executarmos as transformações necessárias.

4.2.2 Movimento próprio

Movimento próprio pode ser definido como sendo a taxa de variação instantânea da direção de uma estrela para uma época fixa, direção essa dada com relação ao baricentro do sistema solar.

Comumente, a seguinte formulação é utilizada para relacionar posições em datas diferentes num mesmo referencial:

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \mu_\alpha \cdot (T_1 - T_0) \quad (4.25)$$

$$\delta_1 = \delta_0 + \mu_\delta \cdot (T_1 - T_0) \quad (4.26)$$

As equações acima são aproximações em primeira ordem e, embora sua inegável e larga utilidade, não representam o movimento de um corpo livre. Além disso, afastam-se da realidade conforme nos aproximamos dos polos celestes ou se tomarmos intervalos de tempo muito longos. Assim, e tendo em conta a precisão com a qual parâmetros astrométricos serão fornecidos pela missão Gaia, é interessante conservarmos a melhor precisão das estrelas nas datas em que realizamos as observações. Isto, pelo menos, faz com que eliminemos uma fonte de erros (o catálogo de referência) quando temos de revisitar os resultados de uma redução de imagem. Desta forma, e por sua simplicidade, vale a pena tomarmos o modelo mais rigoroso.

Seja \vec{P}_0 a posição de uma estrela, dada por

$$\vec{P}_0 = d \cdot \vec{e}_0, \quad (4.27)$$

onde d é a distância da estrela com relação à origem e \vec{e}_0 é

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha_0 \cos\delta_0 \\ \sin\alpha_0 \cos\delta_0 \\ \sin\delta_0 \end{pmatrix}. \quad (4.28)$$

Com estas definições, podemos escrever o vetor velocidade do objeto:

$$\dot{\vec{P}} = \dot{d} \cdot \vec{e} + d \cdot \left(\dot{\alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \vec{e} + \dot{\delta} \frac{\partial}{\partial \delta} \vec{e} \right), \quad (4.29)$$

onde $\dot{\alpha}$ e $\dot{\delta}$ são escritos, respectivamente, como μ_α e μ_δ . Com frequência, esses valores são os

⁸A inclusão ou não da refração atmosférica no procedimento de redução ao dia não é universal. Isto ocorre porquê a aplicação da redução requer medição de parâmetros atmosféricos locais.

⁹<http://www.iausofa.org/>

chamados movimentos próprios.

Formalmente, então, o transporte de uma estrela de uma data a outra, num mesmo referencial, é dado por:

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_0 + \dot{\vec{P}}\Delta T. \quad (4.30)$$

Este, no entanto, não é o formato mais conhecido para a equação. Para facilitar seu uso, leva-se em conta as unidades nas quais são fornecidos os parâmetros astrométricos bem como o tempo, a saber:

- $\mu_{\alpha,\delta}$: milésimos de segundo de arco (*mas*) por ano.
- π (paralaxe): milésimos de segundo de arco (*mas*).
- ΔT : ano.
- V_R (velocidade radial, \dot{d}): km/s.

Tendo isto em conta, reescrevemos a Eq.4.30 como:

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_0 + d \cdot \left(\frac{\dot{d}}{d} \cdot \vec{e} + \dot{\alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \vec{e} + \dot{\delta} \frac{\partial}{\partial \delta} \vec{e} \right) \cdot \Delta T. \quad (4.31)$$

Na Eq. 4.31, podemos escrever

$$\frac{1}{d} = \frac{\pi}{A}, \quad (4.32)$$

onde A é o valor da unidade astronômica (1 495 978.701 km), de forma que:

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_0 + d \cdot \left(\frac{\dot{d}}{A} \cdot \pi \cdot \vec{e} + \dot{\alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \vec{e} + \dot{\delta} \frac{\partial}{\partial \delta} \vec{e} \right) \cdot \Delta T. \quad (4.33)$$

Para utilizarmos ângulos em *mas*, necessitamos transformá-los em radianos. O fator f de conversão é dado por $4.8481368111 \times 10^{-9}$. Ainda, como convencionou-se apresentar o tempo em anos de 365.25 dias (ano Juliano) e a velocidade radial é dada em $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, também multiplicamos essa velocidade por 31 593 759.75 (números de segundos num ano Juliano). Assim, a Eq. 4.33 é reescrita como

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_0 + f \cdot d \cdot \left(K \cdot V_R \cdot \pi \cdot \vec{e} + \mu_{\alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \vec{e} + \mu_{\delta} \frac{\partial}{\partial \delta} \vec{e} \right) \cdot \Delta T, \quad (4.34)$$

onde $K = 21.119124042$. Este é um formato mais conhecido para o modelo de movimento estelar.

Vale lembrar, também, que variações em ascensão reta são frequentemente acompanhadas do termo $\cos\delta$. Em particular, isto também se verifica na Eq. 4.34. De fato, o termo $\cos\delta$ está contido em $\frac{\partial}{\partial \alpha} \vec{e}$.

Explicitando os valores das derivadas parciais, temos:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \vec{e} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \cos \delta \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial \delta} \vec{e} = \begin{pmatrix} -\cos \alpha \sin \delta \\ -\sin \alpha \sin \delta \\ \cos \delta \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

Com isto, a Eq. 4.34 reescreve-se

$$\vec{P}_1 = \vec{P}_0 + f \cdot d_0 \cdot \left[K \cdot V_R \cdot \pi_0 \cdot \vec{e}_0 + \mu_{\alpha_0} \cos \delta_0 \begin{pmatrix} -\sin \alpha_0 \\ \cos \alpha_0 \\ 0 \end{pmatrix} + \mu_{\delta_0} \begin{pmatrix} -\cos \alpha_0 \sin \delta_0 \\ -\sin \alpha_0 \sin \delta_0 \\ \cos \delta_0 \end{pmatrix} \right] \cdot \Delta T. \quad (4.37)$$

Vale destacar que é comum a notação μ_{α^*} para expressar $\mu_{\alpha} \cos \delta$ ¹⁰. Valores com índice 0 deixam claro quais os dados oriundos diretamente do catálogo de referência.

Ambas as parcelas da soma no segundo membro da Eq. 4.37 possuem em comum a distância d_0 . Sua influência se dá ao longo da linha de visada e, por isso, não altera a direção do objeto sobre a esfera celeste. Por isso, caso estejamos interessados apenas nas coordenadas equatoriais da estrela, a Eq. 4.37 pode ser dada como

$$\vec{P}_1 = \vec{e}_0 + f \cdot \left[K \cdot V_R \cdot \pi_0 \cdot \vec{e}_0 + \mu_{\alpha_0} \cos \delta_0 \begin{pmatrix} -\sin \alpha_0 \\ \cos \alpha_0 \\ 0 \end{pmatrix} + \mu_{\delta_0} \begin{pmatrix} -\cos \alpha_0 \sin \delta_0 \\ -\sin \alpha_0 \sin \delta_0 \\ \cos \delta_0 \end{pmatrix} \right] \cdot \Delta T. \quad (4.38)$$

A posição estelar, dada pela Eq. 4.38, é ainda dada com respeito ao baricentro do sistema solar e referida ao equador e equinócio de origem (frequentemente, equador e equinócio médios J2000), mas devidamente transportada para a data determinada pelo usuário através do valor ΔT . Um passo final, então, diz respeito a escrever essa posição com respeito ao geocentro. A Fig. 4.4 ilustra, de maneira simples, como obter a posição geocêntrica.

¹⁰ $\mu_{\alpha} \cos \delta$ e μ_{δ} são as componentes do movimento próprio que medem a taxa instantânea da variação da direção baricêntrica da estrela.

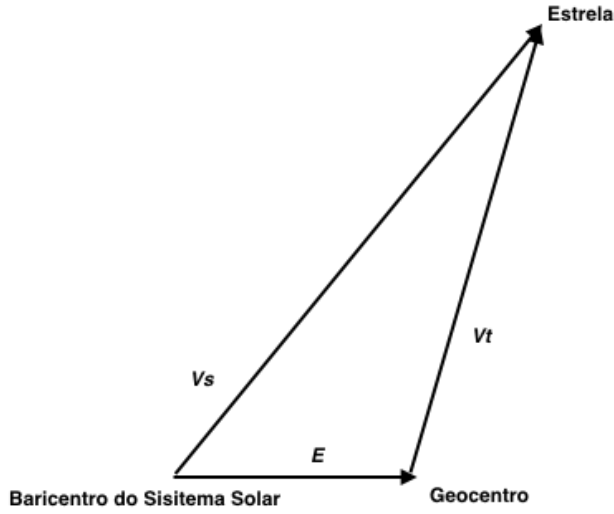


Figura 4.4: Efeito de paralaxe. Identificam-se os vetores posição baricêntrico e geocêntrico da estrela bem como a posição baricêntrica do geocentro.

A representação vetorial dessa posição é

$$\vec{V}_t = \vec{V}_s - \vec{E}, \quad (4.39)$$

onde

$$\vec{V}_s = d_s \begin{pmatrix} \sin\alpha_s \cos\delta_s \\ \cos\alpha_s \cos\delta_s \\ \sin\delta_s \end{pmatrix} \text{ e } \vec{V}_t = d_t \begin{pmatrix} \sin\alpha_t \cos\delta_t \\ \cos\alpha_t \cos\delta_t \\ \sin\delta_t \end{pmatrix}, \quad (4.40)$$

sendo distâncias dadas por d e os índices s e t indicam, respectivamente, coordenadas baricêntricas e geocêntricas. Os valores baricêntricos são fornecidos pelo catálogo de referência ou, mais precisamente, dados através da Eq. 4.38. O vetor \vec{E} pode ser obtido a partir de efemérides planetárias. \vec{V}_t é o vetor que se quer determinar.

A partir da Eq. 4.39, vemos então que temos um conjunto de três equações e três incógnitas: α_s , δ_s , e d_s . Podemos também admitir que $d_s \sim d_t$ e escrevermos diretamente

$$\vec{V}_t = \vec{V}_s - \pi \cdot \vec{E}. \quad (4.41)$$

O vetor \vec{V}_t da Eq. 4.41 é posteriormente corrigido por efeitos de deflexão da luz, aberrações, mudanças nos planos de referência (nutation, precessão, *frame bias*), e refração atmosférica.

Para corpos do sistema solar, o ponto de partida passa a ser a posição astrométrica topocêntrica desse corpo. Tal posição, associada a um ponto específico da superfície da Terra e à data da observação, é referida ao equinócio e equador médio J2000 e é também corrigida pelo tempo de luz.

Capítulo 5

Comprimento de onda médio e espectros

O primeiro passo no preparo do código almejado por este trabalho foi buscar no *Standards of Fundamental Astronomy* (SOFA) uma rotina que permitisse fazer uma redução ao dia de forma rigorosa. O SOFA é um serviço da UAI com a tarefa de estabelecer e manter um conjunto acessível e preciso de algoritmos e procedimentos que implementa modelos padrão utilizados em astronomia fundamental. A rotina utilizada chama-se ATCO13 (transforma uma posição dada com relação ao ICRF em uma posição observada).

Um dos vários parâmetros da rotina mencionada acima é o comprimento de onda associado aos objetos implicados na redução. A pergunta a ser feita, então, é: qual comprimento de onda a ser utilizado? Uma resposta a esta pergunta pode ser o comprimento de onda médio (λ_m), que é dado pela fórmula [28]:

$$\lambda_m = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda T(\lambda) I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) I(\lambda) d\lambda} \quad (5.1)$$

onde $T(\lambda)$ é a transmissão do sistema instrumental (filtro, CCD, lentes) limitado por λ_1 e λ_2 e $I(\lambda)$ é a distribuição de intensidade como função do comprimento de onda ao longo do espectro da estrela.

As informações para determinação de $T(\lambda)$ podem ser obtidas junto ao próprio observatório, enquanto que $I(\lambda)$ pode ser obtido através de um banco de espectros. O banco que utilizamos neste trabalho é aquele de Pickles 1998 (Pickles [41]). Esse banco será substituído por bancos mais recentes (por exemplo, http://perso.obs.u-bordeaux1.fr/CSoubiran/elodie_library.html)

A determinação do valor de λ_m , obviamente, precede o uso da rotina ATCO13 e é um ponto central neste trabalho.

O valor oriundo da Eq. 5.1 é calculado com o auxílio de rotinas presentes no *Numerical Recipes in Fortran* (Press et al. [43]). Para tal, fazemos uso das subrotinas *qtrap* e *trapzd* que resolvem esta integração por meio do método do trapézio. Perfis de transmissão de vários filtros foram fornecidos pelo Observatório do Pico dos Dias¹. Curvas de resposta para os detectores IKON e IXON² foram

¹Dados enviados por Saulo Gargaglioni.

²Fabricante: Andor. Modelos IKON disponíveis no OPD: L936-BV, L936-EV, L936-RR-DD. Modelo

obtidos através de contacto via email com o fabricante³. A curva de resposta do CCD105 foi obtida no próprio sítio do OPD⁴. Vale notar que, neste trabalho, apenas observações realizadas com os detectores iKon e 105 foram utilizadas, bem como os filtros Bessel R e $I^{\bar{5}}$.

5.1 Determinação do espectro estelar

Nessa tarefa, nos servimos primeiramente das magnitudes J , H , e K_s como dadas pelo 2MASS [46] e que estão devidamente associadas às posições das estrelas de referência (Gaia DR1). No entanto, sobretudo para regiões próximas ao plano da Galáxia, é importante que tais cores sejam corrigidas pelo efeito de extinção interestelar ("desavermelhar" as magnitudes). É fundamental para essa correção a paralaxe de cada objeto, parâmetro que ainda não possuímos (estarão disponíveis a partir de abril de 2018, com o Gaia DR2). Por isso, para que o trabalho pudesse ter seus resultados minimamente avaliados, assumimos uma distância de 0.5 Kpc para todas as estrelas, a exemplo do que foi feito em Zacharias et al. [54].

Em posse de distâncias e das coordenadas equatoriais do objeto, extinções podem ser calculadas. Uma descrição detalhada do mapa de extinção que aqui utilizamos é dado em Green et al. [22]. Servimo-nos de ferramentas python disponíveis em <http://argonaut.skymaps.info/usage> para incorporarmos o uso desse mapa em nosso código.

Esse código python retorna, para bins de módulo de distância, coeficientes $E(B-V)$ (veja Fig. 5.1). A conversão desses valores para extinção em vários filtros foi feita através da tabela 6 de Schlafly and Finkbeiner [44] (veja 5.2).

```
# Use coefficients in Table 6 of Schlafly & Finkbeiner (2011) to convert to
# extinction in various bands (note that A_B - A_V != 1 for E(B-V) = 1; E(B-V)
# is strictly a parameter name here).
```

SampleNo	DistanceModulus													
	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50
BestFit	0.003	0.004	0.011	0.012	0.016	0.018	0.220	0.232	0.247	0.254	0.287	0.340	0.389	0.421
0	0.001	0.001	0.002	0.056	0.057	0.058	0.065	0.231	0.232	0.238	0.258	0.291	0.321	0.321
1	0.005	0.009	0.011	0.014	0.020	0.036	0.038	0.131	0.137	0.236	0.253	0.276	0.334	0.343
2	0.005	0.005	0.009	0.009	0.009	0.010	0.015	0.256	0.263	0.263	0.264	0.283	0.286	0.292
3	0.000	0.000	0.035	0.035	0.038	0.038	0.195	0.196	0.198	0.250	0.252	0.284	0.311	0.311

Figura 5.1: Destacados entre linhas vermelhas, estão os coeficientes de extinção retornados pelo código python. Circulado, está o valor associado a uma distância de 500 pc.

IXON disponível no OPD: DU-888E-C00-#BV

³Ticket #: 687-01-000085.

⁴http://www.lna.br/opd/instrum/ccd/qefull_105_160.html.

⁵Fabricante: Optec.

Table 6
F99 Reddening in Different Bandpasses

Bandpass	λ_{eff}	R_V			
		2.1	3.1	4.1	5.1
Landolt <i>U</i>	3508.2	5.614	4.334	3.773	3.460
Landolt <i>B</i>	4329.0	4.355	3.626	3.290	3.096
Landolt <i>V</i>	5421.7	2.953	2.742	2.645	2.589
Landolt <i>R</i>	6427.8	2.124	2.169	2.189	2.201
Landolt <i>I</i>	8048.4	1.410	1.505	1.548	1.573
CTIO <i>U</i>	3733.9	5.170	4.107	3.628	3.355
CTIO <i>B</i>	4308.9	4.382	3.641	3.300	3.104
CTIO <i>V</i>	5516.6	2.857	2.682	2.600	2.553
CTIO <i>R</i>	6520.2	2.055	2.119	2.149	2.166
CTIO <i>I</i>	8006.9	1.420	1.516	1.561	1.587
UKIRT <i>J</i>	12482.9	0.764	0.709	0.684	0.669
UKIRT <i>H</i>	16588.4	0.502	0.449	0.425	0.411
UKIRT <i>K</i>	21897.7	0.331	0.302	0.288	0.280

Figura 5.2: Tabela 6 de Schlafly and Finkbeiner [44]. Destacada entre linhas vermelhas, encontra-se a coluna de valores que devem ser utilizadas em combinação com os resultados exemplificados na Fig. 5.1. Circulado, está o valor a ser multiplicado por 0.254 para calcularmos então a extinção a 500 pc no filtro *J*.

Com as magnitudes *J*, *H*, e *K_s* corrigidas pela extinção (*J*₀, *H*₀, e *K_{s0}*), determinamos os índices (*J* − *H*)₀, (*H* − *K_s*)₀. Estes últimos, finalmente, são associados aos tipos espectrais. Esta associação é feita através da tabela *synphot.dat*, um arquivo texto que é parte do banco de espectros estelares de Pickles [41] e que associa índices de cor a tipo espectral. Basicamente, o que fazemos é medir a distância entre os valores de (*J* − *H*)₀, (*H* − *K_s*)₀ determinados e aqueles em Pickles [41], retendo o tipo espectral associado à menor distância.

Assim, identificado um tipo espectral, é necessário agora avermelhá-lo pela extinção interestelar. Esta operação irá "deformar" o espectro original da estrela e essa deformação é obviamente mais acentuada em regiões próximas ao plano da Galáxia. O código utilizado para isto é aquele descrito em Calzetti et al. [9]. Vale notar que esse código foi produzido para o estudo de galáxias com formação estelar. Entretanto, como será discutido mais à frente, os resultados obtidos até o momento têm sido satisfatórios. A Fig. 5.3 mostra dois espectros (G2V e M2V) após avermelhamento com os respectivos comprimentos de onda (pequenas barras verticais sobre o eixo *x*) pré- e pós-avermelhamento interestelar.

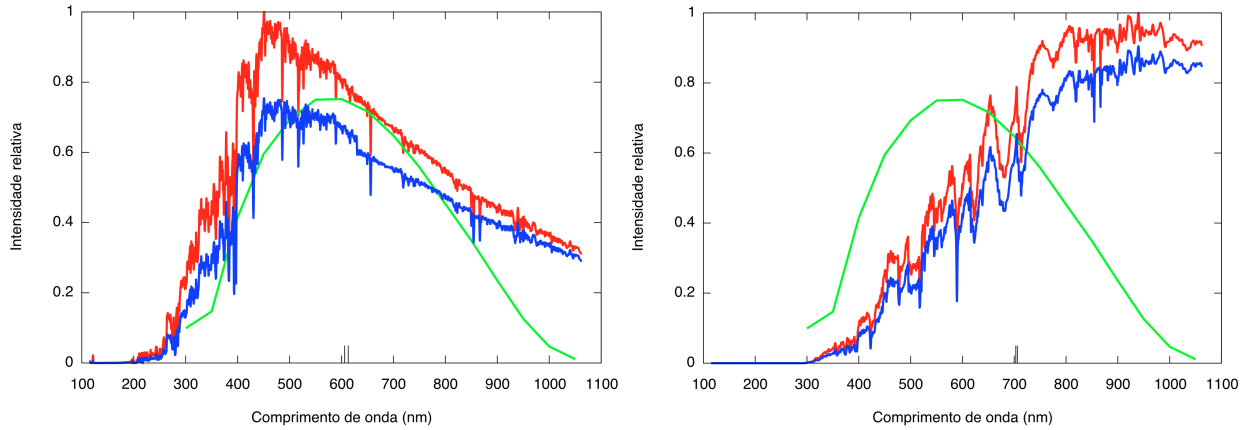


Figura 5.3: Em vermelho: espectro de uma estrela G2V (painel esquerdo) e M2V (painel direito). Em azul, os respectivos espectros avermelhados segundo Calzetti et al. [9]. Em verde, a eficiência quântica para o CCD 105 do OPD. As pequenas barras verticais sobre o eixo x indicam os valores de (λ_m) antes e depois do avermelhamento, respectivamente. Painel esquerdo: 606 nm e 613 nm. Painel direito: 703 nm e 706 nm. A distância assumida para a estrela é 500 pc. As coordenadas de apontamento são $\alpha = 269^\circ$ e $\delta = -16.5^\circ$ ($l = 12^\circ$ e $b = 4.3^\circ$).

5.2 Espectro dos alvos: TNOs e Centauros

Além dos espectros estelares, são necessários também espectros dos objetos alvo, os TNOs e os Centauros. Não conhecemos um banco de dados como, por exemplo, aquele estelar que utilizamos no presente trabalho. Até o momento, a escolha desses espectros não se faz de forma automática e é baseada nas informações contidas em Lazzarin et al. [31], Alvarez-Candal et al. [2], Fornasier et al. [17], Alvarez-Candal et al. [3], Lorenzi et al. [33], e Lorenzi et al. [34].

Nossas observações visando astrometria de corpos do sistema solar são frequentemente realizadas no intervalo de 550nm a 1000nm. Nesse intervalo, de maneira geral e em comparação ao espectro solar, nota-se um comportamento neutro ou crescente do espectro desses corpos como função do comprimento de onda (veja exemplos nas Figs. 5.4 e 5.5).

Note que, no presente estudo, não podemos usar esses espectros diretamente pois eles são dados com relação ao espectro do Sol (ou de análogas solares) e, portanto, não são aqueles efetivamente observados. No entanto, estes poucos exemplos nos indicam que uma tendência a ser seguida é dada pela escolha de espectros estelares a partir de G2V para TNOs e Centauros, caminhando para aqueles mais avermelhados. Ainda, na maioria dos casos, parece razoável podermos aproximar esses espectros dados com relação ao Sol por retas com diferentes inclinações, facilitando o estudo. Por outro lado, tal abordagem faz com que sejam desconsiderados intervalos onde há absorção e que poderiam alterar o valor do comprimento de onda médio.

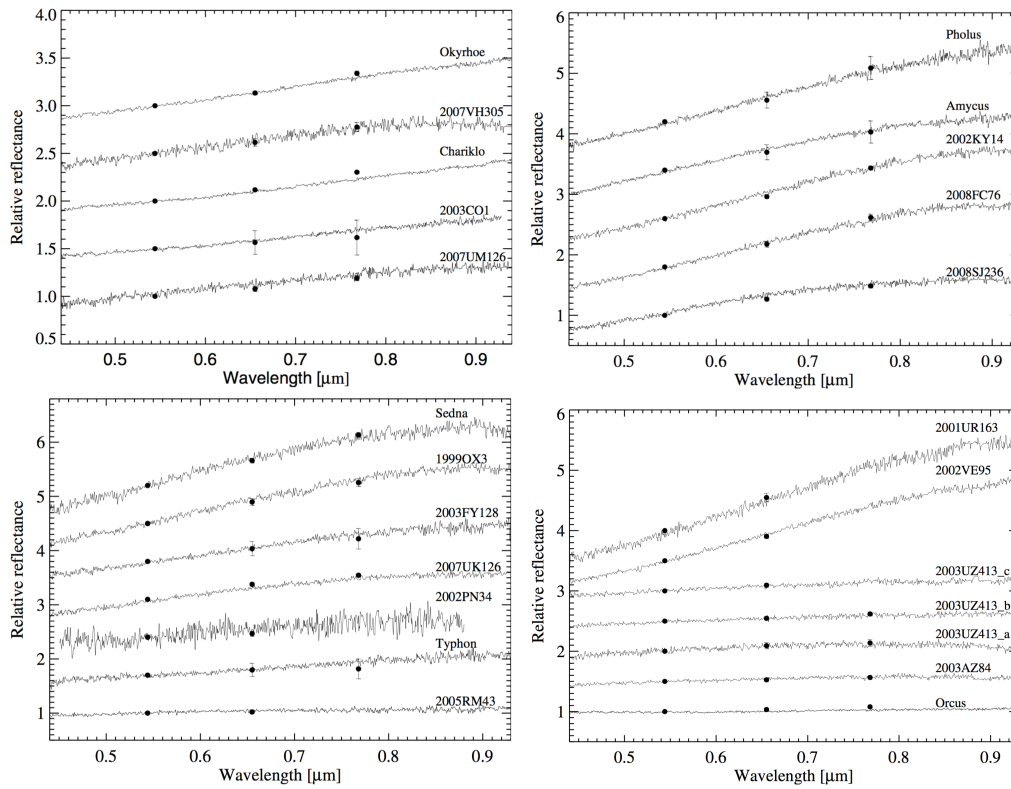


Figura 5.4: Espectros de reflectância relativa para TNOs e Centauros. Esses espectros foram deslocados ao longo dos eixos das ordenadas por valores entre 0.5 e 0.8 para melhor clareza visual. Créditos: Fornasier et al. [17].

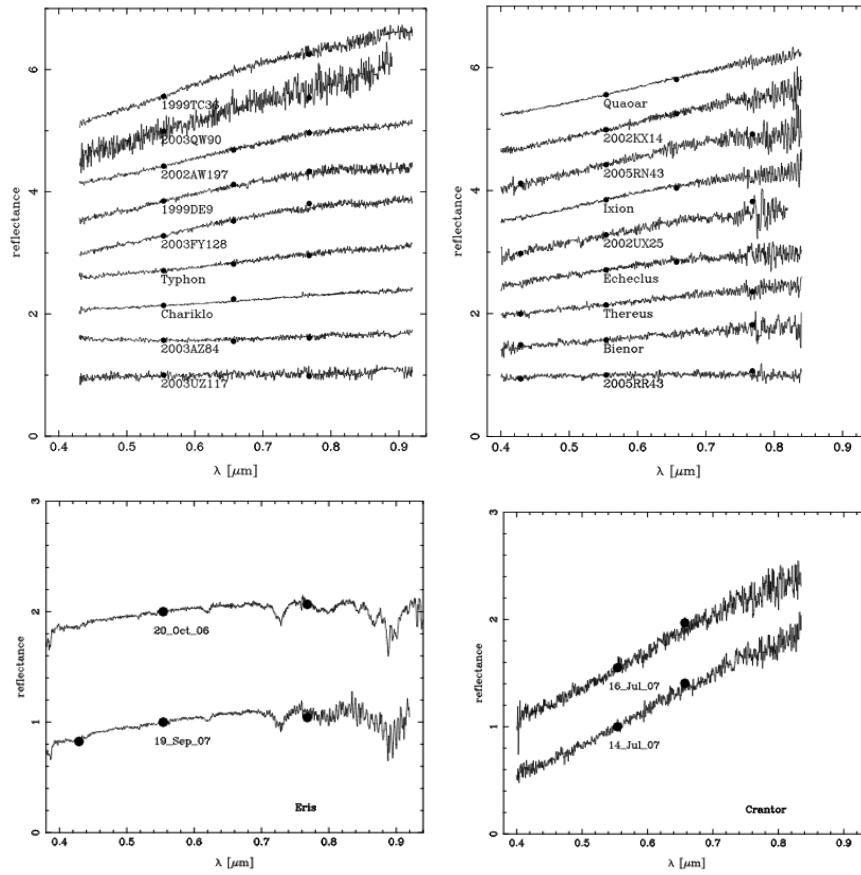


Figura 5.5: Espectros de refletância relativa para TNOs e Centauros em comprimentos de onda no visível. Esses espectros foram deslocados ao longo dos eixos das ordenadas por valores entre 0.57 e 1.0 para melhor clareza visual. Créditos: Alvarez-Candal et al. [2].

Capítulo 6

Análise e resultados

Escolhemos observações obtidas para a astrometria de 3 corpos – Plutão, Haumea, e Chariklo – para testarmos o código desenvolvido. O resultado mais contundente, devido às características da própria observação (imagens tomadas ao longo de várias horas e ausência de filtros), veio do tratamento de imagens de Plutão. Esses resultados apontam a boa direção tomada para considerarmos o efeito da refração cromática.

Sobre o catálogo de referência utilizado, o Gaia DR1, consideramos apenas as estrelas nele contidas que possuam contrapartida no 2MASS. Com isto, podemos sempre dispor de magnitudes J , H , K_s para a determinação do tipo espectral. O arquivo com a intersecção entre Gaia DR1 e 2MASS pode ser encontrado no *Gaia Archive*¹ e nos foram passados por R. Leiva (Observatório de Paris). Posteriormente, esse arquivo foi ingerido pelo banco de dados do Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIneA).

O conhecimento da temperatura, pressão e umidade é necessário para a correção da refração cromática. Tais informações não foram recuperadas para as observações aqui utilizadas e, por isso, os seguintes valores foram adotados em todos os casos: pressão=1010 Pa, temperatura=15 °C, e umidade=75%.

6.1 Testes realizados com as observações de Plutão

Para realizarmos os testes com o código, utilizamos resultados oriundos de observações de Plutão apresentadas em Benedetti-Rossi et al. [6], para uma primeira e simples abordagem. As respectivas imagens foram obtidas no Observatório do Pico dos Dias - OPD. A Tabela 6.1 apresenta informações sobre essas observações. O perfil do CCD utilizado (CCD 105) pode ser visto na Fig. 5.3 (curvas em cor verde).

Essas imagens fazem parte de um programa de observações de corpos do sistema solar levado a cabo há vários anos, incluindo também satélites naturais dos planetas gigantes e pequenos corpos distantes (TNOs e Centauros).

Tendo em conta que Plutão passava por uma região do céu que tem por fundo o plano da Galáxia, o efeito da refração cromática fica bastante evidente. De fato, a cor predominante das estrelas de referência é mais vermelha que a de Plutão. Com isto, em diferentes massas de ar, a

¹<https://gea.esac.esa.int/archive/>

Tabela 6.1: Plutão: informações sobre as observações

Data	Telescópio	Ângulo horário (início/fim)	Detector	Filtro
18/ABR/2007	Boller&Chivens (0.60m)	-2.5hs - +1.1h	CCD 105	-

Dados observacionais para Plutão.

distância relativa entre essas estrelas e Plutão não é mantida, visto que haverá uma componente diferencial atuando na refração. As Figs. 6.1 e 6.2 ilustram essa situação.

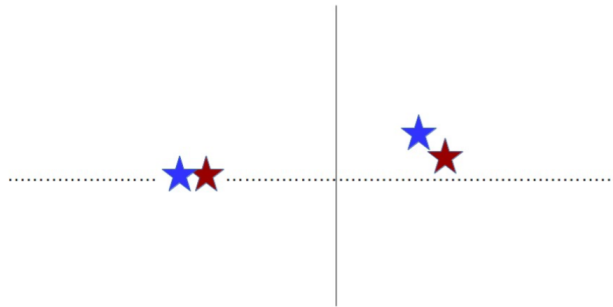


Figura 6.1: Visualização do efeito da refração cromática. A linha horizontal representa uma paralela ao horizonte do observador. A linha vertical representa uma perpendicular a esse horizonte.

Na Fig. 6.1 vemos, à esquerda, dois objetos cujas coordenadas celestes os colocam à mesma altura para um dado observador na ausência de atmosfera, sendo o objeto da esquerda mais azulado que o da direita. À direita, temos situação idêntica à anterior, mas agora há a presença de atmosfera.

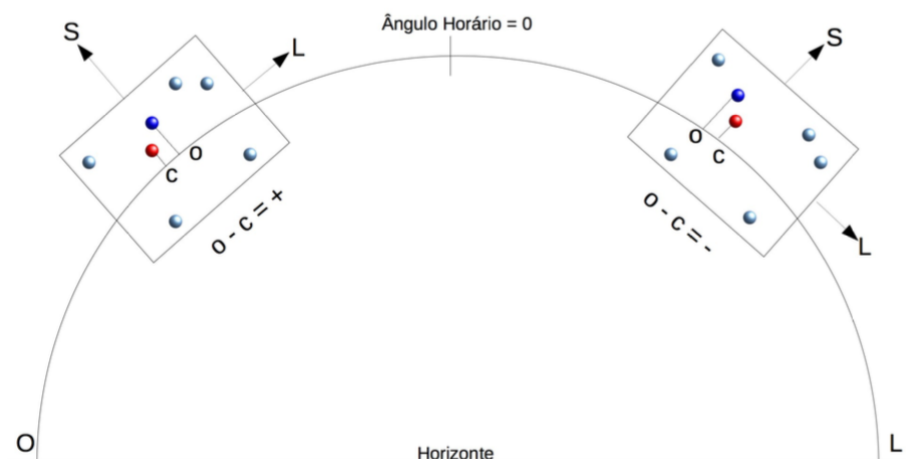


Figura 6.2: Visualização do efeito da refração cromática diferencial sobre a ascensão reta de Plutão, ilustrando os resultados apresentados em Benedetti-Rossi et al. [6].

Na Fig. 6.2 temos, em ambos os retângulos (CCDs), estrelas de referência apresentadas em

azul claro. O ponto vermelho representa a posição de Plutão caso ele possuísse a mesma cor das estrelas de referência. Como essas estrelas são, na verdade, mais avermelhadas que Plutão (pois estão próximas ao plano da Galáxia), a posição observada deste último desloca-se em relação à média das posições observadas das estrelas de referência como função da massa de ar. Sabendo que a ascensão reta cresce para o leste, podemos então determinar o sinal da diferença entre posição (O)bservada e (C)alculada (aquela oriunda das efemérides e, idealmente, livre dos efeitos de refração). Assim, espera-se obter neste exemplo, a partir das observações, valores para (O-C) negativos para ângulos horários negativos (antes de se passar pelo meridiano) e valores de (O-C) positivos para ângulos horários positivos. Comparemos essa ilustração com os resultados de Benedetti-Rossi et al. [6] (Fig. 6.3).

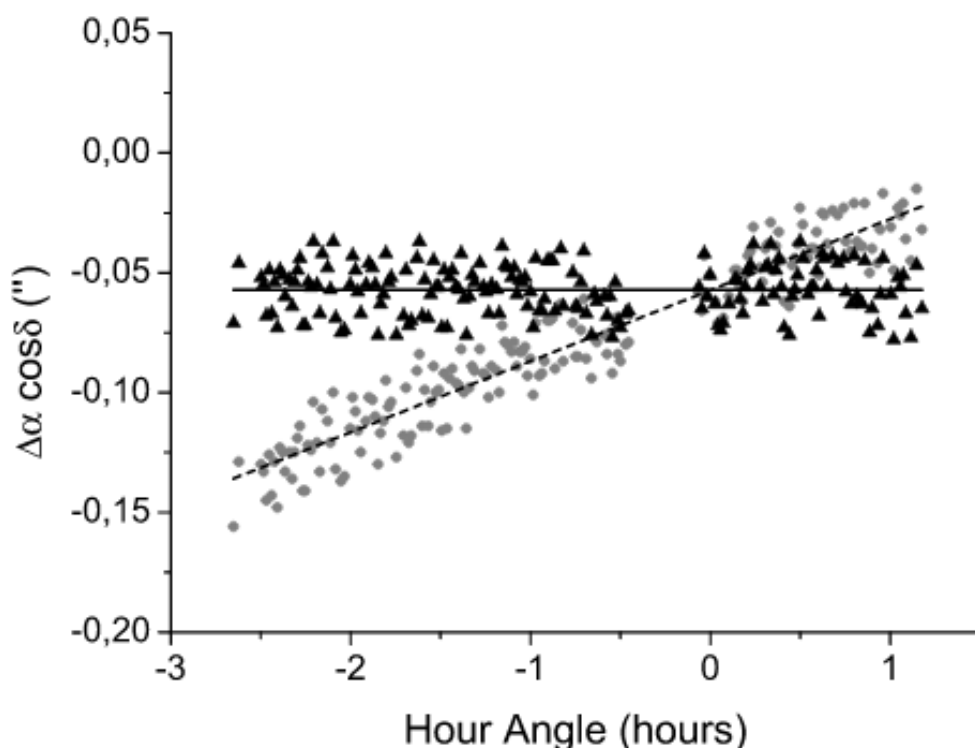


Figura 6.3: Efeito da refração cromática diferencial em ascensão reta. Pontos (cinza): diferenças (O-C) oriundas diretamente das observações. Triângulos (preto): correção desse efeito de refração como determinado por Benedetti-Rossi et al. [6].

Na Fig. 6.3, os círculos são obtidos pela comparação das ascensões retas observadas e a efeméride planetária do JPL DE421². O catálogo de referência utilizado foi o UCAC4.

²Vale notar que, com a DE421, ou outra DE, não se obtém diretamente a posição de Plutão mas sim a posição do baricentro do sistema de Plutão. Uma segunda efeméride é então necessária para se relacionar as posições de Plutão e de seus satélites em relação a esse baricentro. Em Benedetti-Rossi et al. [6], essa efeméride é a plu021. No entanto, o movimento de Plutão e seus satélites ao redor do baricentro de seu sistema é melhor conhecido que a posição desse baricentro com relação ao baricentro do sistema solar. Desta forma, a maior incerteza fica por conta da efeméride planetária utilizada.

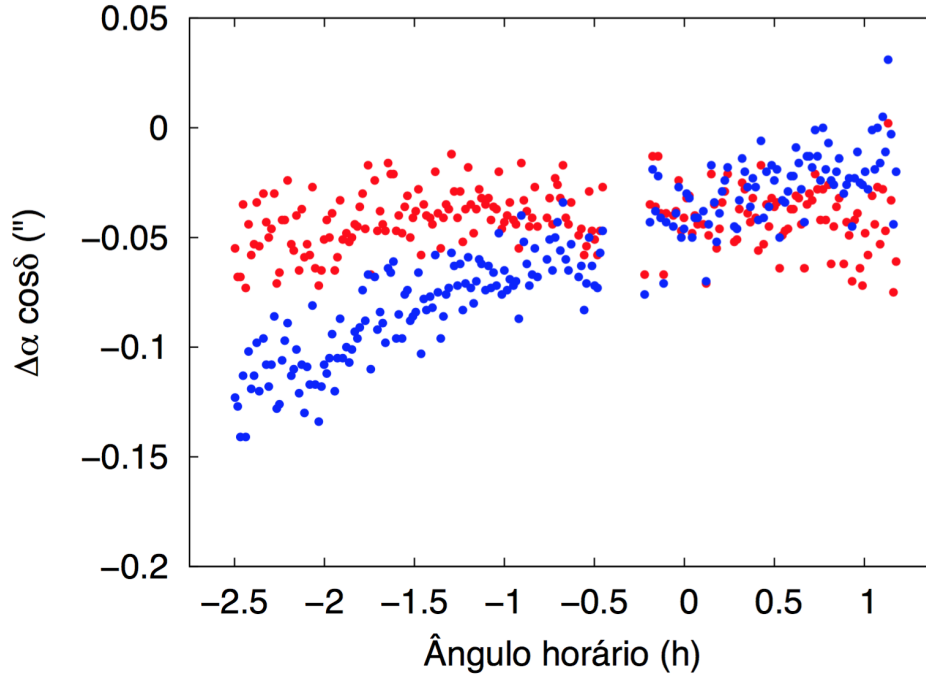


Figura 6.4: Correção da refração cromática (pontos vermelhos) a partir dos resultados deste trabalho. Em azul, valores de (O-C) para a ascensão reta de Plutão sem se considerar efeitos de refração.

A Fig. 6.4 mostra resultados oriundos deste trabalho, obtidos de 217 medidas. Os pontos em azul são como os triângulos da Fig. 6.3. Os pontos vermelhos já são corrigidos pela refração diferencial cromática. É importante notar que, enquanto Benedetti-Rossi et al. [6] corrige o efeito de refração **posteriormente** à astrometria sobre as imagens, a correção apresentada por este trabalho é diretamente oriunda da astrometria das imagens. Isto é, a projeção gnomônica das estrelas de referência já contempla a refração cromática em acordo com os procedimentos descritos no capítulo anterior. Igualmente, a posição observada foi comparada a uma posição calculada que também passou pela correção à refração cromática.

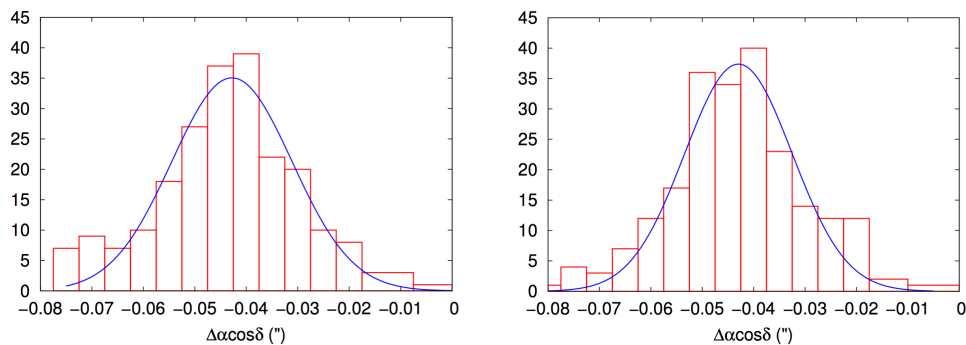


Figura 6.5: Painel esquerdo: histograma dos resíduos dados pelos pontos vermelhos da Fig. 6.4. Painel direito: histograma dos resíduos dados pelos pontos azuis da mesma figura, após correção da inclinação. Em ambos os histogramas, a gaussiana ajustada é mostrada. Os tamanho dos *bins* é de 5 *mas*.

A Fig. 6.5 mostra o comportamento das diferenças entre observação e efeméride oriundas da correção pela refração cromática segundo este trabalho (pontos vermelhos da Fig. 6.4) e aquelas para as quais aplica-se, *a posteriori*, a mesma correção utilizada em Benedetti-Rossi et al. [6] (correção aplicada sobre os pontos azuis da Fig. 6.4). A correção adotada em Benedetti-Rossi et al. [6] vem da teoria clássica de refração (Stone [47]), que apresenta dois termos: o primeiro é função da posição do objeto observado e da latitude do observador, enquanto que o segundo tem em conta condições atmosféricas e o comprimento de onda do alvo e das estrelas de referência. Benedetti-Rossi et al. [6] serve-se apenas do primeiro termo dessa correção, dado pela Eq. 6.1:

$$V_{\alpha}(\phi, \delta, H) = \frac{\sec^2 \delta \cdot \sin H}{\tan \delta \cdot \tan \phi + \cos H}, \quad (6.1)$$

onde ϕ é a latitude do observador e δ , H são a declinação o ângulo horário do alvo, respectivamente. Ainda, na Fig. 6.5, os valores de σ das gaussianas ajustadas são 12 *mas* (painel esquerdo) e 10 *mas* (painel direito). Tal diferença é pequena o suficiente para afirmarmos que os resultados aqui obtidos para Plutão são equivalentes àqueles dados por Benedetti-Rossi et al. [6]. Ou seja, poderíamos efetuar a correção à refração cromática sem a necessidade de se ter as observações espalhadas ao longo de várias horas.

Vale lembrar que o código que preparamos ainda não está incorporado no pacote PRAIA³. Assim, acrescentando-se detalhes ao que descrevemos no capítulo 4, seu uso se dá de acordo com as etapas enumeradas a seguir:

1. Redução usual da imagem, de forma a se detectar objetos, seus respectivos centroides, e suas respectivas coordenadas equatoriais.
2. Criação de um catálogo de referência, na região amostrada pela imagem, a partir do Gaia DR1. Por conveniência, utilizamos apenas estrelas Gaia em comum com o 2MASS [19]⁴ pela comodidade em ter-se magnitudes J , H , K_s , a partir das quais o tipo espectral da estrela é identificado.
3. Redução ao dia das posições das estrelas de referência, levando em conta a refração cromática como descrito anteriormente.
4. Redução ao dia da posição do alvo. Obviamente, não é considerada a extinção interestelar, e seu espectro é tomado da literatura. Em último caso, adota-se o espectro solar.
5. Toma-se os dados gerados no primeiro passo e repete-se a redução com o catálogo de referência oriundo do terceiro passo.

Vale notar que, apesar de termos corrigido o efeito global da refração nessas observações de Plutão, ou seja, o comportamento não constante dos valores de (O-C) como função do ângulo horário, seria também de se esperar que a dispersão desses pontos diminuísse. Isto ainda não acontece tanto pela ausência de movimentos próprios como também pela ausência de distâncias.

Outro ponto de interesse é notar que os pontos vermelhos na Fig. 6.4 mostram um valor de $\Delta \alpha \cos \delta = -42$ *mas* (± 14 *mas*), claramente diferente do valor estimado a partir da Fig. 6.3

³Essa etapa precisa ser feita, imprescindivelmente, com a colaboração do Dr. M. Assafin, autor do código.

⁴Veja também <https://gaia.esac.esa.int/documentation/GDR1/datamodel/>.

(triângulos). Neste contexto, vale notar que, além de termos utilizado o Gaia DR1 como referência (ao invés do UCAC4), os valores de (O-C) aqui obtidos são relativos à DE435, mais precisa que a DE421.

A posição de Caronte em relação à Plutão, para a data da observação, é ~ 330 mas a oeste e ~ 510 mas ao sul. As observações efetuadas com o telescópio Boller&Chivens do OPD não separam angularmente Plutão de Caronte. Portanto, o fotocentro observado está mais a oeste da posição real de Plutão (compatível, portanto, com um valor negativo para $\Delta\alpha\cos\delta$).

A Fig. 6.6 apresenta os resultados para a declinação, comparando-os novamente com aqueles de Benedetti-Rossi et al. [6]. Novamente, a diferença entre ambos os resultados deve ser atribuído ao fato de que o catálogo de referência aqui utilizado foi o Gaia DR1 e também de termos utilizado a efeméride planetária DE435 ao invés da DE421.

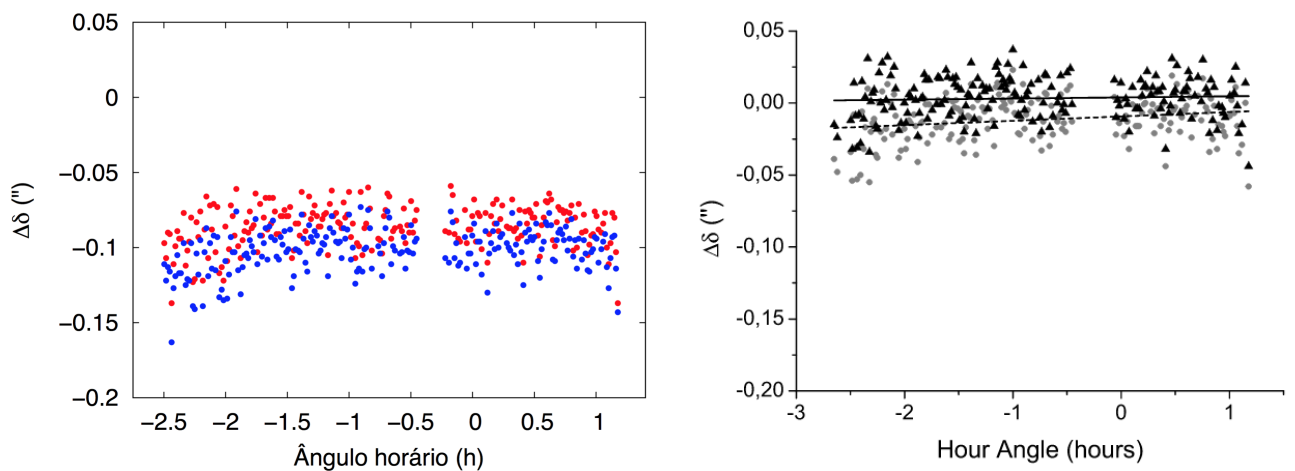


Figura 6.6: Painel esquerdo: correção à refração cromática (pontos vermelhos) a partir dos resultados deste trabalho. Em azul, valores de (O-C) para a declinação de Plutão sem se considerar efeitos de refração. Painel direito: resultados de Benedetti-Rossi et al. [6] para declinação. Os símbolos são como na Fig. 6.3.

A exemplo do raciocínio feito para $\Delta\alpha\cos\delta$, o valor negativo para $\Delta\delta$ mostrado pelos pontos vermelhos na Fig. 6.6 é compatível com o fotocentro observado de Plutão deslocado pela presença mais ao sul de Caronte.

Lembrando novamente que nenhum dos valores de $\Delta\alpha\cos\delta$ e $\Delta\delta$ (pontos vermelhos nas Figs. 6.4 e 6.6) apresentados para Plutão foi corrigido da presença de Caronte, é interessante notar que eles valem aproximadamente 1/6 da distância angular entre Plutão e Caronte como dada pelas efemérides para a data de observação.

Obviamente, houve uma escolha de um espectro a ser utilizado para Plutão. Tal escolha foi feita com o auxílio da Fig. 6.7.

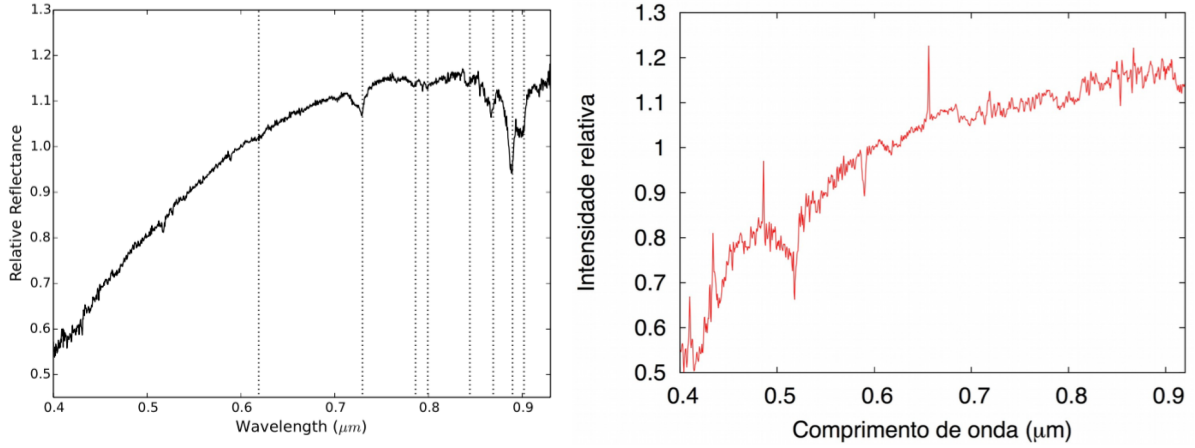


Figura 6.7: Painel esquerdo: espectro de Plutão dado por Lorenzi et al. [33], normalizado em $0.6\mu\text{m}$ e oriundo da média de 6 outros espectros estudados pelos mesmos autores. Painel direito: espectro de uma estrela K2V dividido por aquele de uma estrela G2V.

O painel esquerdo da Fig. 6.7 mostra que a razão entre os espectros K2V e G2V resulta em uma curva cujo envelope assemelha-se àquele mostrado pelo painel direito da mesma figura. Com isso, optamos pela escolha de um espectro K2V para Plutão. Vale notar também que, na verdade, nossas observações não resolvem Plutão e Caronte. No entanto, o espectro de Caronte atua de forma neutra (Fink and Disanti [16], Lorenzi et al. [33]) sobre a perfil mostrado no painel esquerdo da Fig. 6.7.

6.2 Testes realizados com as observações de Haumea

Além de Plutão, utilizamos também observações de Haumea realizadas no OPD. As razões para termos escolhido esses dados são: data das observações próximas às do Gaia (portanto, pouca influência dos movimentos próprios) e o fato de Haumea estar angularmente distante do plano da Galáxia (portanto, pouca influência da extinção interestelar).

Dados sobre as duas noites de observação são mostrados pela Tabela 6.2. Os perfis do filtro (R) e do CCD (IKON) utilizados são dados na Fig. 6.8.

Tabela 6.2: Haumea: informações sobre as observações

Data	Telescópio	Ângulo horário (início/fim)	Detector	Filtro
09/JUN/2015	Perkin-Elmer (1.60m)	+0.5h – +1.5h	IKON	R
09-10/JUN/2015	Perkin-Elmer (1.60m)	–0.2h – +0.5h	IKON	R

Dados observacionais para Haumea.

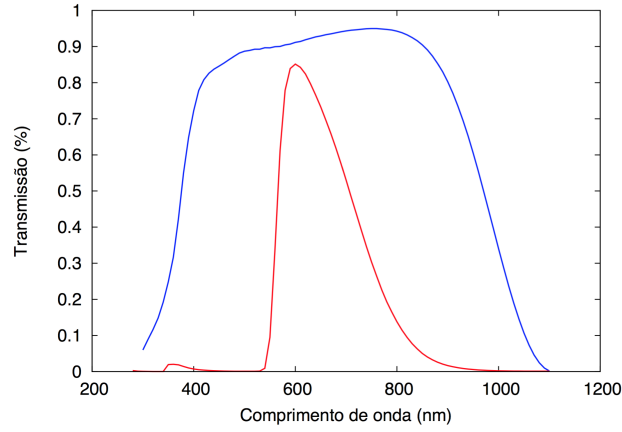


Figura 6.8: Perfis do CCD IKON (azul) e filtro R (vermelho) utilizados nas observações de Haumea.

A Fig. 6.9 mostra valores (O-C) em ascensão reta e declinação para observações de Haumea nas duas noites mencionadas acima. Novamente, o catálogo de referência é o Gaia DR1. Os resultados são quantificados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Desvios-padrão – Haumea

Data	Sem correção da refração		Com a correção da refração			Medidas
	$\Delta\alpha \cos\delta$	($''$)	$\Delta\delta$	$\Delta\alpha \cos\delta$	($''$)	
08/JUN/2015	0.058 (± 0.008)	0.041 (± 0.008)	0.047 (± 0.008)	0.069 (± 0.004)		14-12
09/JUN/2015	0.062 (± 0.013)	0.056 (± 0.013)	0.057 (± 0.010)	0.092 (± 0.010)		6-6

Diferenças entre posições observadas de Haumea e efeméride de referência. Valores entre parêntesis: desvios-padrão das medidas $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$.

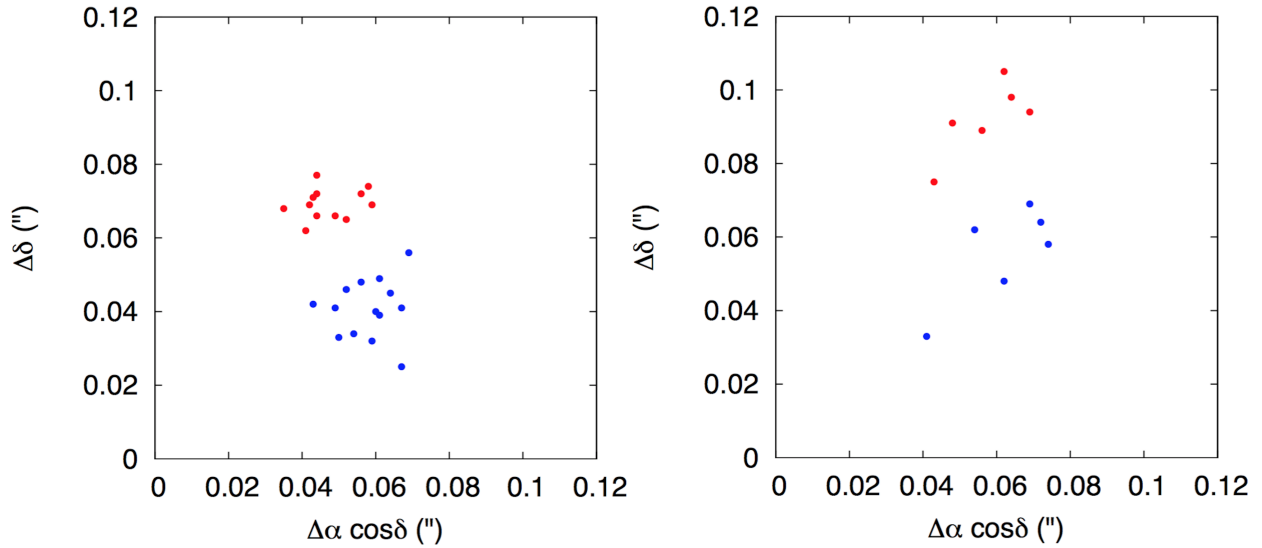


Figura 6.9: Pontos azuis: redução sem consideração à refração cromática. Pontos vermelhos: redução com correção à refração cromática. Pannel esquerdo: dados obtidos em 08 de junho de 2015 com o telescópio Perkin-Elmer (1.6m) do OPD. Pannel direito: dados obtidos em 09 de junho de 2015 com o telescópio Perkin-Elmer (1.6m) do OPD.

No que diz respeito ao espectro utilizado para Haumea, o tomamos como G2V dado que Pinilla-Alonso et al. [42] reporta um espectro neutro para esse corpo (Fig. 6.10) entre 300 nm e 1200 nm.

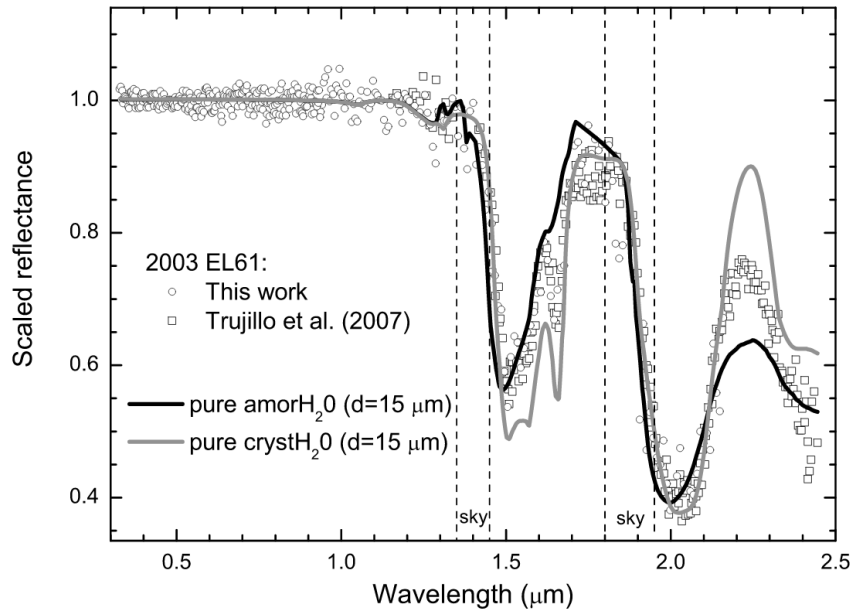


Figura 6.10: Espectro de reflectância composto de Haumea, como dado por Pinilla-Alonso et al. [42]. A região do espectro que nos interessa aqui é aquela $< 1\mu\text{m}$.

É importante notar que, para ambas as noites, houve pequena diminuição no desvio-padrão das medidas corrigidas pela refração cromática quando comparadas com aquelas que não contemplam

tal correção⁵. Além disso, não se pode deixar de notar que os valores de $\Delta\delta$, **obtidos após a correção à refração**, possuem uma diferença significativa. Em princípio, não há por que esperar desvios diferentes para noites próximas.

Haumea possui declinação $\delta \sim +18$. Assim, com relação ao OPD, sua culminação superior se dá a $\sim 40^\circ$. Como consequência, espera-se que efeitos de refração afetem as medidas em declinação mais do que as em ascensão reta. Além disso, feita a devida correção, é de se esperar que os valores de $\Delta\delta$ sejam próximos para noites consecutivas. Utilizar espectros diferentes para noites diferentes, por outro lado, pode resolver o problema desde que tenhamos justificativa para tal abordagem.

Lacerda [30] reportam, para Haumea, que variações de cor estão espacialmente correlacionadas com uma região mais escura e avermelhada do que a média da superfície, como dado pelas Figs. 6.11 e 6.12.

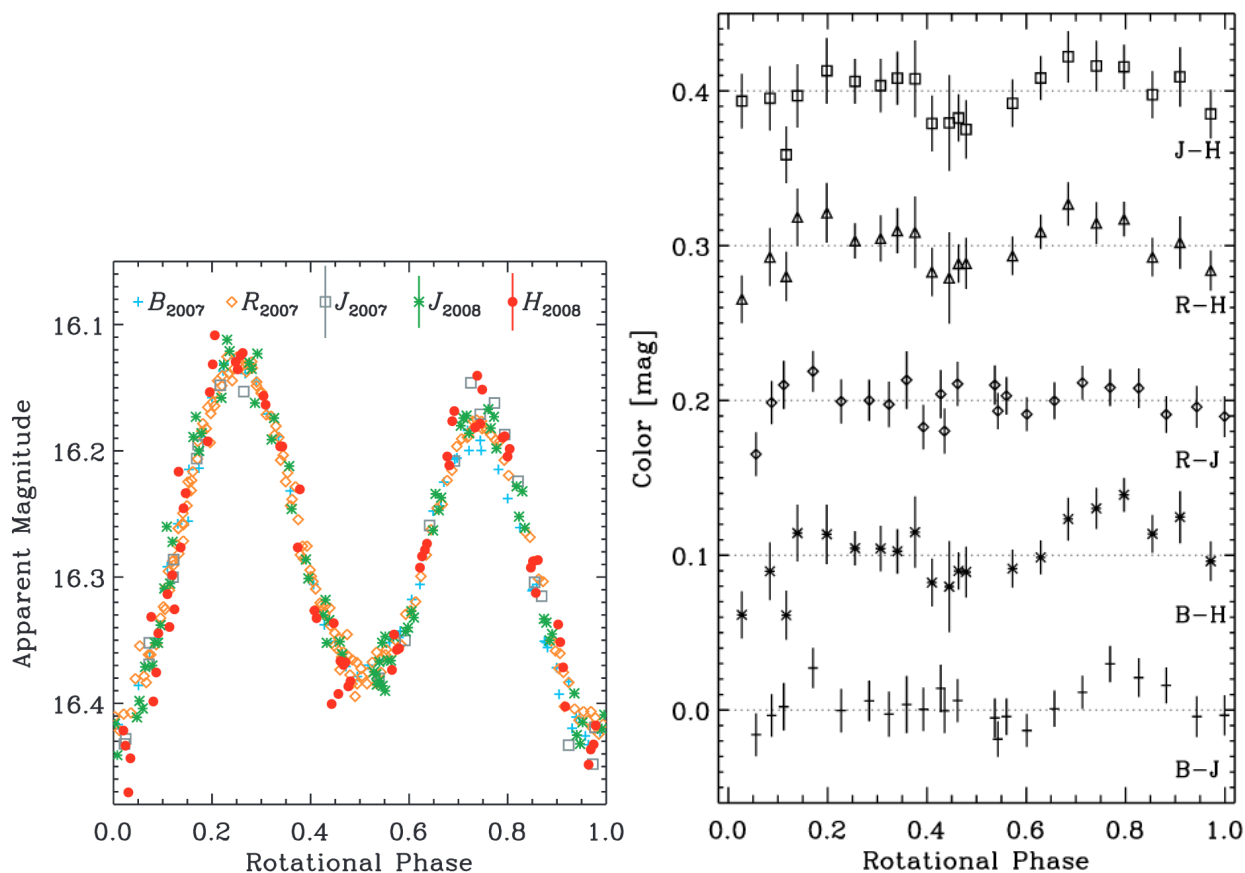


Figura 6.11: Painel esquerdo: curva de luz rotacional de Haumea com informações de 4 bandas: B , R , J , H . Painel direito: medida dos desvios das cores $B - J$, $B - H$, $R - J$, $R - H$, e $J - H$ com respeito às suas respectivas curvas rotacionais medianas. Crédito: Lacerda [30].

⁵Embora o resultado, isoladamente, não signifique o sucesso do método, o contrário poderia ser um mal sinal.

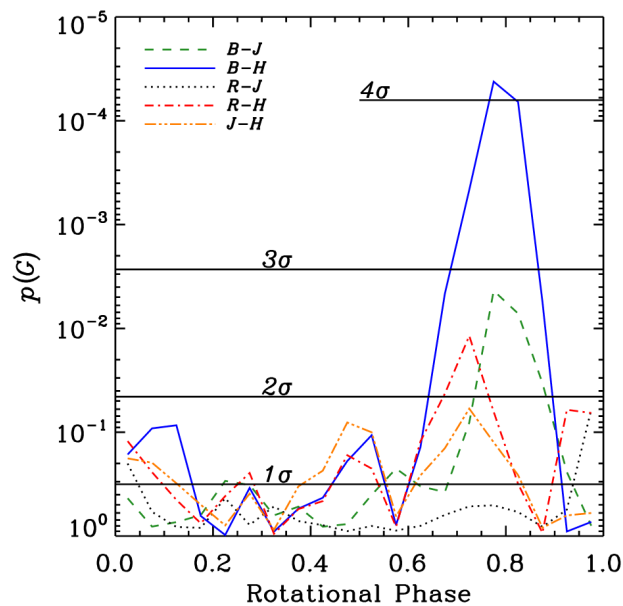


Figura 6.12: Probabilidade de que cada uma das curvas oriundas das diferenças em cor, apresentadas na Fig. 6.11 (painel direito), seja equivalente às respectivas medianas dadas pelas linhas pontilhadas. Quanto mais uma sequência de pontos se afasta dessa mediana, maior é o pico apresentado. Crédito: Lacerda [30].

Mesmo não tendo recuperado a fase rotacional de Haumea no momento das observações fizemos, como exercício, uma nova redução para as imagens obtidas na noite de 09/JUN/2015 utilizando um tipo espectral M0V, assumindo que a região mais escura e avermelhada pudesse estar voltada para os observadores na referida noite. Os resultados podem ser visualizados na Fig. 6.13.

Os novos valores para $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ são, respectivamente, $0.060'' (\pm 0.013'')$ e $0.058'' (\pm 0.010'')$. Tais valores, sobretudo em declinação, são mais compatíveis com aqueles mostrados na Tabela 6.3 para a noite de 09/JUN/2015 quando se aplica a correção à refração cromática.

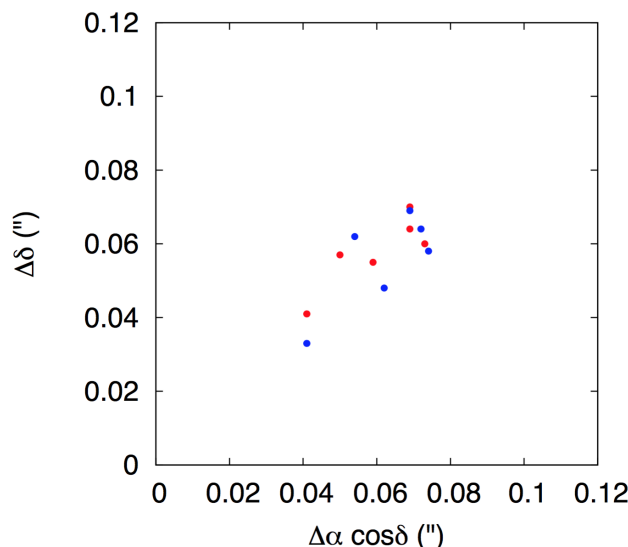


Figura 6.13: Pontos azuis: redução sem consideração à refração cromática. Pontos vermelhos: redução com correção à refração cromática, a exemplo do que foi feito para a Fig. 6.9, mas utilizando um tipo espectral M0V para Haumea.

Quanto mais avermelhado for o espectro tomado para Haumea, menor será o valor absoluto obtido para $\Delta\delta$. Como nosso passo inicial foi assumir um espectro G2V, restou-nos então a opção da utilização do espectro mais avermelhado na segunda noite. Assim, a Fig. 6.13 pode ser vista como correção ao painel direito da Fig. 6.9.

É importante destacar que o tipo espectral utilizado para Haumea na noite de 09/JUN/2015, M0V, é mais avermelhado do que aquele utilizado para Plutão e para Chariklo (próxima seção), K2V. A escolha do tipo espectral M0V prevaleceu por oferecer melhores resultados astrométricos do que o tipo K2V.

Efetivamente, a escolha do tipo M0V carece de melhor fundamentação. Ainda, se supusermos que as características da região mais escura e avermelhada de Haumea não sejam exceção àquelas de outros corpos cujos espectros são apresentados nas Figs. 5.4 e 5.5, então o tipo K2V deveria ser a melhor opção aqui. No entanto, é fato que o uso de espectro mais vermelho que G2V para Haumea, na redução dos dados da noite de 09/JUN/2015, é necessário para que ambas as noites de observação produzam dados que concordem. A presença da mancha escura avermelhada, de todo o modo, não se opõe ao exercício que fizemos.

Obviamente, é pouco plausível alterar o tipo espectral na primeira noite (08/JUN/2015) para que os resultados coincidam com as da segunda noite porque, nesse caso, seria necessário assumir para Haumea um espectro mais azul que G2V, o que não é razoável tendo a vista o que nos mostra a Fig. 6.10.

6.3 Testes realizados com as observações de Chariklo

A vantagem de utilizarmos Chariklo para testarmos o código é que ele possui uma efeméride bastante precisa, como mostram as Figs. 2.6 e 2.7, o que nos oferece uma boa base de comparação para as posições obtidas. A desvantagem, como no caso de Plutão, é o fato de se encontrar numa

região que tem por fundo o plano da Galáxia.

No que diz respeito ao espectro utilizado para Chariklo, visto que este apresenta-se mais avermelhado que o espectro solar [17] (Fig. 5.4 painel superior esquerdo), o tomamos como tipo K2V. As respectivas observações também foram realizadas no OPD. A Tabela 6.4 apresenta maiores informações sobre elas. Os perfis do filtro (*I*) e do CCD (IKON) utilizados são dados na Fig. 6.14.

Tabela 6.4: Chariklo: informações sobre as observações

Data	Telescópio	Ângulo horário (início/fim)	Detector	Filtro
03/MAI/2017	Perkin-Elmer (1.60m)	-1.8h - +1.0h	IKON	<i>I</i>

Dados observacionais para Chariklo.

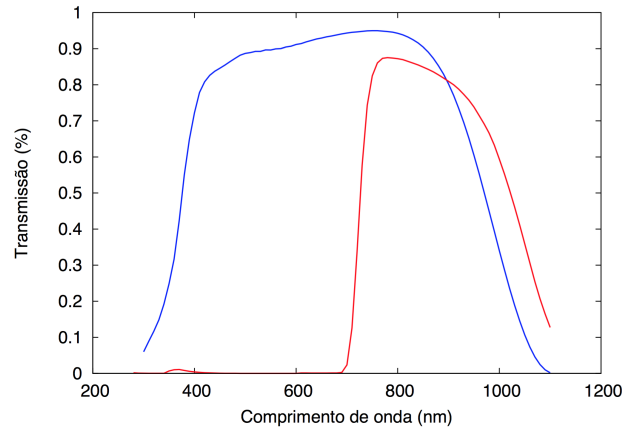


Figura 6.14: Perfis do CCD IKON (azul) e filtro *I* (vermelho) utilizados nas observações de Chariklo.

Os resultados da redução, com e sem consideração à refração cromática, podem ser vistos na Fig. 6.15. Durante as observações, a massa de ar variou entre 1.012 a 1.106. Nota-se que há pouca diferença entre os resultados com (pontos azuis) e sem (pontos vermelhos) refração. Esses resultados são quantificados na Tabela 6.5, que compara dados observados com a efeméride mostrada na Fig. 2.7. Essa efeméride foi determinada a partir de várias observações obtidas principalmente no OPD, ESO (telescópio de 2.2m), e a partir de ocultações estelares.

Tabela 6.5: Desvios-padrão – Chariklo

Data	Sem correção da refração		Com a correção da refração			Medidas
	$\Delta\alpha \cos\delta$	($''$)	$\Delta\delta$	$\Delta\alpha \cos\delta$	($''$)	
03/MAI/2017	0.003 (± 0.005)	0.018 (± 0.006)	0.004 (± 0.004)	0.016 (± 0.006)		62-60

Diferenças entre posições observadas de Chariklo e efeméride oriunda do NIMA (Fig. 2.7). Valores entre parêntesis: desvios-padrão das medidas $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$.

Não há, dentro das incertezas, diferença entre os resultados. A razão sinal-ruído (SNR) de Chariklo nas imagens em questão é ~ 80 . Tomando-se um *seeing* médio de $1.02''$, determinado a partir das observações, podemos estimar a precisão na determinação do centroide através da razão [37]

$$\sigma_{x,y} = \frac{\sigma_{psf}}{SNR}, \quad (6.2)$$

onde $FWHM = seeing = 2.35482 \times \sigma_{psf}$. Desta forma, temos que a precisão do centroide em x (y) é $0.005''$, incomumente próxima à precisão em ascensão reta e declinação medidas. Portanto, nesse caso ao menos, não se espera uma melhoria na precisão das medidas.

Por outro lado, a efeméride apresentada por Chariklo possui uma precisão melhor que $0.010''$, valor que tem sido corroborado por uma bem sucedida série de ocultações estelares promovidas por esse Centauro. Isto significa que o valor de $\Delta\delta = 0.016''$ (veja Tabela 6.5) pode ser melhorado. Em outras palavras, a consideração à refração cromática deveria ter-nos levado a um desvio menor com relação à efeméride, apesar do fato de que o desvio obtido esteja marginalmente na zona de incerteza da efeméride se considerarmos a incerteza na declinação ($\pm 0.006''$). Em particular, o valor obtido para $\Delta\delta$ pode estar afetado pela ausência de movimentos próprios nas estrelas de referência.

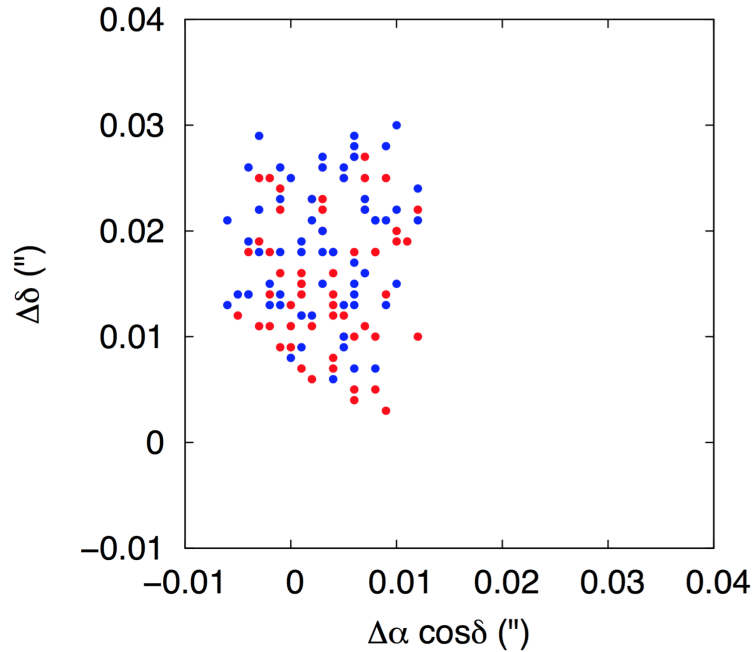


Figura 6.15: Pontos azuis: redução sem consideração à refração cromática. Pontos vermelhos: redução com correção à refração cromática.

Capítulo 7

Conclusão e comentários

Sob um ponto de visto estrito, ainda não é possível afirmar que o procedimento atua com total sucesso. No entanto, os resultados apresentados com a aplicação proposta da refração cromática são encorajadores e, certamente, indicam que estamos no bom caminho. O tratamento das observações relativas a Plutão é o principal indicativo do potencial do procedimento que adotamos para a correção da refração cromática. Como mostrado, uma correção eficiente pode ser efetuada sem que haja a necessidade de considerarmos observações espalhadas ao longo de várias horas.

O código aqui apresentado requer o conhecimento de vários parâmetros, nem sempre registrados no momento da aquisição de imagens. Falamos, em particular, da pressão e da temperatura locais, bem como da umidade. Por isso, é necessário que o observador atente ao registro desses dados. É importante ressaltar que existem bancos de dados com informações a respeito da temperatura, pressão e umidade para datas passadas no OPD.

O tempo de processamento para a correção à refração cromática que efetuamos é longo. Embora seja concebível o tratamento de algumas centenas de imagens, o atual estado de nosso código torna seu uso impraticável num contexto de *big data*.

Embora não possuamos um banco de espectros para TNOs e Centauros, ao contrário do que ocorre para estrelas, talvez não seja necessário compilar tal banco. No momento, parece mais prático que o tipo espectral dos alvos seja fornecido como parâmetro de entrada pelo próprio usuário, ao invés de tornarmos automática essa decisão.

O caso de Haumea, para o qual tipos espectrais diferentes foram utilizados para a redução de dados em noites consecutivas, desperta interesse. Embora a solução adotada não seja frequente, possui fundamento para ser adotada. Faz parte, portanto, de um processo válido de investigação. Se de fato ficar confirmado que a mancha escura avermelhada foi a responsável por tal situação, a astrometria precisa de corpos do sistema solar pode vir a requerer conhecimento mais detalhado das propriedades superficiais e rotacionais de alguns alvos. Uma forma de realizar testes para se verificar a real influência da fase rotacional é através de um pedido de tempo para novas observações de Haumea no, por exemplo, observatório do Pico dos Dias. Observações ao longo de uma rotação completa do astro, 3.9h, seriam suficientes.

No que diz respeito à determinação do comprimento de onda efetivo, nós o calculamos a partir de informações isoladas. Ou seja, consideramos separadamente o perfil do filtro utilizado bem como o perfil do CCD. Em nenhum momento levamos em conta a totalidade do conjunto óptico

do instrumento, o que seria mais desejável.

Ainda, apesar de termos obtido especificações diretamente do fabricante da câmera IKON, as curvas que nos foram por ele passadas não coincidem com os perfis disponíveis na página do OPD. Novamente, o melhor procedimento seria medir a transmissão diretamente a partir do telescópio, devidamente equipado com câmera e filtros.

Não nos é óbvio o cálculo da incerteza no comprimento de onda médio a partir da determinação do tipo espectral e do cálculo da extinção interestelar. Com isto, fica falha a determinação da incerteza em posição.

Até o momento, utilizamos para os testes apenas um subconjunto das estrelas do Gaia DR1, a saber, aquelas em comum com o 2MASS pois precisamos das magnitudes nos filtros J, H, Ks para identificar os espectros. Com as liberações futuras do Gaia, teremos acesso não apenas a um conjunto maior de estrelas como também a identificações mais precisas do tipo espectral. Isto deverá diminuir fontes de erro oriundas tanto da determinação do tipo espectral da estrela como da extinção a ser aplicada para avermelharmos o espectro. Em associação aos movimentos próprios deveremos experimentar também, tendo as observações de Plutão como exemplo, uma menor dispersão das medidas.

Com a chegada dos dados da astrometria Gaia e de posições precisas para dezenas de milhares de TNOs/Centauros através do LSST, entraremos num contexto diferente para o estudo desses corpos através da técnica de ocultação estelar. Ainda assim, uma astrometria precisa, como aquela com a qual este trabalho quer contribuir, é fundamental para um estudo mais detalhado de corpos com atmosfera bem como das vizinhanças imediatas desses corpos.

Referências Bibliográficas

- [1] , 2002. Book Review: Astrometry of Fundamental Catalogues - The Evolution from Optical to Radio Reference Frames. *Astronomische Nachrichten* 323, 12. doi:10.1002/1521-3994(200203)323:1<12::AID-ASNA12>3.0.CO;2-0.
- [2] Alvarez-Candal, A., Fornasier, S., Barucci, M.A., de Bergh, C., Merlin, F., 2008. Visible spectroscopy of the new ESO large program on trans-Neptunian objects and Centaurs. Part 1. *A&A* 487, 741–748. doi:10.1051/0004-6361:200809705.
- [3] Alvarez-Candal, A., Pinilla-Alonso, N., Licandro, J., Cook, J., Mason, E., Roush, T., Cruikshank, D., Gourgeot, F., Dotto, E., Perna, D., 2011. The spectrum of (136199) Eris between 350 and 2350 nm: results with X-Shooter. *A&A* 532, A130. doi:10.1051/0004-6361/201117069, arXiv:1107.1708.
- [4] Arias, E.F., Charlot, P., Feissel, M., Lestrade, J.F., 1995. The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS. *A&A* 303, 604–608.
- [5] Assafin, M., Vieira Martins, R., Camargo, J.I.B., Andrei, A.H., Da Silva Neto, D.N., Braga-Ribas, F., 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.
- [6] Benedetti-Rossi, G., Vieira Martins, R., Camargo, J.I.B., Assafin, M., Braga-Ribas, F., 2014. Pluto: improved astrometry from 19 years of observations. *A&A* 570, A86.
- [7] Boboltz, D.A., Gaume, R.A., Fey, A.L., Ma, C., Gordon, D., IERS/IVS Working Group on ICRF2, 2010. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame (ICRF2) by Very Long Baseline Interferometry, in: *American Astronomical Society Meeting Abstracts #215*, p. 512.
- [8] Bourda, G., Collioud, A., Charlot, P., Porcas, R., Garrington, S., 2011. VLBI observations of optically-bright extragalactic radio sources for the alignment of the radio frame with the future Gaia frame. II. Imaging candidate sources. *A&A* 526, A102. doi:10.1051/0004-6361/201014249.

- [9] Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R.C., Kinney, A.L., Koornneef, J., Storchi-Bergmann, T., 2000. The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies. *ApJ* 533, 682–695. doi:10.1086/308692, arXiv:astro-ph/9911459.
- [10] 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., 2015. Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations. *A&A* 584, A96. doi:10.1051/0004-6361/201526498, arXiv:1509.08674.
- [11] Dias-Oliveira, A., Sicardy, B., Ortiz, J.L., Braga-Ribas, F., Leiva, R., Vieira-Martins, R., Benedetti-Rossi, G., Camargo, J.I.B., Assafin, M., Gomes-Júnior, A.R., Baug, T., Chandrasekhar, T., Desmars, J., Duffard, R., Santos-Sanz, P., Ergang, Z., Ganesh, S., Ikari, Y., Irawati, P., Jain, J., Liying, Z., Richichi, A., Shengbang, Q., Behrend, R., Benkhaldoun, Z., Brosch, N., Daassou, A., Frappa, E., Gal-Yam, A., Garcia-Lozano, R., Gillon, M., Jehin, E., Kaspi, S., Klotz, A., Lecacheux, J., Mahasena, P., Manfroid, J., Manulis, I., Maury, A., Mohan, V., Morales, N., Ofek, E., Rinner, C., Sharma, A., Sposetti, S., Tanga, P., Thirouin, A., Vachier, F., Widemann, T., Asai, A., Hayato, W., Hiroyuki, W., Owada, M., Yamamura, H., Hayamizu, T., Bradshaw, J., Kerr, S., Tomioka, H., Anderson, S., Dangl, G., Haymes, T., Naves, R., Wortmann, G., 2017. Study of the Plutino Object (208996) 2003 AZ₈₄ from Stellar Occultations: Size, Shape, and Topographic Features. *AJ* 154, 22. doi:10.3847/1538-3881/aa74e9, arXiv:1705.10895.
- [12] ESA (Ed.), 1997. The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission. volume 1200 of *ESA Special Publication*.
- [13] Feissel, M., Mignard, F., 1998. The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences. *A&A* 331, L33–L36.
- [14] Fey, A.L., Charlot, P., 1997. VLBA Observations of Radio Reference Frame Sources. II. Astrometric Suitability Based on Observed Structure. *ApJS* 111, 95–142. doi:10.1086/313017.
- [15] Fey, A.L., Charlot, P., 2000. VLBA Observations of Radio Reference Frame Sources. III. Astrometric Suitability of an Additional 225 Sources. *ApJS* 128, 17–83. doi:10.1086/313382.
- [16] Fink, U., Disanti, M.A., 1988. The separate spectra of Pluto and its satellite Charon. *AJ* 95, 229–236. doi:10.1086/114632.
- [17] Fornasier, S., Barucci, M.A., de Bergh, C., Alvarez-Candal, A., DeMeo, F., Merlin, F., Perna, D., Guilbert, A., Delsanti, A., Dotto, E., Doressoundiram, A., 2009. Visible spectroscopy of the new ESO large programme on trans-Neptunian objects and Centaurs: final results. *A&A* 508, 457–465. doi:10.1051/0004-6361/200912582, arXiv:0910.0450.

- [18] Fricke, W., et al., 1988. Fifth fundamental catalogue (FK5). Part 1: The basic fundamental stars. *Veroeffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg* 32, 1–106.
- [19] Gaia Collaboration, Brown, A.G.A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J.H.J., Mignard, F., Drimmel, R., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C.A.L., Bastian, U., et al., 2016a. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *A&A* 595, A2. doi:10.1051/0004-6361/201629512, arXiv:1609.04172.
- [20] Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J.H.J., Brown, A.G.A., Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C.A.L., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D.W., et al., 2016b. The Gaia mission. *A&A* 595, A1. doi:10.1051/0004-6361/201629272, arXiv:1609.04153.
- [21] Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J.H.J., Brown, A.G.A., Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C.A.L., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D.W., et al., 2016c. The Gaia mission. *A&A* 595, A1. doi:10.1051/0004-6361/201629272, arXiv:1609.04153.
- [22] Green, G.M., Schlafly, E.F., Finkbeiner, D.P., Rix, H.W., Martin, N., Burgett, W., Draper, P.W., Flewelling, H., Hodapp, K., Kaiser, N., Kudritzki, R.P., Magnier, E., Metcalfe, N., Price, P., Tonry, J., Wainscoat, R., 2015. A Three-dimensional Map of Milky Way Dust. *ApJ* 810, 25. doi:10.1088/0004-637X/810/1/25, arXiv:1507.01005.
- [23] Høg, E., Fabricius, C., Makarov, V.V., Bastian, U., Schwekendiek, P., Wicenc, A., Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., 2000a. Construction and verification of the Tycho-2 Catalogue. *A&A* 357, 367–386.
- [24] Høg, E., Fabricius, C., Makarov, V.V., Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., Bastian, U., Schwekendiek, P., Wicenc, A., 2000b. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. *A&A* 355, L27–L30.
- [25] Iorio, L., 2007. Dynamical determination of the mass of the Kuiper Belt from motions of the inner planets of the Solar system. *MNRAS* 375, 1311–1314. doi:10.1111/j.1365-2966.2006.11384.x, arXiv:gr-qc/0609023.
- [26] Ivantsov, A., 2011. Astrometry Correction for Chromatic Refraction, 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. 127-129, pp. 127–129.
- [27] Jenkins, L.F., 1952. *General catalogue of trigonometric stellar parallaxes.*
- [28] Kovalevsky, J., 2002. *Modern Astrometry.*
- [29] Kovalevsky, J., 2003. Aberration in proper motions. *A&A* 404, 743–747. doi:10.1051/0004-6361:20030560.

- [30] Lacerda, P., 2009. Time-Resolved Near-Infrared Photometry of Extreme Kuiper Belt Object Haumea. *AJ* 137, 3404–3413. doi:10.1088/0004-6256/137/2/3404, arXiv:0811.3732.
- [31] Lazzarin, M., Barucci, M.A., Boehnhardt, H., Tozzi, G.P., de Bergh, C., Dotto, E., 2003. ESO Large Programme on Physical Studies of Trans-Neptunian Objects and Centaurs: Visible Spectroscopy. *AJ* 125, 1554–1558. doi:10.1086/367771.
- [32] Lindegren, L., Lammers, U., Bastian, U., Hernández, J., Klioner, S., Hobbs, D., Bombrun, A., Michalik, D., Ramos-Lerate, M., Butkevich, A., Comoretto, G., Joliet, E., Holl, B., Hutton, A., Parsons, P., Steidelmüller, H., Abbas, U., Altmann, M., Andrei, A., Anton, S., Bach, N., Barache, C., Becciani, U., Berthier, J., Bianchi, L., Biermann, M., Bouquillon, S., Bourda, G., Brüsemeister, T., Bucciarelli, B., Busonero, D., Carlucci, T., Castañeda, J., Charlot, P., Clotet, M., Crosta, M., Davidson, M., de Felice, F., Drimmel, R., Fabricius, C., Fienga, A., Figueras, F., Fraile, E., Gai, M., Garralda, N., Geyer, R., González-Vidal, J.J., Guerra, R., Hambly, N.C., Hauser, M., Jordan, S., Lattanzi, M.G., Lenhardt, H., Liao, S., Löffler, W., McMillan, P.J., Mignard, F., Mora, A., Morbidelli, R., Portell, J., Riva, A., Sarasso, M., Serraller, I., Siddiqui, H., Smart, R., Spagna, A., Stampa, U., Steele, I., Taris, F., Torra, J., van Reeve, W., Vecchiato, A., Zschocke, S., de Bruijne, J., Gracia, G., Raison, F., Lister, T., Marchant, J., Messineo, R., Soffel, M., Osorio, J., de Torres, A., O’Mullane, W., 2016. Gaia Data Release 1. Astrometry: one billion positions, two million proper motions and parallaxes. *A&A* 595, A4. doi:10.1051/0004-6361/201628714, arXiv:1609.04303.
- [33] Lorenzi, V., Pinilla-Alonso, N., Licandro, J., 2015. Rotationally resolved spectroscopy of dwarf planet (136472) Makemake. *A&A* 577, A86. doi:10.1051/0004-6361/201425575, arXiv:1504.02350.
- [34] Lorenzi, V., Pinilla-Alonso, N., Licandro, J., Cruikshank, D.P., Grundy, W.M., Binzel, R.P., Emery, J.P., 2016. The spectrum of Pluto, 0.40-0.93 μm . I. Secular and longitudinal distribution of ices and complex organics. *A&A* 585, A131. doi:10.1051/0004-6361/201527281, arXiv:1509.00417.
- [35] LSST Science Collaboration, Abell, P.A., Allison, J., Anderson, S.F., Andrew, J.R., Angel, J.R.P., Armus, L., Arnett, D., Asztalos, S.J., Axelrod, T.S., et al., 2009. LSST Science Book, Version 2.0. ArXiv e-prints arXiv:0912.0201.
- [36] Ma, C., Arias, E.F., Eubanks, T.M., Fey, A.L., Gontier, A.M., Jacobs, C.S., Sovers, O.J., Archinal, B.A., Charlot, P., 1998. The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry. *AJ* 116, 516–546. doi:10.1086/300408.
- [37] Mighell, K.J., 2005. Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions. *MNRAS* 361, 861–878. doi:10.1111/j.1365-2966.2005.09208.x, arXiv:astro-ph/0505455.
- [38] Mignard, F., Klioner, S., Lindegren, L., Bastian, U., Bombrun, A., Hernández, J., Hobbs, D., Lammers, U., Michalik, D., Ramos-Lerate, M., Biermann, M., Butkevich, A., Comoretto,

- G., Joliet, E., Holl, B., Hutton, A., Parsons, P., Steidelmüller, H., Andrei, A., Bourda, G., Charlot, P., 2016. Gaia Data Release 1. Reference frame and optical properties of ICRF sources. *A&A* 595, A5. doi:10.1051/0004-6361/201629534, arXiv:1609.07255.
- [39] Perryman, M.A.C., de Boer, K.S., Gilmore, G., Høg, E., Lattanzi, M.G., Lindegren, L., Luri, X., Mignard, F., Pace, O., de Zeeuw, P.T., 2001. GAIA: Composition, formation and evolution of the Galaxy. *A&A* 369, 339–363. doi:10.1051/0004-6361:20010085, arXiv:astro-ph/0101235.
- [40] Perryman, M.A.C., Lindegren, L., Kovalevsky, J., Hoeg, E., Bastian, U., Bernacca, P.L., Crézé, M., Donati, F., Grenon, M., Grewing, M., van Leeuwen, F., van der Marel, H., Mignard, F., Murray, C.A., Le Poole, R.S., Schrijver, H., Turon, C., Arenou, F., Froeschlé, M., Petersen, C.S., 1997. The HIPPARCOS Catalogue. *A&A* 323, L49–L52.
- [41] Pickles, A.J., 1998. VizieR Online Data Catalog: A Stellar Spectral Flux Library: 1150 - 25000 A (Pickles 1998). VizieR Online Data Catalog 611.
- [42] Pinilla-Alonso, N., Brunetto, R., Licandro, J., Gil-Hutton, R., Roush, T.L., Strazzulla, G., 2009. The surface of (136108) Haumea (2003 EL{61}), the largest carbon-depleted object in the trans-Neptunian belt. *A&A* 496, 547–556. doi:10.1051/0004-6361/200809733, arXiv:0803.1080.
- [43] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P., 1992. Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing.
- [44] Schlafly, E.F., Finkbeiner, D.P., 2011. Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD. *ApJ* 737, 103.
- [45] Sicardy, B., Bolt, G., Broughton, J., Dobosz, T., Gault, D., Kerr, S., Bénard, F., Frappa, E., Lecacheux, J., Peyrot, A., Teng-Chuen-Yu, J.P., Beisker, W., Boissel, Y., Buckley, D., Colas, F., de Witt, C., Doressoundiram, A., Roques, F., Widemann, T., Gruhn, C., Batista, V., Biggs, J., Dieters, S., Greenhill, J., Groom, R., Herald, D., Lade, B., Mathers, S., Assafin, M., Camargo, J.I.B., Vieira-Martins, R., Andrei, A.H., da Silva Neto, D.N., Braga-Ribas, F., Behrend, R., 2011. Constraints on Charon’s Orbital Elements from the Double Stellar Occultation of 2008 June 22. *AJ* 141, 67. doi:10.1088/0004-6256/141/2/67.
- [46] Skrutskie, M.F., Cutri, R.M., Stiening, R., Weinberg, M.D., Schneider, S., Carpenter, J.M., Beichman, C., Capps, R., Chester, T., Elias, J., Huchra, J., Liebert, J., Lonsdale, C., Monet, D.G., Price, S., Seitzer, P., Jarrett, T., Kirkpatrick, J.D., Gizis, J.E., Howard, E., Evans, T., Fowler, J., Fullmer, L., Hurt, R., Light, R., Kopan, E.L., Marsh, K.A., McCallon, H.L., Tam, R., Van Dyk, S., Wheelock, S., 2006. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *AJ* 131, 1163–1183. doi:10.1086/498708.
- [47] Stone, R.C., 1996. An Accurate Method for Computing Atmospheric Refraction. *PASP* 108, 1051–1058.

- [48] Urban, S.E., Corbin, T.E., Wycoff, G.L., Martin, J.C., Jackson, E.S., Zacharias, M.I., Hall, D.M., 1998. The AC 2000: The Astrographic Catalogue on the System Defined by the HIPPARCOS Catalogue. *AJ* 115, 1212–1223. doi:10.1086/300264.
- [49] Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., Martinez, C., Beisker, W., Bredner, E., Dunham, D., Maley, P., Lellouch, E., Arlot, J.E., Berthier, J., Colas, F., Hubbard, W.B., Hill, R., Lecacheux, J., Lecampion, J.F., Pau, S., Rapaport, M., Roques, F., Thuillot, W., Hills, C.R., Elliott, A.J., Miles, R., Platt, T., Cremaschini, C., Dubreuil, P., Cavadore, C., Demeautis, C., Henriquet, P., Labrevoir, O., Rau, G., Coliac, J.F., Piraux, J., Marlot, C., Marlot, C., Gorry, F., Sire, C., Bayle, B., Simian, E., Blommers, A.M., Fulgence, J., Leyrat, C., Sauzeaud, C., Stephanus, B., Rafaelli, T., Buil, C., Delmas, R., Desnoux, V., Jasinski, C., Klotz, A., Marchais, D., Rieugnié, M., Bouderand, G., Cazard, J.P., Lambin, C., Pujat, P.O., Schwartz, F., Burlot, P., Langlais, P., Rivaud, S., Brochard, E., Dupouy, P., Lavayssière, M., Chaptal, O., Daiffallah, K., Clarasso-Llauger, C., Aloy Doménech, J., Gabaldá-Sánchez, M., Otazu-Porter, X., Fernández, D., Masana, E., Ardanuy, A., Casas, R., Ros, J.A., Casarramona, F., Schnabel, C., Roca, A., Laborдена, C., Canales-Moreno, O., Ferrer, V., Rivas, L., Ortiz, J.L., Fernández-Arozena, J., Martín-Rodríguez, L.L., Cidadão, A., Coelho, P., Figueredo, P., Gonçalves, R., Marciano, C., Nunes, R., Ré, P., Saraiva, C., Tonel, F., Clérigo, J., Oliveira, C., Reis, C., Ewen-Smith, B.M., Ward, S., Ford, D., Gonçalves, J., Porto, J., Laurindo Sobrinho, J., Teodoro de Gois, F., Joaquim, M., Afonso da Silva Mendes, J., van Ballegoij, E., Jones, R., Callender, H., Sutherland, W., Bumgarner, S., Imbert, M., Mitchell, B., Lockhart, J., Barrow, W., Cornwall, D., Arnal, A., Eleizalde, G., Valencia, A., Ladino, V., Lizardo, T., Guillén, C., Sánchez, G., Peña, A., Radaelli, S., Santiago, J., Vieira, K., Mendt, H., Rosenzweig, P., Naranjo, O., Contreras, O., Díaz, F., Guzmán, E., Moreno, F., Omar Porras, L., Recalde, E., Mascaró, M., Birnbaum, C., Cósias, R., López, E., Pallo, E., Percz, R., Pulupa, D., Simbaña, X., Yajamín, A., Rodas, P., Denzau, H., Kretlow, M., Valdés Sada, P., Hernández, R., Hernández, A., Wilson, B., Castro, E., Winkel, J.M., 2009. Titania’s radius and an upper limit on its atmosphere from the September 8, 2001 stellar occultation. *Icarus* 199, 458–476. doi:10.1016/j.icarus.2008.09.011.
- [50] Wilson, R.E., 1953. General catalogue of stellar radial velocities. Carnegie Institute Washington D.C. Publication .
- [51] Zacharias, N., Finch, C., Frouard, J., 2017. UCAC5: New Proper Motions Using Gaia DR1. *AJ* 153, 166. doi:10.3847/1538-3881/aa6196, arXiv:1702.05621.
- [52] Zacharias, N., Finch, C.T., Girard, T.M., Henden, A., Bartlett, J.L., Monet, D.G., Zacharias, M.I., 2013. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4). *AJ* 145, 44.
- [53] Zacharias, N., Urban, S.E., Zacharias, M.I., Hall, D.M., Wycoff, G.L., Rafferty, T.J., Germain, M.E., Holdenried, E.R., Pohlman, J.W., Gauss, F.S., Monet, D.G., Winter, L., 2000. The First US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog. *AJ* 120, 2131–2147. doi:10.1086/301563.

- [54] Zacharias, N., Zacharias, M.I., Hall, D.M., Johnston, K.J., de Vegt, C., Winter, L., 1999. Accurate Optical Positions of Extragalactic Radio Reference Frame Sources. *AJ* 118, 2511–2525. doi:10.1086/301083.