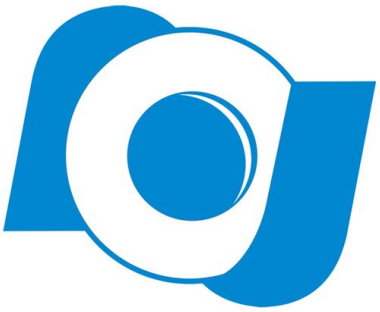
Observatório Nacional
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI
Programa de Pós-graduação em astronomia



Astrometria e fotometria de pequenos corpos do Sistema Solar em imagens com campos estelares densos

Aluno: Josué da Silva Cavalcante
Orientador: Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo
Co-orientador: Dr. Adriano Pieres

Rio de Janeiro
July 26, 2026

Josué da Silva Cavalcante

Astrometria e fotometria de pequenos corpos do Sistema Solar em imagens com campos estelares densos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia do Observatório Nacional como requisito parcial para a obtenção do grau de ***Mestre*** *em Astronomia.*

Orientador: Julio I. Bueno de Camargo
Co-orientador: Adriano Pieres

Rio de Janeiro - RJ
2025

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional durante toda a minha trajetória acadêmica. Em especial à minha mãe Maria Socorro da Silva, e aos meus avós Socorro e Josa pelo amor, dedicação e incentivo constantes. Obrigado por acreditarem em mim nos momentos mais desafiadores e por serem um exemplo de perseverança e força.

Ao meu irmão João, pelo apoio e companheirismo mesmo em momentos de distância.

À minha esposa Maria, minha companheira de vida, por ter caminhado ao meu lado durante todo este processo, compreendendo as ausências, compartilhando as angústias e celebrando cada conquista. Seu amor, paciência e apoio foram essenciais para a conclusão desta etapa.

Ao meu orientador Dr. Julio Ignácio Bueno de Camargo, pela valiosa orientação acadêmica, pelas contribuições inestimáveis à minha pesquisa e por todo o conhecimento compartilhado e pela compreensão nos momentos de dificuldade.

Ao meu coorientador Dr. Adriano Pieres, pelas discussões enriquecedoras, pelo olhar crítico que tanto contribuiu para o aprimoramento deste trabalho e pelos conselhos nos momentos difíceis.

Ao Dr. Rodrigo Boufleur, pela valiosa contribuição com os códigos em Python, que permitiram aprimorar os resultados finais deste trabalho.

Ao Observatório Nacional que me acolheu e proporcionou as condições necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão do apoio financeiro inicial, recurso fundamental que possibilitou a execução e subsequente conclusão do presente trabalho de pesquisa.

Aos colegas do grupo do Rio pelas importantes reuniões e contribuições para este trabalho.

Agradeço a colaboração de Wojtek Pych, fundamental para a compreensão e aplicação do pacote DIAPL2, o que permitiu a implementação eficaz da técnica de diferença de imagens neste trabalho.

À EEMTI José Cláudio de Araújo, por ter sido compreensiva quanto às demandas da vida acadêmica e por ter se tornado um espaço de aplicação prática dos conhecimentos adquiridos. Aos meus colegas de trabalho, pelo incentivo e pela parceria diária. Em especial, agradeço ao diretor e amigo Adriano Fernandes, pelo apoio institucional, e às duas coordenadoras Adriana e Helena, pela flexibilidade e pelo suporte constantes. Também ao meu colega de trabalho Anazion Linhares pelo seu apoio que muitas vezes me acalmaram e confortaram nos momentos turbulentos.

Aos meus ex-professores da Universidade Estadual Vale do Acaraú que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e profissional. Em especial, ao Prof. Dr. Antonio Fernandes Siqueira, por ter sido meu orientador na graduação, pelos valiosos ensinamentos e por ter despertado em mim o interesse pela pesquisa científica.

Por fim, aos meus amigos Clairton, Diego, Will, Wesley, Kellysson, Neto, Marcílio, Romário e colegas que, de diferentes formas, contribuíram para esta jornada, compartilhando conhecimentos, oferecendo sugestões e tornando o caminho mais leve e prazeroso.

Resumo

A precisão da astrometria e a fotometria de objetos móveis em campos estelares densos, especialmente para pequenos corpos do Sistema Solar, é desafiadora devido à contaminação do fluxo do alvo por fontes vizinhas. Este trabalho avalia e aplica a técnica de diferença de imagens (DIA) para minimizar este problema. Para abordar esse problema, inicialmente foi criada e analisada uma imagem astronômica simulada de um campo estelar denso, mais precisamente de um aglomerado globular, para comparar a performance astrométrica dos pacotes PRAIA e DAOPHOT. Os resultados desta análise validaram o uso do PRAIA para a determinação dos centroides das estrelas de referência astrométricas, onde a DIA não é aplicável, mostrando desempenho competitivo mesmo em condições de alta densidade estelar. Subsequentemente, a técnica de DIA, implementada com o pacote DIAPL2, foi aplicada a uma sequência de imagens do Centauro (10199) Chariklo obtidas com o instrumento SOAR/SOI em um campo denso. A metodologia envolveu a criação de uma imagem modelo sem o objeto móvel e a subtração desta das imagens de ciência reamostradas. As posições astrométricas de Chariklo foram então determinadas a partir das imagens de diferença (isolando o fluxo do alvo) em combinação com as estrelas de referência medidas nas imagens reamostradas pelo PRAIA, resultando em uma melhoria significativa na precisão astrométrica, com redução da dispersão dos resíduos em relação à efeméride NIMA (e.g., de 0.066" para 0.018" em $\Delta\alpha \cos\delta$). Adicionalmente, a fotometria extraída das imagens de diferença permitiu a obtenção da curva de luz rotacional de Chariklo e a determinação de sua fase rotacional com precisão ($\sigma_\varphi = 0.0025$), confirmando a eficácia da DIA em campos estelares densos. O trabalho visa consolidar a DIA como ferramenta rotineira para observações de pequenos corpos em campos densos, crucial para predições de ocultações estelares e caracterização física.

Abstract

The accuracy in astrometric and photometric measurements of moving objects in dense stellar fields, especially for small bodies of the Solar System, is challenging due to the contamination of the target's flux by neighboring sources. This work evaluates and applies the difference imaging technique (DIA) to minimize this problem. To address this issue, a simulated astronomical image of a dense stellar field, specifically a globular cluster, was created and analyzed to compare the astrometric performance of the PRAIA and DAOPHOT packages. The results of this analysis validated the use of PRAIA for determining the centroids of astrometric reference stars, where DIA is not applicable, demonstrating competitive performance even under high stellar density conditions. Subsequently, the DIA technique, implemented with the DIAPL2 package, was applied to a sequence of images of the Centaur (10199) Chariklo obtained with the SOAR/SOI instrument in a dense stellar field. The methodology involved creating a model image without the moving object and subtracting this from the re-sampled science images. The astrometric positions of Chariklo were then determined from the difference images (isolating the target flux) in combination with the reference stars measured in the re-sampled images by PRAIA, resulting in a significant improvement in astrometric precision, with a reduction in the scatter of the residuals relative to the NIMA ephemeris (e.g., from 0.066" to 0.018" in $\Delta\alpha\cos\delta$). Additionally, the photometry extracted from the difference images allowed for the acquisition of Chariklo's rotational light curve and the precise determination of its rotational phase ($\sigma_\varphi = 0.0025$), confirming the effectiveness of DIA in dense stellar fields. The work aims to consolidate DIA as a routine tool for observations of small bodies in dense fields, crucial for predictions of stellar occultations and physical characterization.

Sumário

Sumário i

Lista de Figuras iii

Lista de Tabelas vii

1 Introdução 1
- 1.1 Campos estelares densos em imagens astronômicas . . . 1
- 1.2 Fotometria . . . 3
  - 1.2.1 Imagens de CCD . . . 3
  - 1.2.2 Calibração das imagens . . . 4
  - 1.2.3 A fotometria propriamente dita . . . 6
- 1.3 Técnica de diferença de imagens . . . 7
- 1.4 Pequenos corpos do sistema solar . . . 9
  - 1.4.1 Resolução B5 da IAU . . . 9
  - 1.4.2 Importância do estudo dos pequenos corpos . . . 10
  - 1.4.3 Ocultações estelares . . . 11
  - 1.4.4 Tipos de pequenos corpos . . . 12

2 Ferramentas 21
- 2.1 Preâmbulo . . . 21
- 2.2 IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) . . . 22
  - 2.2.1 DAOPHOT . . . 22
- 2.3 PRAIA . . . 26
  - 2.3.1 Detalhamento do código . . . 26
  - 2.3.2 Principais tarefas . . . 26
- 2.4 DIAPL2 . . . 27
  - 2.4.1 Procedimento de execução . . . 27

3 Astrometria em imagem simulada 30
- 3.1 Astrometria e fotometria em campos densos . . . 30
  - 3.1.1 A criação da imagem simulada . . . 30
  - 3.1.2 Teste com imagens simuladas - PRAIA . . . 31
- 3.2 Resultados . . . 32

4 Astrometria usando Difference Imaging (DIA) 39
- 4.1 Imagens de Chariklo . . . 39
- 4.2 Imagem diferencial . . . 40

4.2.1 Criação da imagem modelo 41
4.2.2 Reamostragem das imagens de ciência 41
4.2.3 Determinação das imagens de diferença 42
4.2.4 Estimativa aproximada da eficiência de subtração de fluxos . . 42
4.3 Aplicação do PRAIA 43
4.4 Resultados - astrometria 45
4.4.1 Limite para precisão astrométrica 46

5 Fotometria **50**
5.1 Fotometria nas imagens de Chariklo 50
5.1.1 Contextualização 50
5.1.2 Ajuste por série de Fourier 50
5.1.3 Simulações de Monte Carlo 53
5.1.4 Propagação de erros com ponderação 54
5.2 Resultados 55
5.2.1 Curva de rotação de Chariklo com DIA 55
5.2.2 Comparação da fotometria com e sem DIA 56

6 Conclusões e comentários **59**
6.1 Astrometria e fotometria 59

A Apêndice A **79**

B Apêndice B **84**

Lista de Figuras

1.1 Um exemplo de campo estelar denso: o aglomerado globular M22 (NGC 6656) localizado na constelação de Sagitário. Esta imagem colorida foi composta a partir de imagens tomadas em julho de 1995 no telescópio Burrell Schmidt do Warner and Swasey Observatory. (disponível em https://noirlab.edu/public/images/noao-m22/). 2

1.2 Pequeno corpo do Sistema Solar (Chariklo) em um campo estelar denso, indicado pela seta vermelha. 3

1.3 Em (a) um diagrama de um sensor CCD que ilustra como a luz capturada por fotodiodos é convertida em carga elétrica, que é temporariamente armazenada antes de ser sequencialmente transferida para registros de deslocamento vertical e horizontal. Esse processo resulta na conversão da carga em um sinal digital que forma a imagem final. O fluxo da carga através do sensor permite a captura eficiente de imagens, destacando a complexidade e precisão da tecnologia de imagem digital (disponível em https://www.hamamatsu.com/jp/en/support/faqs/ccd-image-sensor.html). Na figura (b) temos um CCD especialmente desenvolvido para imagens astronômicas no ultravioleta (disponível em `https://web.archive.org/web/20041024093006/http://technology.jpl.nasa.gov/gallery/index.cfm?page=imageDetail&ItemID=119&catId=8`. 3

1.4 Exemplo de curva de linearidade para um CCD. Note o comportamento linear entre ∼500 ADU (Analog-to-Digital Units, ou contagens) e ∼ 26 000 ADU. A capacidade total de um píxel é de 150 000 000 elétrons (∼ 33 000 contagens). Figura original em Howell (2000), pg. 56. 5

1.5 As principais funções para modelagem de PSF (do autor). 7

1.6 Aplicação da técnica de diferença de imagens em uma imagem de ciência (imagem inferior esquerda). Na imagem inferior direita temos uma imagem modelo, usada como referência para a aplicação da técnica. Acima temos, à direita o kernel de convolução utilizado e finalmente à esquerda a imagem subtraída (Alard and Lupton, 1998). 8

1.7 Vista superior dos objetos do sistema solar interno. Autor: Pablo Carlos Budassi (disponível no link). 12

1.8 Este mosaico de Bennu foi criado a partir de observações realizadas pela sonda OSIRIS-REx da NASA, que permaneceu em estreita proximidade com o asteroide por mais de dois anos (disponível em https://www.nasa.gov/news-release/nasa-spacecraft-provides-insight-into-asteroid-bennus-future-orbit/). 14
1.9 Imagem do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, capturada e tratada pela sonda Rosetta com filtros vermelho, verde e azul (disponível no link). 15
1.10 MBC 133P/Elst-Pizarro apresentando uma cauda de poeira extremamente estreita e pronunciada, sem presença de coma, estendendo-se além do campo de visão da imagem original (disponível em https://www.eso.org/public/images/eso9637a/). 16
1.11 O centauro (10199) Chariklo, detectado pelo instrumento WFC3 do Telescópio Espacial Hubble em 17 de junho de 2015 (Sicardy et al., 2015). 18

3.1 Imagem simulada onde o aglomerado é visível com forte adensamento no centro. 31
3.2 Os desvios radiais médios são mostrados em cada painel para a variação de funções e parâmetros de ajuste, indo da esquerda para a direita e de cima para baixo: Gaussiana com fitrad= 10 e varorder= 0, Gaussiana com fitrad= 4 e varorder= -1, Gaussiana com fitrad= 10 e varorder= -1, Moffat com fitrad= 10 e varorder= 0, Gaussiana com fitrad= 10 e varorder= 1, Moffat com fitrad= 10 e varorder= -1, Gaussiana com fitrad= 20 e varorder= -1, Moffat com fitrad= 20 e varorder= 0. Nestes gráficos, os vetores foram ampliados em 100 vezes. 33
3.3 Variação do desvio médio em relação à magnitude da estrela. Os pontos pretos cheios mostram os centróides das estrelas medidos com o DAOPHOT e os vermelhos vazados mostram as estrelas medidas com o PRAIA. Além disso, é mostrado um ajuste a ambas as amostras. 35
3.4 O eixo vertical mostra o desvio de cada estrela entre a detecção e a posição original. O eixo horizontal ilustra a distância entre a estrela e o centro da imagem, que corresponde ao centro do objeto. Linhas vermelhas finas marcam os desvios radiais do DAOPHOT e do PRAIA para uma mesma estrela. Embora o desvio seja em média menor para o DAOPHOT do que para o PRAIA, há vários exemplos onde o desvio dado pelo PRAIA é menor do que do DAOPHOT. Embora com grande dispersão, duas retas foram ajustadas para cada uma das abordagens. 36
3.5 Posição das estrelas na imagem simulada que apresentam deslocamentos maiores quando detectadas pelo PRAIA em comparação com o DAOPHOT. 37
3.6 Distância da posição verdadeira das estrelas a mais de 500 pixels de distância do centro do aglomerado que apresentam um deslocamento significativamente maior para o PRAIA em comparação com o DAOPHOT. Aqui usamos as posições oriundas do ajuste com uma função gaussiana, fitrad = 10 e vardorder = -1. 38

4.1 Mapa de campo plano (banda R) dos CCDs SOI, com suas extensões FITS, im1, im2, im3 e uma imagem de Chariklo sobreposta na seção im4. 40
4.2 A partir da imagem de ciência (à esquerda) é obtida a imagem modelo (à direita). Na imagem modelo, observamos a ausência de Chariklo. A seta em vermelho indica a posição de Chariklo. 41
4.3 A partir da imagem modelo (à esquerda) é obtida a imagem de ciência reamostrada (à direita). A seta em vermelho indica a posição de Chariklo. 42
4.4 Imagem diferencial contendo apenas o fluxo do objeto transiente. . . 42
4.5 Panorama geral da aplicação do DIAPL2. Aqui, observamos todas as imagens necessárias para a execução correta do pacote. Da esquerda para a direita, temos a imagem de ciência, a imagem template, a imagem de ciência reamostrada e a imagem diferencial, respectivamente. As setas em vermelho indicam a presença de Chariklo. 43
4.6 Razão entre os fluxos das fontes na imagem de diferença e imagem reamostrada em função da magnitude psf calibrada na banda R (primeira imagem da sequência). 44
4.7 Histograma de bin 0.3, com as magnitudes medidas com o PRAIA para a mesma margem da Figura 4.6 anterior (primeira imagem da sequência). 45
4.8 Diferenças em ascensão reta, como função do tempo, entre observações e posições de efemérides (`https://lesia.obspm.fr/lucky-star/obj.php?p=1076`) muito precisas de Chariklo. Painel esquerdo: sem o uso da técnica de diferença de imagens. Painel direito: com o uso da técnica de diferença de imagens. 46
4.9 Painel superior, lado esquerdo: estrelas de cores diferentes ocupando a mesma altura em relação ao horizonte local e com ausência de atmosfera. Painel superior, lado direito: mesma situação anterior, sob presença da atmosfera. Painel inferior: posição prevista pelas efemérides (C, em vermelho) e posição observada (O, em azul e afetada pela atmosfera) do objeto alvo. Os outros pontos representam estrelas de campo, mais avermelhadas que o objeto alvo. As estrelas à direita representam estrelas próximas do nascente, enquanto que as estrelas à esquerda representam estrelas próximas do poente. Esta imagem foi obtida a partir da dissertação de mestrado de Bassallo da Silva (2017). 47
4.10 Imagem tomada como referência para estimativa da melhor precisão possível que se poderia obter para a posição de Chariklo (indicado pela seta azul). 49

5.1 A fase foi ajustada para o pico central na curva de luz de Chariklo, com incerteza $\sigma_\varphi = 0.002$. Este pico foi associado ao hemisfério de Chariklo que possui maior fluxo. Para este pico, Chariklo apresentava um ângulo de fase de $69.1° \pm 0.9°$, o que corresponde a 2457223.5560 JD $\pm$ 0.002 JD, ou seja, 1.3442 horas após o início da observação. 57

5.2 Variação da magnitude instrumental (Bessel R) em função do tempo em horas. 57

A.1 Tela de parâmetros da tarefa daofind. 79
A.2 Tela de parâmetros da tarefa phot. 80
A.3 Tela de parâmetros da tarefa pstselect. 81
A.4 Tela de parâmetros da tarefa psf. 82
A.5 Tela de parâmetros da tarefa allstar. 83

Lista de Tabelas

3.1 Os resultados do desvio médio radial (em pixels) utilizando DAOPHOT e PRAIA, com a variação das funções (primeira coluna) e outros parâmetros: F = raio de ajuste (fit) e V = varorder. Ainda, N_T é o número de estrelas detectadas sem corte de magnitude e N_{g22} o número de estrelas detectadas com corte de magnitude $g < 22$. Embora não haja variação nos valores do PRAIA (houve apenas uma rodada), a comparação DAOPHOT/PRAIA é feita sempre com as mesmas estrelas. Dessa maneira o que variou foi a amostra de estrelas na comparação, gerando diferentes valores para o desvio radial. . . 34

4.1 Diferenças em ascensão reta e declinação, com e sem o uso da técnica de diferença de imagens, são apresentadas na tabela, onde a primeira linha refere-se aos valores médios das diferenças em ascensão reta ($\Delta\alpha\cos\delta$) e declinação ($\Delta\delta$) sem o uso dessa técnica, resultando em $0.004'' \pm 0.066''$ para $\Delta\alpha\cos\delta$ e $0.014'' \pm 0.075''$ para $\Delta\delta$, com base em 95 medidas. A segunda linha apresenta esses valores com o uso da técnica de diferença de imagens, reduzindo as incertezas para $0.005'' \pm 0.018''$ em $\Delta\alpha\cos\delta$ e $0.014'' \pm 0.017''$ em $\Delta\delta$, com um total de 129 medidas. Isso demonstra que a aplicação da técnica de diferença de imagens melhora a precisão da astrometria, reduzindo as incertezas associadas. 45

5.1 Parâmetros da série de Fourier e as incertezas correspondentes derivadas da incerteza do período. Neste caso, a fase foi ajustada para o intervalo [0,1], ou seja, realizamos a divisão por 2π. 56

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação tem por objetivo avaliar o uso da técnica de diferença entre imagens (DIA), bem como a análise dos resultados de seu uso a partir de imagens astronômicas obtidas por CCDs (Charge Coupled Devices ou dispositivos de carga acoplada).

O objetivo final é lidar com predições de ocultações estelares, bem como com o estudo das fases rotacionais para alvos em tais campos. Neste capítulo de introdução vamos abordar inicialmente em cada subseção as principais definições, conceitos e desafios relacionados ao tema.

No Capítulo 2 detalhamos as ferramentas utilizadas: abordamos o uso do IRAF - Image Reduction and Analysis Facility (Tody, 1986), com ênfase no pacote DAOPHOT - A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry - (Stetson, 1987) e do PRAIA - Package for the Reduction of Astronomical Images Automatically (Assafin et al., 2011). Apresentamos também o uso do pacote DIAPL2 - Difference Image Analysis Package (Pych, 2016) para a técnica de diferença de imagens.

No Capítulo 3, descrevemos a criação de uma imagem simulada e apresentamos a análise astrométrica realizada nela, comparando os resultados do DAOPHOT e do PRAIA em um campo denso.

No Capítulo 4, aplicamos a DIA em imagens reais do Centauro (10199) Chariklo, detalhando o processo e apresentando os resultados astrométricos obtidos com o uso da DIA.

No Capítulo 5, focamos na fotometria extraída das imagens de diferença de Chariklo, detalhando a metodologia para obter uma curva de rotação e discutir os resultados fotométricos.

Apresentamos no Capítulo 6 as conclusões e comentários centrais do trabalho.

Ainda nos Apêndices A e B trazemos respectivamente, as telas de parâmetros das tarefas `daofind`, `phot`, `pstselect`, `psf` e `allstar`, e o código Python para a obtenção da curva de rotação da Seção 5.2.

1.1 Campos estelares densos em imagens astronômicas

Regiões com alta densidade estelar são comumente encontradas próximas ao plano da Galáxia, com $|b| \lesssim 20°$ (veja, por exemplo Jurić et al., 2008) e em campos contendo aglomerados globulares (veja como exemplo as Figuras 1.1 e 1.2). De maneira mais geral, trata-se de campos onde não existe abertura que, ao mesmo

tempo, contenha e isole dos objetos do campo o fluxo total do objeto alvo. Nessas regiões, a precisão da fotometria e da astrometria de fontes celestes - transientes em particular - é desafiadora, justamente devido à proximidade de fontes celestes luminosas que contaminam o fluxo do alvo (veja Herpich et al., 2024, Wilson and Naylor, 2022, 2018a,b).

Alguns métodos e técnicas aumentam a precisão astrométrica e fotométrica de objetos celestes que se movem nestes campos densos. A técnica de diferença de imagem (do inglês *image differencing* ou DIA) é particularmente valiosa nesse contexto, pois permite isolar o fluxo do objeto de interesse, minimizando a interferência da luz de fontes próximas (Alard and Lupton, 1998). Importante notar que os objetos de interesse, neste caso, devem apresentar variação de posição e/ou de fluxo para que o uso da técnica tenha sentido.



Figura 1.1. Um exemplo de campo estelar denso: o aglomerado globular M22 (NGC 6656) localizado na constelação de Sagitário. Esta imagem colorida foi composta a partir de imagens tomadas em julho de 1995 no telescópio Burrell Schmidt do Warner and Swasey Observatory. (disponível em https://noirlab.edu/public/images/noao-m22/).

A implementação da técnica de diferença de imagens enfrenta desafios importantes, especialmente na determinação de um kernel de convolução (veja, por exemplo Alard and Lupton, 1998, Bramich, 2008, Bramich et al., 2016), necessário para subtrair imagens de um mesmo campo tomadas em sequência, tendo em conta, por exemplo, diferentes *seeings*. O *seeing* é um termo astronômico que quantifica a turbulência atmosférica, que causa cintilação dos objetos celestes e borra suas imagens. Ele mede a nitidez das imagens de objetos celestes, como estrelas, afetada por variações na densidade do ar.

Neste trabalho, usamos a implementação da técnica de *image differencing* dada pelo DIAPL2 (Pych, 2016), que se destaca como uma ferramenta especializada e eficiente na subtração de imagens.

Vale ressaltar, novamente, que imprecisões na determinação do centroide e do fluxo de pequenos corpos inevitavelmente impedem uma precisa caracterização de suas propriedades superficiais, bem como o aprimoramento de suas órbitas (Bus and Binzel, 2002, Carvano et al., 2010, DeMeo and Carry, 2013, Popescu et al., 2018, Roh et al., 2022, Carruba et al., 2024, Banda-Huarca et al., 2019).

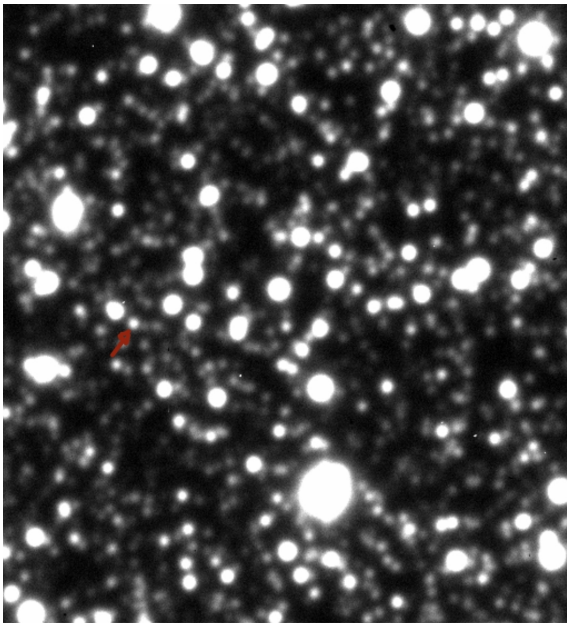


Figura 1.2. Pequeno corpo do Sistema Solar (Chariklo) em um campo estelar denso, indicado pela seta vermelha.

1.2 Fotometria

1.2.1 Imagens de CCD

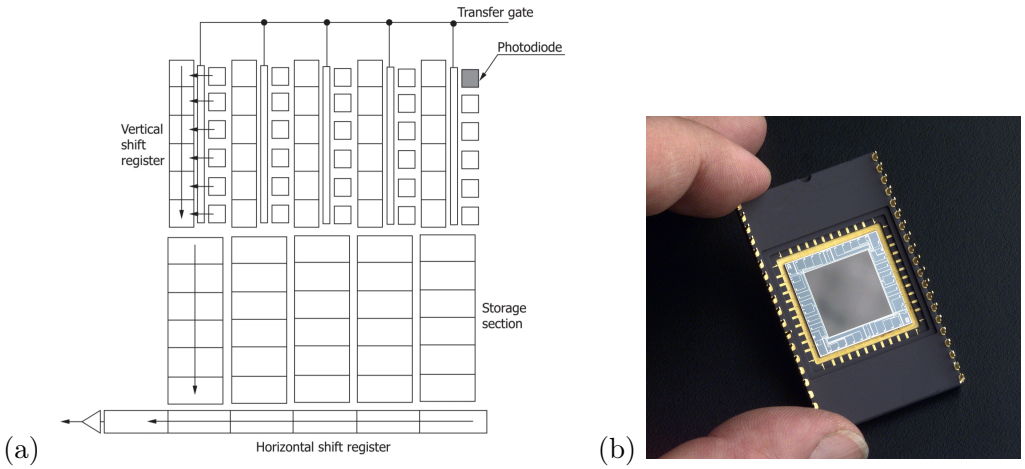


Figura 1.3. Em (a) um diagrama de um sensor CCD que ilustra como a luz capturada por fotodiodos é convertida em carga elétrica, que é temporariamente armazenada antes de ser sequencialmente transferida para registros de deslocamento vertical e horizontal. Esse processo resulta na conversão da carga em um sinal digital que forma a imagem final. O fluxo da carga através do sensor permite a captura eficiente de imagens, destacando a complexidade e precisão da tecnologia de imagem digital (disponível em https://www.hamamatsu.com/jp/en/support/faqs/ccd-image-sensor.html). Na figura (b) temos um CCD especialmente desenvolvido para imagens astronômicas no ultravioleta (disponível em `https://web.archive.org/web/20041024093006/http://technology.jpl.nasa.gov/gallery/index.cfm?page=imageDetail&ItemID=119&catId=8`.

Imagens astronômicas modernas são registradas em chips chamados CCDs, que

basicamente são circuitos eletrônicos que usam dispositivos semicondutores (veja a Figura 1.3). Nos CCDs, elétrons são transferidos como resultado da incidência de fótons e associados a um número digital (contagem) na imagem de saída. A relação entre contagem e número de elétrons é dada pelo ganho (Howell, 2000).

CCDs possuem grande eficiência quântica para luz na banda visível e no infravermelho próximo. Isto os torna detectores valiosos para capturar imagens de objetos astronômicos tênues. Além da eficiência quântica, duas outras características importantes dos CCDs são a linearidade e a saturação. A linearidade significa que há uma relação linear simples entre a quantidade de fótons que atinge um pixel e a carga (elétrons) armazenada nele (Fig. 1.4).

A saturação ocorre quando os pixels atingem sua capacidade máxima de armazenamento de carga, cessando ou dificultando a conversão de fótons em elétrons. Isso resulta em perda de detalhes e imprecisão nas imagens, onde a saturação compromete a análise do brilho de objetos celestes. A Figura 1.4 ilustra esse fenômeno, mostrando o ponto em que a relação entre a luz detectada e o sinal de saída deixa de ser linear (i.e., a relação entre fótons incidentes e sinal de saída não mais é dada por uma função linear), até o ponto onde ocorre a saturação da imagem.

No entanto, a capacidade dos CCDs de operar em condições de baixa luminosidade também traz desafios, como a maior suscetibilidade a ruídos térmicos, especialmente em exposições longas (Janesick, 2001).

Para contornar isso, sistemas de refrigeração são frequentemente utilizados para reduzir a temperatura dos CCDs, minimizando o ruído e melhorando a qualidade das imagens (Janesick, 2001). Além disso, técnicas como subtração de fundo e correção de flat-field (imagens de campo com iluminação constante e uniforme) são essenciais para corrigir variações na resposta dos pixels e garantir a fidelidade das imagens astronômicas (Howell, 2006).

1.2.2 Calibração das imagens

Depois de a imagem ser adquirida, ocorre a chamada calibração das imagens, que é quando a imagem crua (raw) vai passar por correções que vão permitir a boa determinação de posições e magnitudes instrumentais.

Na banda óptica, geralmente calibram-se as imagens cruas através de imagens bias, onde as imagens são tomadas com o menor tempo de exposição possível e obturador fechado. O bias em um CCD refere-se a um nível eletrônico gerado de forma artificial, sendo considerado como o pedestal das contagens (Wodaski, 2002).

Outra calibração feita é a calibração de $flat$, onde um campo com iluminação uniforme é observado. Pode ser um $sky\ flat$ quando o céu ainda tem alguma luminosidade devido ao Sol, ou um $dome\ flat$ quando uma parte do domo do telescópio (ou interna ao observatório) é iluminada e observada pelo CCD. Esta calibração tem como objetivo corrigir a luminosidade total recebida, tendo em conta o CCD e o sistema óptico, de forma que cada pixel do CCD armazene em média a mesma quantidade de elétrons (tendo em conta o ruído poissoniano) quando exposto a uma campo fonte uniforme de luz (Howell, 2006).

As imagens cruas passam então pela subtração de uma imagem *master bias* obtida, por exemplo, pela média das imagens tomadas para *bias* e depois pela divisão pela imagem *master flat* obtida, por exemplo, pela normalização da mediana das imagens tomadas para *flat*. Vale notar que o *master bias* é antes também subtraído

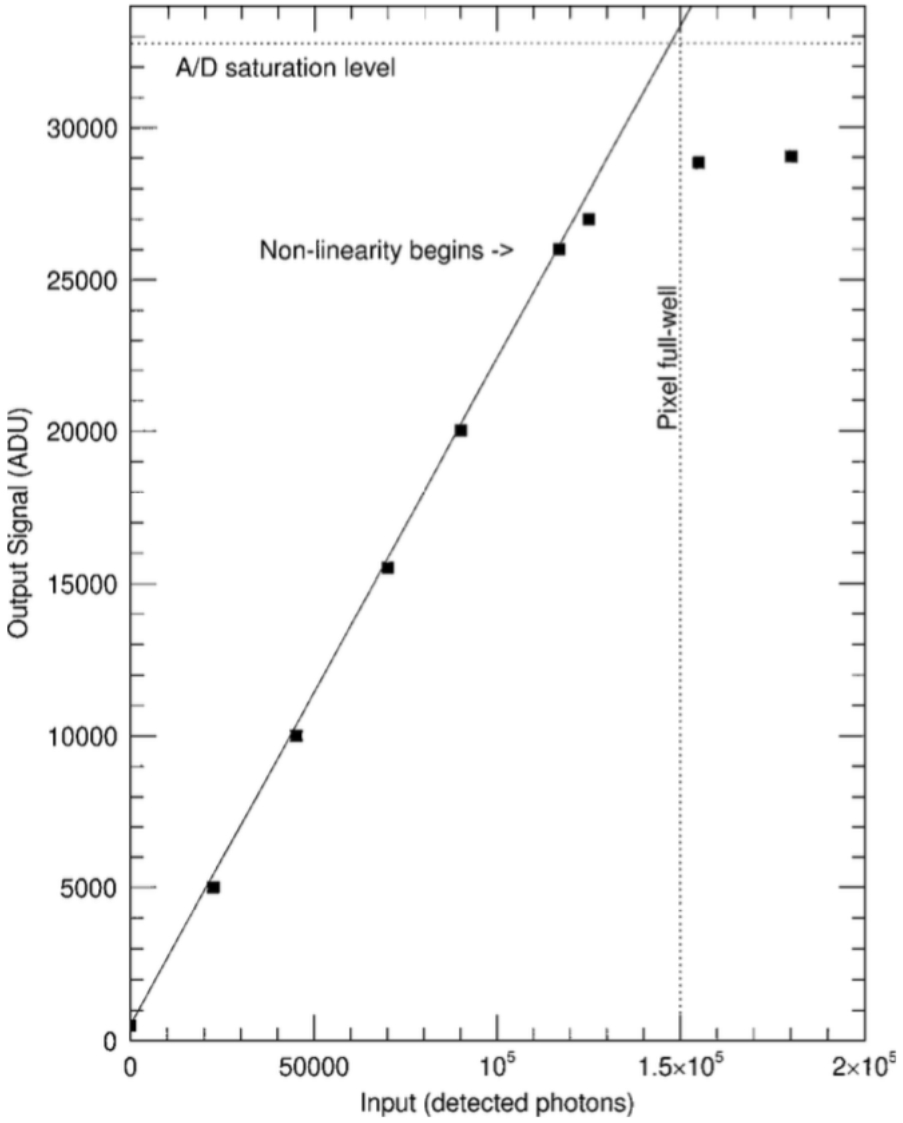


Figura 1.4. Exemplo de curva de linearidade para um CCD. Note o comportamento linear entre ∼500 ADU (Analog-to-Digital Units, ou contagens) e ∼ 26 000 ADU. A capacidade total de um píxel é de 150 000 000 elétrons (∼ 33 000 contagens). Figura original em Howell (2000), pg. 56.

de cada imagem de *flat*.

Depois de calibradas, as imagens podem ser utilizadas para se efetuarem medidas diretamente nelas, como as medidas de astrometria e fotometria, podendo ser chamadas de "imagens de ciência"(veja Castander et al., 2024).

Ruído em CCDs

O ruído em um CCD é um fator crítico que afeta a qualidade das medições fotométricas, especialmente em campos estelares densos, onde a separação entre estrelas é pequena. As principais fontes de ruído incluem: ruído de leitura, que surge no processo de conversão do sinal analógico para digital e é geralmente constante para um dado CCD (Howell, 2006); ruído térmico (ou ruído escuro), gerado por elétrons excitados termicamente, que pode ser reduzido ao resfriar o CCD (Janesick,

2001); ruído de disparo, relacionado à natureza estatística da detecção de fótons e que segue uma distribuição de Poisson; e ruído de padrão fixo, causado por variações na sensibilidade dos pixels individuais.

Esses tipos de ruído podem comprometer a precisão dos dados, aumentando a contaminação do sinal. Assim, é essencial adotar estratégias de mitigação, como calibração cuidadosa e resfriamento do CCD, para minimizar esses efeitos e obter resultados mais confiáveis (Stetson, 1987). Vale ressaltar também que correções como a de *flat*, por exemplo, têm como objetivo principal a mitigação de erros sistemáticos na medida de fluxo ao longo do CCD.

A razão sinal/ruído em um CCD é uma das quantidades mais relevantes para a qualidade das medidas por ele realizadas e, como diz o próprio nome, é obtida dividindo-se o sinal, dado pela contagem registrada do objeto, pelo ruído, levando-se em conta a estatística poissoniana que rege a transferência de elétrons estimulada por fótons do céu ou das fontes, e pela eletrônica do CCD.

1.2.3 A fotometria propriamente dita

Com exceção da Lua, do Sol e dos planetas, a grande maioria dos objetos no céu é visível com diâmetros angulares muito pequenos, muito menores do que um segundo de arco. Isso se deve ao fato de que as distâncias que os separam da Terra são sempre muito maiores do que os seus diâmetros. Na prática, isso significa que estes objetos seriam vistos da Terra praticamente como pontos, ou como diminutas figuras de espalhamento pelo efeito de difração, como vistos nos telescópios espaciais como o Hubble (Sirianni et al., 2005).

Na maioria dos CCDs, este fluxo ficaria completamente contido em um único pixel do CCD. A figura produzida por um objeto distante é, em realidade, produto deste ponto afetado pela turbulência atmosférica, gerando uma função de espalhamento pontual ou PSF, do inglês *point spread function* (Christian, 1987) que é dominada por essa turbulência. Esta PSF possui pico de fluxo no centro, que vai diminuindo rapidamente para as bordas. Mesmo com o fluxo diminuindo rapidamente do centro para as bordas, estas não devem ser desprezadas na contagem do fluxo total do objeto, visto que a área aumenta do centro para as bordas. Portanto, há muitos pixels contendo uma baixa contribuição de fluxo além dos pixels mais centrais, que detêm altas contagens.

Desta maneira, para se efetuar a medida de fluxo dos objetos na imagem observada, são empregadas duas técnicas principais: a fotometria de abertura e a fotometria via ajuste de PSF (Howell, 2006).

A fotometria de abertura simplesmente soma as contagens nos pixels do CCD que se encontram até uma distância máxima do centro do objeto. Este centro é geralmente próximo ao pixel com maior contagem de fluxo ou por uma média ponderada por essas contagens no interior de uma dada abertura. Esta técnica passa por subtrair o brilho intrínseco do céu, tomado em regiões longe dos objetos, localmente para cada fonte ou medida globalmente (Stetson, 1987). Em campos onde os objetos estão razoavelmente isolados, esta técnica apresenta excelentes resultados (Bellini et al., 2009).

Vale lembrar que, no caso de haver duas fontes muito próximas, onde a distância é semelhante à FWHM (do inglês Full Width Half Maximum ou largura à meia altura), uma fotometria de abertura não vai ser capaz de identificar a qual objeto pertence

certo fluxo, apresentando valores de brilho maiores do que aqueles efetivamente devidos ao objeto alvo em estudo.

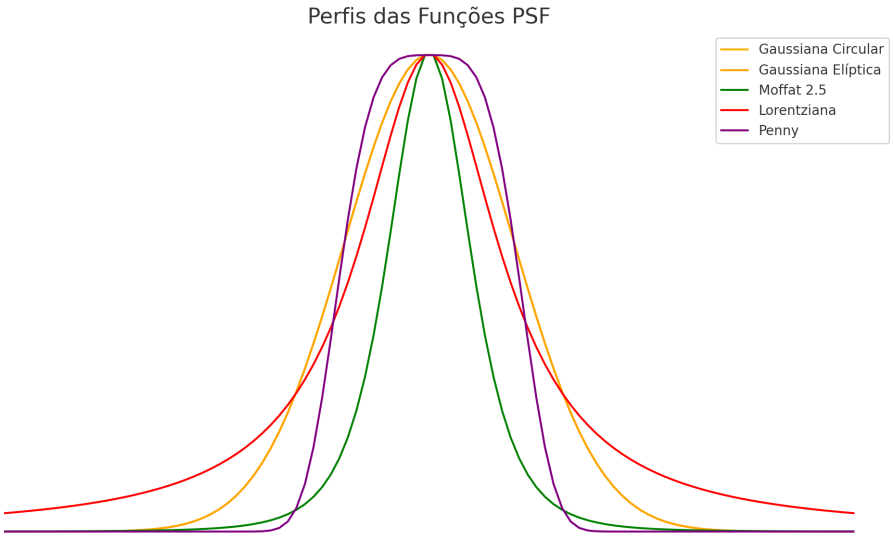


Figura 1.5. As principais funções para modelagem de PSF (do autor).

Uma melhoria à técnica de fotometria de abertura, no que diz respeito a campos estelares densos, é a fotometria PSF, onde geralmente algumas fontes são selecionadas para criação do modelo de PSF.

Para uma breve descrição da técnica, tomemos uma gaussiana circular e escolhamos algumas estrelas com alta razão sinal-ruído, longe das bordas do CCD e o mais isoladas possível (ao menos, com ausência de outros objetos brilhantes próximos da fonte). Essa gaussiana é então ajustada em todas as estrelas escolhidas de modo que um valor do σ gaussiano, esperado ser constante na imagem, seja determinado. Então, todos os outros objetos de interesse têm seus perfis de distribuição de fluxo sobre o CCD ajustados através de gaussianas circulares com esse σ, e altura variando segundo seus fluxos (veja Mighell, 2016, Massari et al., 2020).

1.3 Técnica de diferença de imagens

A técnica de análise de diferença de imagens (DIA) tem em suas aplicações medir, em uma sequência de imagens CCD de um mesmo campo no céu, variações ocorridas em posição e/ou fluxo. Inevitavelmente, a DIA precisa modelar de forma cuidadosa mudanças na astrometria, fundo de céu, transmissão do instrumento e variação de seeing entre pares de imagens (Bramich et al., 2016).

Vale destacar que a DIA é particularmente eficaz para a análise de objetos transientes em campos estelares densos, mas não é adequado para a fotometria ou astrometria de objetos siderais fixos, sendo aplicável a fontes móveis ou variáveis, podendo-se atingir incertezas próximas ao limite teórico de Poisson quando se é possível obter uma imagem de referência, aquela que será subtraída de toda a sequência de imagens CCD, com alta SNR - razão sinal-ruído (Bramich, 2008).

Uma tarefa sensível à técnica, complexa e absolutamente fundamental, é a modelagem do kernel de convolução que descreve a mudança na PSF entre as imagens.

Nesse contexto, e como apontado por Bramich et al. (2016), o trabalho de Alard and Lupton (1998) é inovador ao descrever esse kernel como uma combinação linear de funções base. Ainda, Alard and Lupton (1998) destacam a importância de que a maioria das estrelas num mesmo CCD não seja variável em fluxo por mais de 1% ou 2% e também que o seeing varie pouco ao longo do CCD.

A determinação do kernel é obtida através da solução por mínimos quadrados da equação (Alard and Lupton, 1998, Alard, 2000, Bramich et al., 2016):

$$Ref(x, y) * K(u, v) = I(x, y), \tag{1.1}$$

onde *Ref* é a imagem de referência (oriunda de coadição de imagens em nosso caso), I é a imagem a ser ajustada e o símbolo $*$ representa a operação de convolução.

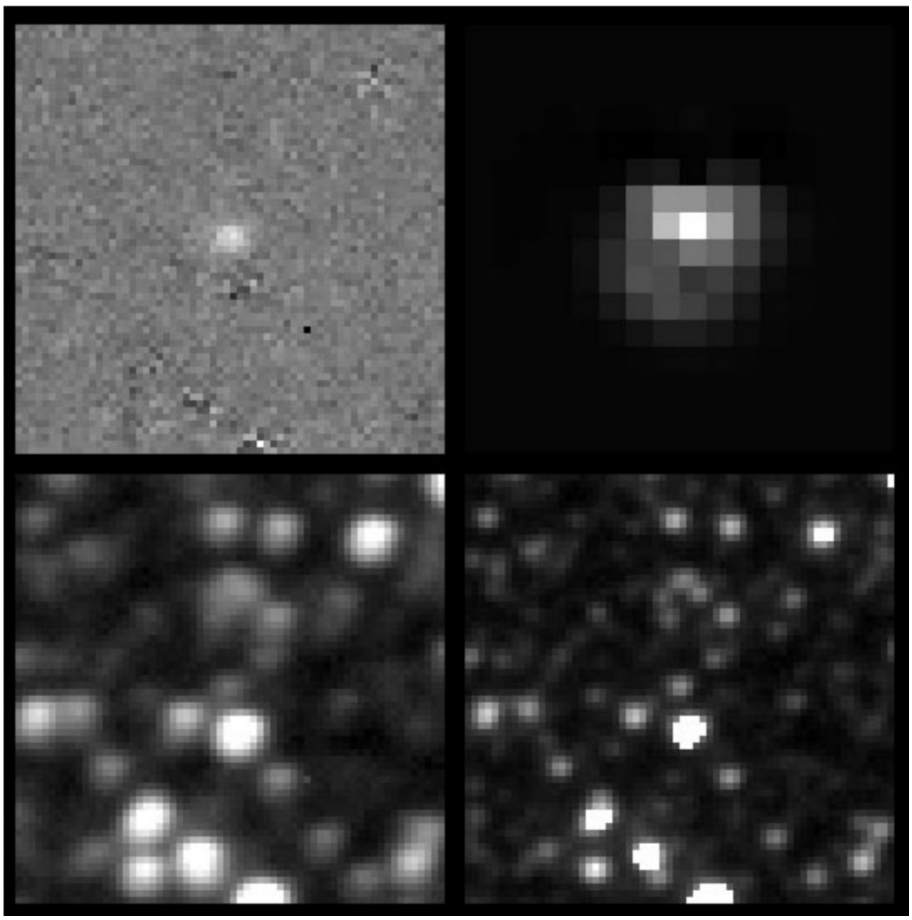


Figura 1.6. Aplicação da técnica de diferença de imagens em uma imagem de ciência (imagem inferior esquerda). Na imagem inferior direita temos uma imagem modelo, usada como referência para a aplicação da técnica. Acima temos, à direita o kernel de convolução utilizado e finalmente à esquerda a imagem subtraída (Alard and Lupton, 1998).

O kernel é então dado na forma de uma combinação linear de funções base:

$$K = \sum_{n}^{N_k} a_n(x, y)\kappa_n(u, v), \tag{1.2}$$

com

$$\kappa_{i,j,k}(u,v) = e^{-(u^2+v^2)/2{\sigma_k}^2} u^i v^j, \tag{1.3}$$

e

$$a_n(x,y) = \sum_{i,j} b_{i,j} x^i y^j. \tag{1.4}$$

onde N_k é o número de bases do kernel, u e v são coordenadas espaciais no domínio do kernel e a_n é o número de coeficientes ajustados e que variam espacialmente. Esses coeficientes também podem ser determinados separados em diferentes regiões do CCD. As bases de kernel mais comumente utilizadas são formadas por funções gaussianas moduladas por polinômio (Alard and Lupton, 1998). A imagem de diferença é então dada por:

$$D(x,y) = I(x,y) - Ref(x,y) * k(u,v) \tag{1.5}$$

A Figura 1.6 exemplifica os resultados oriundos da técnica de DIA.

1.4 Pequenos corpos do sistema solar

Este trabalho aborda os pequenos corpos do Sistema Solar, aplicando-se a asteroides, cometas, centauros e objetos situados além da órbita de Netuno. Como exemplo prático, na subseção 4.1, aplicamos a técnica de diferença de imagens para isolar o fluxo do centauro (10199) Chariklo, aprimorando a astrometria e fotometria desse objeto quando ocupava um campo no céu com alta densidade estelar.

É importante destacar que esses corpos atuam como verdadeiras cápsulas do tempo, preservando a composição química da época de formação do Sistema Solar e refletindo, em seus movimentos, a evolução dinâmica desse sistema. Esta seção se inicia com uma introdução que explora a relevância do estudo dos pequenos corpos para entender a história e a evolução do Sistema Solar.

1.4.1 Resolução B5 da IAU

A IAU (International Astronomical Union ou do português União Astronômica Internacional) estabeleceu que sejam definidas as seguintes categorias de corpos do Sistema Solar:

1. Um **planeta** é um corpo celeste que:
   (a) está em órbita ao redor do Sol,
   (b) possui massa suficiente para que sua auto-gravidade supere as forças de corpo rígido de modo que assuma uma forma de equilíbrio hidrostático (quase redonda),
   (c) limpou a vizinhança ao redor de sua órbita.

2. Um **planeta anão** é um corpo celeste que:
   (a) está em órbita ao redor do Sol,
   (b) possui massa suficiente para que sua auto-gravidade supere as forças do

corpo rígido, de modo que assuma uma forma de equilíbrio hidrostático (quase redonda),
(c) não limpou a vizinhança ao redor de sua órbita,
(d) não é um satélite.

3. Todos os outros objetos, exceto satélites, orbitando o Sol serão referidos coletivamente como "Pequenos Corpos do Sistema Solar".

1.4.2 Importância do estudo dos pequenos corpos

O estudo dos pequenos corpos do Sistema Solar, como os asteroides, cometas e objetos transnetunianos, é essencial para compreender a história e evolução do Sistema Solar. Estes corpos representam os remanescentes primordiais da nebulosa solar, a partir da qual todos os planetas e demais corpos se formaram há cerca de 4,6 bilhões de anos (Bottke et al., 2002). Eles contêm registros relativamente inalterados das condições iniciais e dos processos que prevaleceram durante as fases de formação do Sistema Solar (Bottke et al., 2002).

Estudos de meteoritos, por exemplo, revelam a cronologia dos eventos na nebulosa solar tardia e no início do Sistema Solar, embora o contexto espacial dessas informações seja limitado. Estudos composicionais de asteroides, ao elucidar as relações entre asteroides individuais e tipos específicos de meteoritos, fornecem um contexto espacial para os dados detalhados sobre meteoritos e identificam tipos de materiais não amostrados nas coleções de meteoritos terrestres (veja DeMeo et al., 2022, Neeley et al., 2014, O'Brien et al., 2007, Gomes et al., 2005).

O cinturão de asteroides, localizado entre Marte e Júpiter, é particularmente importante para entender a formação do Sistema Solar. Ele é considerado o maior reservatório de planetesimais remanescentes do Sistema Solar interno. A distribuição dos tipos espectrais dos asteroides no cinturão não é aleatória, mas segue uma tendência com a distância heliocêntrica, refletindo as condições da nebulosa solar original. Este gradiente composicional oferece pistas sobre o material e as condições presentes na nebulosa solar durante a formação dos planetas terrestres (Michel et al., 2015).

Além disso, a dinâmica dos pequenos corpos revela muito sobre a história e evolução do Sistema Solar. Modelos de evolução dinâmicos sugerem que populações de pequenos corpos guardam traços, em suas configurações atuais, da migração planetária, como descrito no modelo de Nice (Gomes et al., 2005, Tsiganis et al., 2005, Morbidelli et al., 2005). Este modelo propõe que a migração dos gigantes gasosos dispersou objetos do Sistema Solar externo para o interno e inseriu objetos primitivos transnetunianos no cinturão de asteroides. Esse movimento dos planetas gigantes poderia ter perturbado o material original no cinturão, resultando na mistura de materiais formados em mais alta e mais baixa temperatura observados atualmente (Michel et al., 2015, Bottke et al., 2002).

As colisões entre pequenos corpos também desempenharam um papel significativo na evolução do cinturão de asteroides. Tais colisões podem fragmentar corpos maiores em menores, contribuindo para a distribuição de tamanhos observada hoje. Este processo de evolução colisional é essencial para entender a história dos asteroides e os impactos que moldaram as superfícies dos planetas terrestres (Bottke et al., 2002).

Estudos mais recentes focam na observação detalhada desses corpos com base em observações oriundas de missões espaciais e de grandes levantamentos, como o DES (Dark Energy Survey)[1], J-Plus (Javalambre Photometric Local Universe Survey)[2], Col-OSSOS (Colours of the Outer Solar System Origins Survey)[3], bem como o LSST (Legacy Survey of Space and Time)[4]. Por exemplo, a missão Gaia (Lindegren et al., 2021) está fornecendo posições astrométricas precisas para centenas de milhares de asteroides, permitindo melhorias significativas na determinação das órbitas, impactando diretamente em previsões mais precisas de eventos de ocultações estelares. Na subseção seguinte, discutiremos mais sobre ocultações estelares, destacando, por exemplo, sua importância na determinação dos diâmetros e de outras características dos pequenos corpos.

1.4.3 Ocultações estelares

As ocultações estelares são eventos astronômicos nos quais um corpo passa na frente de uma estrela, bloqueando temporariamente sua luz. Ao analisar a variação da luz durante a ocultação, pode-se obter informações sobre tamanho, forma, albedo, astrometria precisa, descoberta/estudo de anéis, detecção de atmosferas e outras estruturas (veja, por exemplo, Gomes-Júnior et al., 2022, Morgado et al., 2022).

Um exemplo importante da observação e análise das ocultações estelares é a descoberta de um sistema de anéis ao redor do Centauro (10199) Chariklo (Braga-Ribas et al., 2014). Essa descoberta marcou a primeira detecção clara de anéis em um pequeno corpo do Sistema Solar, permitindo expandir a compreensão sobre a diversidade de estruturas presentes nesses corpos. A análise da ocultação revelou dois anéis densos compostos parcialmente por gelo de água, sugerindo a presença de outros materiais voláteis.

Outro marco importante nesse estudo foi a descoberta de um anel ao redor do planeta anão Haumea (Ortiz et al., 2017). Haumea, conhecido por sua forma alongada e rápida rotação, é um dos maiores objetos transnetunianos (TNOs). A detecção do anel em Haumea abriu novas questões sobre a formação e evolução de anéis em TNOs e como esses anéis podem estar relacionados à história colisional desses objetos (Winter et al., 2019).

Ocultações estelares também têm sido fundamentais para estudar as atmosferas de Plutão e Tritão. Dias-Oliveira et al. (2015) utilizaram dados de ocultações estelares para analisar a atmosfera de Plutão, revelando um aumento na pressão atmosférica entre 2012 e 2013, consistente com a expansão observada na atmosfera do planeta anão. Em relação a Tritão, Sicardy et al. (2024) e Marques Oliveira et al. (2022) investigaram sua atmosfera através de ocultações estelares entre 1989 e 2022, fornecendo informações relevantes sobre a pressão atmosférica e sua evolução ao longo do tempo.

Além de revelar a presença de anéis e estudar atmosferas, as ocultações estelares também têm sido utilizadas para determinar com precisão as posições astrométricas de TNOs e Centauros (Rommel et al., 2020). Ao analisar dados de várias ocultações, os pesquisadores obtiveram posições astrométricas para diversos objetos, com alta

[1] https://www.darkenergysurvey.org/
[2] https://www.j-plus.es/
[3] https://www.colossos.net/
[4] https://www.lsst.org/

precisão. Essas informações são fundamentais para aprimorar as efemérides dos objetos e prever futuras ocultações estelares com maior precisão (poucos *mas*).

O estudo recente de Rommel et al. (2023) investigou o TNO (307261) 2002 MS4 através de nove eventos de ocultação estelar. A análise permitiu determinar o tamanho, a forma e o albedo geométrico do objeto, além de revelar características topográficas em sua superfície, como uma depressão profunda e uma elevação proeminente. Essas descobertas sugerem que 2002 MS4 pode ter passado por um impacto significativo no passado (veja também Rommel et al., 2021).

As ocultações estelares também têm sido utilizadas para estudar satélites naturais, como, por exemplo, o satélite com formato irregular Phoebe de Saturno. Gomes-Júnior et al. (2020) relataram as primeiras ocultações estelares observadas por Febe, as quais, corroboradas pela literatura e outras observações, forneceram informações sobre seu período de rotação e posição astrométrica geocêntrica.

1.4.4 Tipos de pequenos corpos

Asteroides

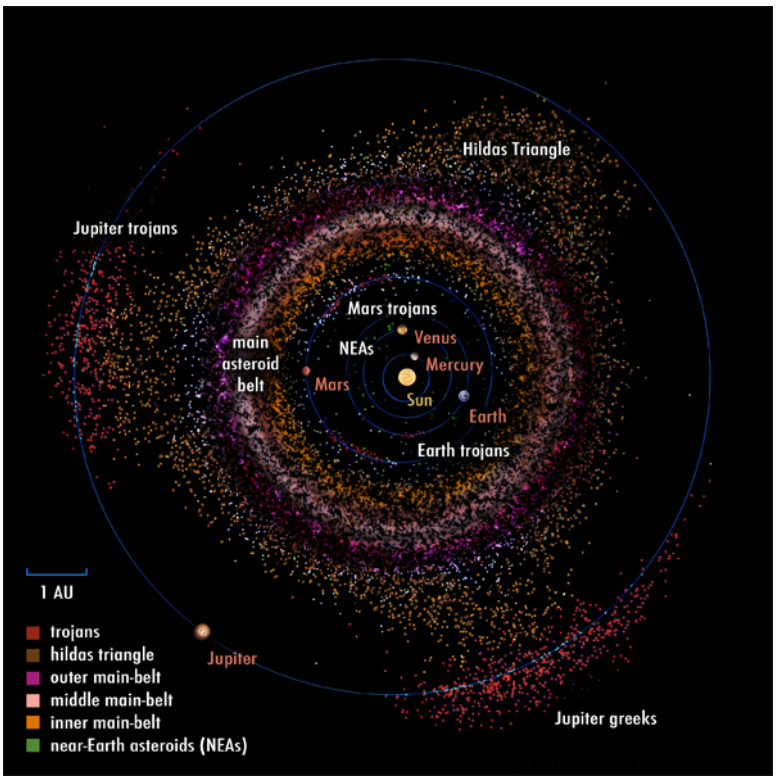


Figura 1.7. Vista superior dos objetos do sistema solar interno. Autor: Pablo Carlos Budassi (disponível no link).

Os asteroides, corpos celestes que orbitam o Sol principalmente entre as órbitas de Marte e Júpiter, no cinturão de asteroides, representam vestígios cruciais para a compreensão da formação e evolução do sistema solar. Esses objetos, variando em tamanho desde pequenas rochas espaciais até corpos com centenas de quilômetros de diâmetro, oferecem um entendimento importante sobre os primeiros estágios do sistema solar e os processos que moldaram os planetas terrestres (veja Carry, 2012,

Bottke et al., 2002). Alguns dos principais estudos sobre asteroides são:

- **Composição e estrutura interna:** A análise da composição química e mineralógica dos asteroides, por meio de meteoritos (fragmentos de asteroides que caem na Terra), observações e missões espaciais, revela a diversidade de materiais presentes na nebulosa solar primitiva. Isso nos permite entender a distribuição dos elementos químicos e os processos de diferenciação que ocorreram nos primeiros milhões de anos do Sistema Solar (Veja Galinier et al., 2024, Raducan et al., 2024, Korda et al., 2023, Carry et al., 2021, 2019, McSween, 1999).

- **Datação radiométrica:** A datação radiométrica de meteoritos, que utiliza a taxa de decaimento de elementos radioativos, fornece idades precisas para os asteroides e, por extensão, para os eventos que marcaram o início do Sistema Solar. Essas idades nos permitem construir uma linha do tempo da formação e evolução dos planetas (Connelly et al., 2012).

- **Registros de colisões:** A análise das crateras e da estrutura interna dos asteroides revela um registro detalhado dos eventos de impacto que moldaram a evolução do Sistema Solar. O trabalho de Bottke et al. (2005) demonstra como a distribuição de tamanho e a estrutura das famílias de asteroides, formadas por muitas colisões, fornecem informações importantes sobre a frequência e a magnitude desses eventos ao longo do tempo. A compreensão da história colisional do cinturão de asteroides principal, por sua vez, permite inferir a taxa de impactos sofridos pelos planetas terrestres, incluindo a Terra, e avaliar o papel desses eventos na evolução geológica e no potencial para o desenvolvimento da vida (Zenhäusern et al., 2024, Novaković et al., 2022, Hefele et al., 2020, Bottke et al., 2007, Sleep et al., 2001).

- **Migração planetária:** A distribuição orbital dos asteroides, em particular a existência de grupos distintos com características orbitais semelhantes, fornece evidências da migração dos planetas gigantes, como Júpiter e Saturno, durante os primeiros estágios do Sistema Solar. Essa migração teria perturbado as órbitas dos asteroides, espalhando-os por diferentes regiões e influenciando a formação dos planetas terrestres (Veja Lykawka and Ito, 2023, Pirani et al., 2019, Tsiganis et al., 2005, Walsh and Morbidelli, 2011, Walsh et al., 2011).

- **Formação planetária:** A análise da composição isotópica de meteoritos, que mede a abundância relativa de diferentes isótopos de um elemento químico, revela a origem dos materiais que formaram os planetas terrestres. Essa análise indica que a Terra e outros planetas rochosos se formaram a partir da acreção de planetesimais, que são corpos sólidos com algumas dezenas de quilômetros de diâmetro, formados a partir da colisão e aglutinação de partículas de poeira na nebulosa solar (Mah et al., 2022, Pfalzner et al., 2015, Klahr and Schreiber, 2016, Johansen et al., 2014, Day, 2015).

Os asteroides são compostos predominantemente de minerais rochosos e metálicos, com alguns contendo uma mistura significativa de gelo de água e compostos orgânicos. A diversidade composicional dos asteroides sugere uma formação variada, dependendo da distância do Sol e das condições predominantes no sistema solar primitivo (Bus and Binzel, 2002). Além disso, os asteroides exibem uma ampla gama

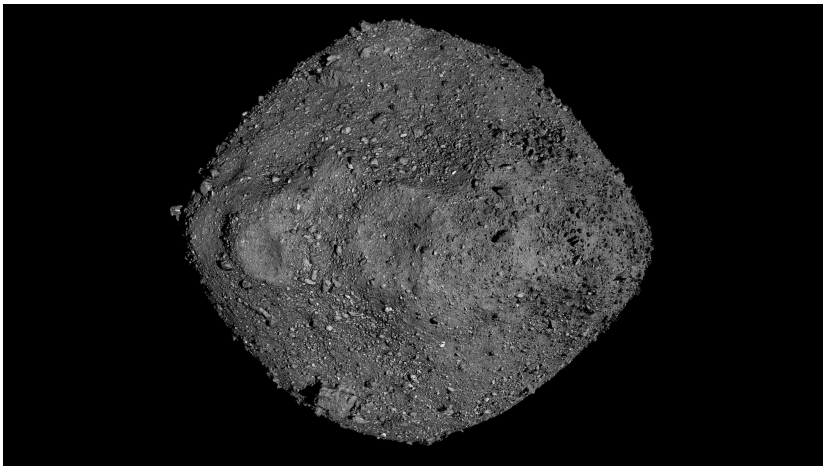


Figura 1.8. Este mosaico de Bennu foi criado a partir de observações realizadas pela sonda OSIRIS-REx da NASA, que permaneceu em estreita proximidade com o asteroide por mais de dois anos (disponível em https://www.nasa.gov/news-release/nasa-spacecraft-provides-insight-into-asteroid-bennus-future-orbit/).

de órbitas, com alguns cruzando a órbita da Terra, denominados NEAs (Near-Earth Asteroids ou em português: asteroides próximos da Terra), representando tanto uma oportunidade científica quanto um possível perigo de impactos com a Terra (Morbidelli et al., 2002).

Os asteroides são classicamente divididos em várias classes com base em suas características espectrais, que são indiretamente indicativas de sua composição. As principais classes incluem os tipos S (silicatos), C (carbonáceos) e M (metálicos) (Tholen, 1989). Os asteroides tipo C, que são os mais comuns, são particularmente interessantes por conterem compostos orgânicos e, possivelmente, moléculas prebióticas, sugerindo que asteroides podem ter desempenhado um papel na entrega de materiais orgânicos essenciais para o desenvolvimento da vida na Terra (Morbidelli, 2001).

A investigação dos asteroides é fundamental para a ciência planetária, pois proporciona um indício dos processos de acreção e diferenciação que ocorreram no início da história do sistema solar. Missões espaciais a asteroides, como a missão OSIRIS-REx da NASA ao asteroide Bennu (Figura 1.8), têm como objetivo retornar amostras desses corpos para a Terra, proporcionando dados inestimáveis para o estudo da química, mineralogia e história geológica dos primeiros momentos do sistema solar (Lauretta and Michel, 2018).

Cometas

Um cometa é um pequeno corpo do Sistema Solar composto principalmente de gelo, poeira e rochas, que, ao se aproximar do Sol, aquece, liberando gases e partículas que formam uma atmosfera brilhante chamada coma e, frequentemente, uma ou mais caudas que se estendem para longe do Sol devido à radiação e ao vento solares (Carroll and Ostlie, 1996).

O interesse científico nos cometas tem crescido consideravelmente com o desenvolvimento da tecnologia espacial, permitindo missões que nos proporcionam uma visão mais detalhada desses objetos. A missão Rosetta, da Agência Espacial Eu-

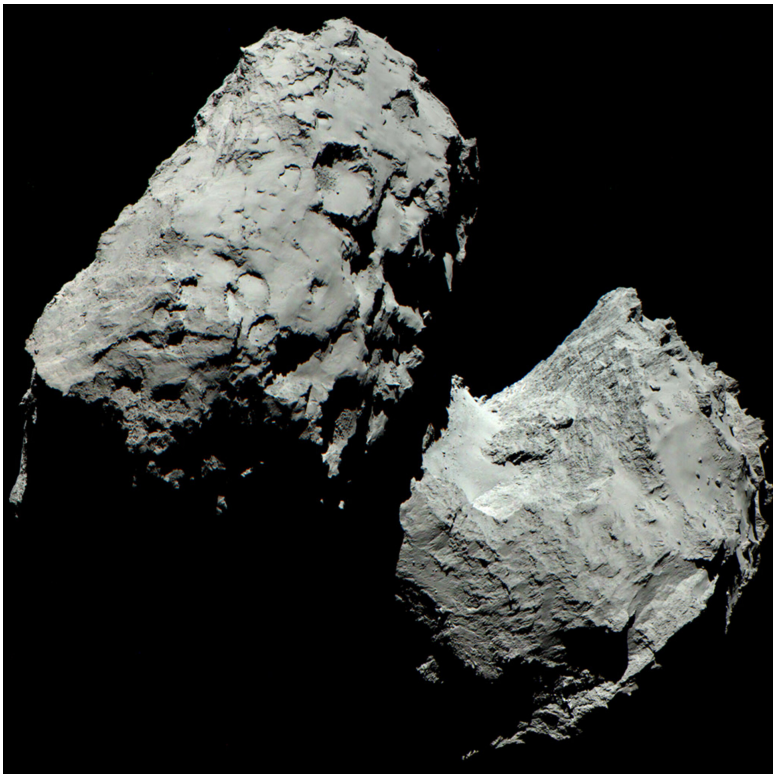


Figura 1.9. Imagem do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, capturada e tratada pela sonda Rosetta com filtros vermelho, verde e azul (disponível no link).

ropeia (ESA), que pousou no cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (Figura 1.9) em 2014, é um exemplo marcante dessa exploração, revelando informações sobre a composição química e física dos cometas, como a detecção de moléculas complexas, composição isotópica de água, presença de oxigênio molecular e estudos sobre estrutura física e topografia interna, como mostrado em Altwegg et al. (2015), Bieler et al. (2015) e Thomas et al. (2015).

Os cometas são classificados em duas categorias principais com base em seus períodos orbitais: cometas de curto período, que têm órbitas que os trazem de volta ao interior do sistema solar em menos de 200 anos, e cometas de longo período, cujas órbitas podem levar milhares de anos para completar. Esta classificação não apenas reflete as diferenças em suas trajetórias orbitais, mas também sugere diferentes regiões de origem. Os cometas de curto período são geralmente considerados como originários do Cinturão de Kuiper, enquanto os de longo período são mais provavelmente provenientes da Nuvem de Oort, uma esfera hipotética distante de corpos gelados que envolve o sistema solar (Levison, 1996).

A importância dos cometas vai além de sua fascinação visual no céu noturno. Eles são considerados cápsulas do tempo, contendo material remanescente da nebulosa a partir da qual o sistema solar se formou. Portanto, o estudo dos cometas pode oferecer uma compreensão relevante sobre a química primordial do sistema solar e, por extensão, sobre a origem da vida na Terra. Algumas teorias sugerem que os cometas podem ter desempenhado um papel crucial no fornecimento de água e compostos orgânicos para a Terra primitiva, contribuindo assim para o surgimento da vida (Hartogh et al., 2011).

MBCs (Main Belt Comets)

Cometas do Cinturão Principal representam uma classe intrigante de objetos dentro do sistema solar, desafiando a tradicional separação entre asteroides e cometas. Historicamente, os cometas eram identificados por suas caudas gasosas e órbitas altamente elípticas, sugerindo sua proveniência das regiões frias e distantes do sistema solar, como a Nuvem de Oort ou o Cinturão de Kuiper (Ferellec et al., 2023, Jewitt and Hsieh, 2022). Entretanto, com a descoberta dos Cometas do Cinturão Principal, essa distinção tornou-se menos clara. Os MBCs orbitam dentro do cinturão de asteroides, entre Marte e Júpiter, uma região até então não associada à atividade cometária tradicional (Hsieh and Jewitt, 2006).

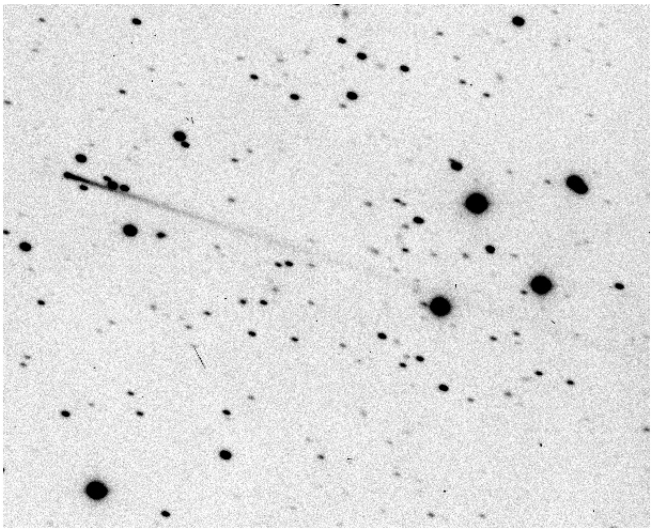


Figura 1.10. MBC 133P/Elst-Pizarro apresentando uma cauda de poeira extremamente estreita e pronunciada, sem presença de coma, estendendo-se além do campo de visão da imagem original (disponível em https://www.eso.org/public/images/eso9637a/).

O primeiro MBC identificado foi o 133P/Elst-Pizarro (Figura 1.10), em 1996, por Eric W. Elst e Guido Pizarro. Sua órbita está bem dentro do cinturão de asteroides, e ele exibe uma cauda de poeira, característica comum de cometas, sugerindo a presença de gelo sublimando sob a superfície (Licandro et al., 2011). O que torna os MBCs particularmente notáveis é que eles desafiam nossa compreensão de como e onde os corpos do sistema solar retêm gelo. A presença de gelo nos MBCs sugere que eles são remanescentes do início do sistema solar que conseguiram preservar gelo apesar de sua proximidade com o Sol, ou que processos ainda não completamente entendidos estão ocorrendo para trazer gelo para a superfície desses objetos (Kelley et al., 2023, Snodgrass et al., 2017).

A identificação e estudo dos MBCs têm implicações significativas para a ciência planetária. Primeiro, eles oferecem uma oportunidade para entender melhor os processos de diferenciação planetária e a distribuição de água no sistema solar primitivo. Além disso, os MBCs podem fornecer respostas sobre a evolução dinâmica do sistema solar, especialmente em termos de migração de planetas gigantes e a consequente reorganização do cinturão de asteroides (Walsh et al., 2011). Por fim, o estudo dos MBCs também pode contribuir para nossa compreensão de potenciais ameaças à Terra, já que a atividade de sublimação pode influenciar as órbitas desses corpos, potencialmente trazendo-os para mais perto da Terra.

Centauros

Os Centauros são pequenos corpos que se encontram em uma região dinamicamente instável do sistema solar compreendida entre as órbitas de Júpiter e Netuno. Esses objetos representam um elo crítico entre os corpos rochosos do sistema solar interior e os objetos gelados do cinturão de Kuiper e da Nuvem de Oort. A caracterização dos Centauros proporciona informações cruciais sobre a formação e a evolução do sistema solar, além de contribuir para a compreensão da transição de corpos gelados para corpos rochosos (Galiazzo et al., 2019, Grazier et al., 2019).

Acredita-se que esses objetos sejam antigos residentes do cinturão de Kuiper ou da Nuvem de Oort que foram deslocados para a sua atual localização por interações gravitacionais com os gigantes gasosos (Jewitt, 2009). Esse processo de migração é apoiado pela análise das órbitas desses corpos, que frequentemente exibem uma grande excentricidade e inclinação, indicativo de perturbações passadas (Horner and Lykawka, 2010).

Uma característica distintiva dos Centauros é a sua composição. Muitos desses objetos apresentam características espectrais que sugerem uma superfície rica em compostos orgânicos e possivelmente água na forma de gelo (Dotto et al., 2008). Essa composição é similar à de cometas, sugerindo uma origem comum ou processos de formação semelhantes. A presença de água e compostos orgânicos nesses corpos reforça a ideia de que asteroides e cometas podem ter sido fontes importantes de água e materiais orgânicos para a Terra primitiva, possivelmente contribuindo para o surgimento da vida no planeta (Chyba, 1990).

A dinâmica orbital dos Centauros é outro campo de estudo que atrai grande interesse. Por cruzar uma ou mais órbitas dos planetas gigantes, as órbitas dos Centauros são inevitavelmente instáveis. Essas interações gravitacionais intensas podem desestabilizar suas trajetórias, levando a mudanças drásticas em seus parâmetros orbitais, como semieixo maior, excentricidade e inclinação.

Em casos extremos, esses encontros podem resultar na ejeção completa dos Centauros do Sistema Solar, lançando-os no espaço interestelar ou direcionando-os para órbitas que cruzam as dos planetas internos (Namouni, 2024, Namouni and Morais, 2020, Araujo et al., 2018, Cabral et al., 2019, Tiscareno and Malhotra, 2003). Esta instabilidade orbital faz com que os Centauros tenham uma expectativa de vida relativamente curta, em termos astronômicos, variando de alguns milhões a algumas dezenas de milhões de anos (Di Sisto and Brunini, 2007).

(10199) Chariklo

Nesta parte da introdução, apresentamos brevemente um texto sobre o centauro (10199) Chariklo, objeto cujas imagens foram usadas para a aplicação das técnicas descritas neste trabalho, bem como para a obtenção de resultados importantes para astrometria e fotometria.

O asteroide (10199) Chariklo, foi descoberto em 15 de fevereiro de 1997 pelo astrônomo James V. Scotti no Observatório Nacional Kitt Peak, localizado no Arizona, EUA (Schmadel, 2007). Pesquisas mais aprofundadas indicaram que Chariklo, na verdade, pertence a uma categoria distinta de corpos celestes, os Centauros, que são caracterizados por suas órbitas instáveis que cruzam as órbitas dos gigantes gasosos como Saturno e Urano (Sheppard et al., 2000).

Chariklo apresenta um diâmetro médio de cerca de 250 km (Morgado et al.,

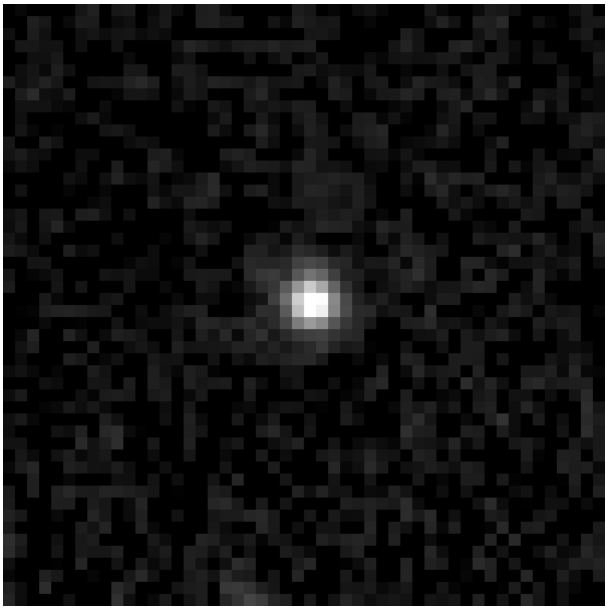


Figura 1.11. O centauro (10199) Chariklo, detectado pelo instrumento WFC3 do Telescópio Espacial Hubble em 17 de junho de 2015 (Sicardy et al., 2015).

2021), sendo reconhecido como o maior Centauro conhecido até o momento. Este Centauro possui uma forma notavelmente alongada, com dimensões estimadas em 287.6 × 270.4 × 198.2 km (Morgado et al., 2021). Sua superfície, escura e rica em compostos carbonáceos, tem um baixo albedo geométrico de 0.035 ± 0.010 (Fornasier et al., 2013), refletindo uma pequena fração da luz solar que recebe.

A órbita de Chariklo, situada entre Saturno e Urano, é completada a cada 64,63 anos. Sua trajetória elíptica tem um semieixo maior de 15,771 Unidades Astronômicas (UA), excentricidade de 0,168 e período orbital de $7,004 \pm 0,036$ h (Fornasier et al., 2014). Essas características sugerem que Chariklo pode originalmente ter sido um objeto transnetuniano, que foi deslocado para uma órbita mais próxima do Sol por perturbações gravitacionais provocadas por Urano há menos de 10 milhões de anos (Horner et al., 2004).

Além disso, apesar da ausência de atividade cometária típica, a órbita de Chariklo está próxima de uma ressonância orbital 4:3 com Urano (Horner et al., 2004). Isso significa que a cada três órbitas completadas por Urano, Chariklo completa quatro. Esta peculiar relação de ressonância contribui significativamente para a estabilidade a longo prazo da órbita de Chariklo, protegendo-o contra ejeções do Sistema Solar e proporcionando estudos de caso sobre a interação gravitacional entre corpos celestes.

Descoberta de anéis

A descoberta dos anéis ao redor de Chariklo, representa um marco significativo no estudo de pequenos corpos do Sistema Solar, especialmente para os Centauros. Em 2014, Braga-Ribas et al. (2014) revelaram a existência de dois anéis estreitos e densos circundando este corpo, desafiando as expectativas anteriores de que sistemas de anéis estavam restritos a planetas gigantes gasosos como Saturno e Júpiter.

Esta descoberta foi feita através da técnica de ocultação estelar, em que Chariklo passou à frente de uma estrela distante, ocultando sua luz e permitindo a detecção

dos anéis com base na diminuição do fluxo de luz da estrela ocultada. A ocultação revelou não apenas um, mas dois anéis com profundidades ópticas distintas, medindo cerca de 7 km e 3 km de largura, respectivamente, com raios orbitais de 391 km e 405 km (Braga-Ribas et al., 2014).

A importância dessa descoberta propiciou implicações importantes para uma melhor compreensão da formação e estabilidade de anéis em outros pequenos corpos. A presença de anéis ao redor de um objeto tão pequeno quanto Chariklo sugere que os processos dinâmicos envolvidos na formação de anéis podem ser mais comuns e variados do que anteriormente supostos, potencialmente aplicáveis a uma ampla gama de ambientes dinâmicos (Donnison, 2006).

Esses resultados abriram novas perspectivas para a investigação de pequenos corpos no Sistema Solar. Além de Chariklo, posteriormente foram descobertos sistemas de anéis em Haumea (Ortiz et al., 2017) e 50000 Quaoar (Morgado et al., 2023, Pereira et al., 2023), ambos objetos transnetunianos (TNOs). Essas descobertas possibilitam uma revisão das teorias existentes sobre a migração e evolução desses pequenos corpos (Ortiz et al., 2017), além de exigir a continuação de observações detalhadas para explorar esses fenômenos.

TNO's (Trans-Neptunian Objects)

Os Trans-Neptunian Objects (ou no português Objetos Transnetunianos) são corpos localizados no Sistema Solar externo, além da órbita de Netuno. Essa região do Sistema Solar é vasta e ainda pouco explorada, mas estudos recentes têm revelado uma diversidade significativa de objetos com características distintas, que incluem planetas anões, como Éris, Plutão, Makemake e Haumea.

A descoberta do primeiro objeto transnetuniano, excetuando-se Plutão, foi feita em 1992 por Jewitt e Luu, marcando o início de uma nova era na astronomia planetária (Jewitt and Luu, 1993). Esse objeto, denominado (15760) 1992 QB1, abriu caminho para a identificação de milhares de outros objetos na região transnetuniana. Essas descobertas foram possíveis devido ao avanço tecnológico em telescópios e sistemas de detecção, que permitiram observações mais detalhadas e profundas do espaço.

A importância dos objetos transnetunianos reside não apenas na ampliação de nosso conhecimento sobre o Sistema Solar, mas também na compreensão da formação e evolução planetária. Assim, o estudo desses objetos pode oferecer respostas sobre os processos químicos e físicos que ocorreram no início da formação do Sistema Solar (Jewitt et al., 2008).

A região transnetuniana é composta por várias populações de objetos, incluindo o Cinturão de Kuiper, o Disco disperso e a Nuvem de Oort. O Cinturão de Kuiper, em particular, é uma área densamente povoada, situada entre 30 e 50 unidades astronômicas (AU) do Sol, onde se encontram muitos dos TNO's conhecidos (Gladman et al., 2008). A composição dos objetos transnetunianos é outro aspecto de grande interesse científico. Estudos espectroscópicos indicam que muitos TNO's são ricos em compostos voláteis, como metano, nitrogênio e água congelada (Jewitt et al., 2008, Barucci et al., 2008). Essas descobertas são essenciais para entender a distribuição de materiais voláteis no Sistema Solar externo e suas implicações para a formação de ambientes potencialmente habitáveis em outros sistemas planetários.

Além disso, a dinâmica dos objetos transnetunianos permite uma melhor com-

preensão sobre processos de formação e evolução do Sistema Solar. A presença de ressonâncias orbitais e a distribuição espacial dos TNO's fornecem evidências de migrações planetárias passadas e interações gravitacionais que moldaram a estrutura atual do Sistema Solar (Tsiganis et al., 2005).

No capítulo seguinte, detalharemos a metodologia adotada nesta dissertação para o estudo de pequenos corpos em campos densos do céu, explicando a escolha de cada técnica em função dos objetivos estabelecidos.

Capítulo 2

Ferramentas

2.1 Preâmbulo

Aqui, vale enfatizar resumidamente o que conduz nossos passos em direção aos objetivos pretendidos: astrometria e fotometria de pequenos corpos em campos estelares densos.

Em primeiro lugar, não há - ou não conseguimos ver - como melhorar a astrometria e fotometria de objetos fixos com a técnica de diferenças de imagens (DIA). Portanto, no que diz respeito a estrelas de referência, a técnica não é aplicada e, por isso, buscamos verificar se a astrometria oriunda do PRAIA para estrelas nesses campos é competitiva. Essa verificação é feita comparando-se resultados oriundos do PRAIA com os do pacote DAOPHOT, descrito a seguir e concebido para fotometria em campos densos. Essa comparação é feita através da construção de uma imagem sintética densamente populada, de forma que nos são conhecidas as coordenadas verdadeiras dos centroides dos objetos.

Para o objeto móvel, o ganho vem de se isolar seu fluxo dos objetos de campo através do pacote DIAPL2.

Nas imagens subtraídas, aquelas oriundas do uso do DIAPL2 e que idealmente contêm apenas o fluxo do objeto móvel, a astrometria fica impossibilitada pela ausência de estrelas de referência. Neste ponto, é necessário que o PRAIA seja usado em dois diferentes conjuntos de imagens.

O primeiro conjunto é aquele que contém todos os objetos (estrelas e alvo). O segundo conjunto é aquele que contém apenas o alvo. As coordenadas (x, y) sobre o CCD calculadas pelo PRAIA, livres da influência de fluxos espúrios e oriundas do segundo conjunto, são inseridas nos respectivos arquivos com as coordenadas (x, y) oriundas da aplicação do PRAIA nos conjuntos com todos os objetos. Como a subtração de imagens implica num alinhamento muito preciso entre elas (ciência e imagem modelo - aquela na qual o objeto móvel está ausente), podemos dizer que as coordenadas (x, y) obtidos para o objeto alvo e aqueles oriundos das imagens com as estrelas de referência estão num mesmo referencial (formado pelas linhas e colunas do CCD). Dessa forma, as posições do alvo, oriundas do cálculo de centroides livres de fluxos espúrios, podem ser determinadas com precisão competitiva. Essa boa precisão é atestada pela comparação das posições observadas e assim determinadas com aquelas calculadas através de efemérides refinadas por dados de ocultações estelares.

A fotometria, de abertura, é calculada diretamente sobre as imagens subtraídas

(aquelas que contêm apenas o objeto alvo).

2.2 IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)

O conjunto de pacotes e tarefas Image Reduction and Analysis Facility (Tody, 1986) ou IRAF, é uma ferramenta extensamente utilizada pela comunidade astronômica para realizar análises de imagens astronômicas, sejam elas imagens fotométricas ou espectroscópicas. Entre vários pacotes inseridos neste conjunto, está aquele destinado à fotometria de fontes pontuais em imagens de CCD, chamado Dominion Astrophysical Observatory Photometry, mais conhecido como DAOPHOT (Stetson, 1987).

O DAOPHOT contém uma série de tarefas para a detecção, seleção de fontes, fotometria de abertura e fotometria via ajuste de PSF. A partir de uma imagem, e do IRAF ou DAOPHOT standalone instalados, estas tarefas são realizadas através de linhas de comando em um terminal de computador. Estas tarefas ainda podem ser organizadas em scripts do tipo *shell*, onde várias tarefas podem ser rodadas em sequência.

Como citado anteriormente, o DAOPHOT tem se consolidado como um padrão na detecção de fontes pontuais, sendo utilizado desde a sua liberação pública até os dias atuais. Inúmeros artigos fizeram e fazem uso de seus resultados (veja, para citar um exemplo, Zhang and Kainulainen, 2019). A facilidade de instalação e disponibilidade nos fizeram escolher este pacote para uma comparação com o PRAIA, pacote o qual queremos ajudar na melhoria da determinação de centroides de objetos do sistema solar em campos densos. Neste trabalho, também usamos o DAOPHOT porque ele dispõe de parâmetros similares aos disponíveis no PRAIA, como, por exemplo, as funções para ajuste de PSF. Iremos, portanto, descrever os procedimentos e demais parâmetros utilizados para o DAOPHOT com o objetivo de verificar sua capacidade de centragem de objetos em campos densos.

2.2.1 DAOPHOT

Nesta seção são expostas passo a passo as tarefas executadas pelo DAOPHOT na detecção, fotometria de abertura, seleção de estrelas para compor a PSF típica, caracterização da PSF e, finalmente, fotometria PSF.

daofind

O primeiro passo para proceder à fotometria de fontes em uma imagem astronômica é obter uma lista de posições dos objetos a serem medidos. Para isso, tendo uma imagem astronômica de um telescópio e instrumento em mãos, é necessário informar ao sistema as configurações da imagem, como:

- Fator de escala (`scale`);
- FWHM (`fwhmpsf`);
- Erro estatístico das contagens de fundo do céu (`sigma`).

Além disso, uma série de parâmetros para detecção deve ser configurada, incluindo:

- `Threshold` (limiar) para detecção de picos de fluxo;
- Parâmetros para recentragem de objetos.

Havendo configurado esses parâmetros inicialmente, pode-se proceder à primeira tarefa do DAOPHOT, que é executar o algoritmo de detecção sobre a imagem. O algoritmo de detecção do `daofind` lista todos os centroides das fontes com densidade máxima local, considerando a FWHM típica (informada pelo usuário) e picos cujo fluxo excede o `threshold`, medidos em sigmas acima das contagens de fundo do céu.

A tarefa `daofind` também faz uso de parâmetros relacionados à forma, como `sharpness` e `roundness`. A função desses parâmetros é selecionar objetos semelhantes a estrelas, descartando artefatos como `hot pixels`, raios cósmicos e galáxias estendidas. Ao definir os limites desses parâmetros, pode-se exportar apenas a lista de objetos que estão dentro desses critérios. Não havendo uma razão específica para modificar esses valores, utilizam-se os valores padrão da tarefa.

Ao rodar, as funções do DAOPHOT são sempre utilizadas no modo não interativo, facilitando a reprodução dos resultados posteriormente.

Além das determinações dos centros dos objetos, a tarefa `daofind` aproxima a PSF com uma função gaussiana elíptica. O sigma (em pixels) ao longo do semi-eixo maior é calculado como:

$$\sigma_{\text{maj}} = 0.42466 \cdot \frac{\texttt{fwhmpsf}}{\texttt{scale}}$$

A razão entre o semi-eixo menor e o semi-eixo maior é dada por `ratio`, e o ângulo de posição do eixo maior é θ (em radianos). A função gaussiana elíptica utilizada para modelar a PSF das estrelas é definida por:

$$G(x,y) = A \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(a(x-x_0)^2 + 2b(x-x_0)(y-y_0) + c(y-y_0)^2\right)\right],$$

onde os parâmetros a serem calculados são:

- (x_0, y_0) é o centro do objeto;
- A é a amplitude da gaussiana;
- Os coeficientes a, b e c são calculados com base em σ_{maj}, σ_{min} e θ:

$$\begin{aligned}
\sigma_{\text{min}} &= \texttt{ratio} \cdot \sigma_{\text{maj}} \\
a &= \frac{\cos^2\theta}{\sigma_{\text{maj}}^2} + \frac{\sin^2\theta}{\sigma_{\text{min}}^2} \\
b &= \frac{\sin(2\theta)}{2}\left(\frac{1}{\sigma_{\text{maj}}^2} - \frac{1}{\sigma_{\text{min}}^2}\right) \\
c &= \frac{\sin^2\theta}{\sigma_{\text{maj}}^2} + \frac{\cos^2\theta}{\sigma_{\text{min}}^2}
\end{aligned}$$

Essa aproximação gaussiana é ajustada inicialmente aos pontos previamente determinados, permitindo a determinação dos parâmetros de forma. O arquivo de saída já contém um valor prévio de magnitude instrumental, embora esses valores não sejam utilizados nas tarefas subsequentes.

phot

A tarefa `phot` realiza a técnica de fotometria por abertura, que envolve a medição da intensidade das contagens (fluxo) em uma determinada região circular de uma imagem astronômica, centrada em uma posição determinada pela detecção de um objeto. A ferramenta calcula a soma dos valores de pixel dentro dessa abertura, removendo a contribuição do céu, estimado por um anel circular também centrado no objeto. Na tarefa, a abertura pode ter um valor único ou, caso o usuário configure, assumir vários valores (veja a Figura A.2 ou o manual [1]).

A tarefa `phot` também fornece informações adicionais, como a estimativa da incerteza da medição, o valor do céu e outros parâmetros.

Como nossa intenção é a de efetuar uma fotometria via ajuste de PSF, não gastamos muito tempo em buscar os melhores parâmetros para uma fotometria de abertura. Executamos a fotometria de abertura com uma abertura igual a duas vezes a largura à meia-altura. É bom ter em mente que, embora esta tarefa pareça secundária, a próxima tarefa, que é a escolha das estrelas para compor a seleção de estrelas para a PSF baseia-se na lista de estrelas mais brilhantes dada pela fotometria de abertura. Valores não condizentes com o apropriado para a imagem podem assim resultar em uma seleção completamente errônea, comprometendo todo o trabalho.

Com relação à saturação, a tarefa `phot` utiliza parâmetros definidos nas tarefas `DATAPARS`, `CENTERPARS`, `FITSKYPARS` e `PHOTPARS`. Esses parâmetros incluem valores de saturação, como `datamax` em `DATAPARS`, que define o valor máximo de dados aceitável. Se a intensidade de um pixel exceder `datamax`, ele será ignorado para evitar medições incorretas devido à saturação. Esse controle é essencial para assegurar que as magnitudes calculadas sejam precisas e confiáveis, especialmente em imagens astronômicas com estrelas brilhantes.

pstselect

A função `pstselect` seleciona algumas estrelas da imagem, razoavelmente brilhantes (para amostrar uma boa razão sinal/ruído) e o mais isoladas possível (para evitar interferência da luz de estrelas vizinhas) para compor o modelo da PSF da imagem. Como não há um algoritmo que calcule a distância angular entre as estrelas, ela seleciona as estrelas mais brilhantes da fotometria de abertura.

A seleção pode ser personalizada também, quando o usuário avalia manualmente quando a estrela pode ou não fazer parte da lista para a geração da PSF (veja a Figura A.3 ou o manual [2]). Em nosso caso, utilizamos um parâmetro construído com base nos parâmetros de forma sharpness e sroundness normalizados. O parâmetro sharpness quantifica a nitidez dos objetos presentes na imagem, permitindo distinguir entre estrelas pontuais e objetos extensos, como galáxias, além de auxiliar na avaliação da qualidade geral da imagem. O sroundness, por sua vez, mede a circularidade dos objetos, facilitando a diferenciação entre estrelas, que apresentam forma circular, e galáxias, que tendem a ser mais alongadas.

Como as estrelas foram amostradas a partir de um campo denso, a inspeção visual do modelo final é sempre indispensável, para evitar a inclusão de estrelas com vizinhas brilhantes dentro ou muito próximas do raio de ajuste da PSF.

[1] https://astro.uni-bonn.de/~sysstw/lfa_html/iraf/noao.digiphot.daophot.phot.html
[2] https://astro.uni-bonn.de/~sysstw/lfa_html/iraf/noao.digiphot.daophot.pstselect.html

psf

A tarefa `psf` cria o arquivo-modelo da PSF a partir de um conjunto de estrelas de referência em uma imagem astronômica (veja a Figura A.4 ou o manual [3]).

A criação desta PSF pode ser de várias maneiras, em relação aos resíduos do modelo das candidatas em relação a um conjunto de funções disponíveis. No DAOPHOT, a comparação do modelo se faz em relação a funções pré-determinadas: Gaussiana, Moffat, Lorentziana ou do tipo Penny (veja a Figura 1.5). Se na seleção da função o usuário selecionar o modo `auto`, a escolha da função é feita com base na que apresenta o menor espalhamento em relação ao modelo das candidatas da imagem.

O arquivo da PSF final pode conter apenas a função escolhida, ou ainda por uma, três ou seis tabelas de resíduos médios da função. No caso de ser apenas uma tabela, ela é a média dos resíduos das estrelas candidatas. No caso de três tabelas, a tabela de resíduos vai acompanhada de uma tabela dependente da coordenada x e outra da coordenada y. No último caso, há ainda tabelas dependentes de x^2, y^2 e xy.

allstar

A tarefa `allstar` determina o brilho das fontes (fotometria) através do ajuste PSF em cada fonte detectada. Além do brilho, incerteza, medidas de brilho do céu e parâmetros do ajuste, o baricentro (centro pela média ponderada das contagens nos pixels) das fontes também é determinado, gerando uma melhoria sobre o centro determinado pela fotometria de abertura (veja a Figura A.5 ou o manual [4]).

Uma das principais vantagens da fotometria PSF sobre a fotometria de abertura é minimizar a contribuição em brilho de fontes vizinhas, sendo que o ajuste vai ser ponderado pela contribuição no pixel. Isso é especialmente importante quando se lida com campos de alta densidade estelar, com aglomerados estelares ou em baixa latitude Galáctica. Ao concluir a execução da `allstar` são gerados os seguintes arquivos de saída:

- **allstarfile:** Este arquivo contém os resultados da fotometria para todas as estrelas analisadas. Cada entrada corresponde a uma estrela e inclui informações como magnitude, erro fotométrico, posição, e parâmetros de ajuste da PSF. O formato do arquivo pode ser um banco de dados de texto ou uma tabela STSDAS, dependendo do parâmetro `text` do DAOPHOT.

- **rejfile:** Nem todas as estrelas são ajustadas com sucesso pelo PSF. O `rejfile` armazena os resultados da fotometria para as estrelas que foram rejeitadas durante o processo de ajuste. Se o `rejfile` não for especificado (nulo), todas as estrelas, ajustadas ou não, serão incluídas no `allstarfile`. O formato do arquivo segue a mesma lógica do `allstarfile`.

- **subimage:** Este arquivo é uma imagem resultante da subtração das estrelas ajustadas da imagem original. Essa imagem pode ser útil para identificar objetos residuais ou para realizar análises posteriores. O ALLSTAR pode criar

[3] https://astro.uni-bonn.de/~sysstw/lfa_html/iraf/noao.digiphot.daophot.psf.html
[4] https://astro.uni-bonn.de/~sysstw/lfa_html/iraf/noao.digiphot.daophot.allstar.html

um arquivo de imagem individual para cada imagem de entrada ou armazenar todas as imagens subtraídas em um diretório especificado.

2.3 PRAIA

Nesta seção apresentaremos também o uso do PRAIA, mostrando suas funcionalidades e principais tarefas acessadas para obtenção de resultados do presente trabalho.

2.3.1 Detalhamento do código

O pacote astrométrico PRAIA (https://ov.ufrj.br/en/PRAIA/), desenvolvido pelo Dr. Marcelo Assafin (OV/UFRJ), é uma ferramenta essencial em nosso grupo de trabalho para determinação precisa da posição de objetos celestes a partir de imagens CCD, pequenos corpos do Sistema Solar em particular. É importante mencionar que, neste trabalho, não utilizamos a última versão do programa, apontada pelo link. A versão utilizada neste trabalho está disponível no link https://ov.ufrj.br/praia-astrometry-task/.

A partir do preenchimento de um arquivo de parâmetros, pelo usuário, o PRAIA identifica objetos numa imagem e determina suas posições de forma automática. Fluxos são determinados a partir do ajuste de uma PSF.

Posições oriundas da missão espacial GAIA (EDR3 - Lindegren et al., 2021) são utilizadas como referência astrométrica, sendo também possível ao usuário fornecer seu próprio catálogo para referência astrométrica. Ainda, se um arquivo com as coordenadas do(s) alvo(s) for preenchido, o PRAIA identifica a presença desse(s) alvo(s) nas imagens e escreve os dados referente(s) a ele(s) em separado.

O PRAIA também fornece, junto a uma estimativa da magnitude observada a partir dos fluxos medidos, magnitude dada pelo catálogo de referência para objetos observados que também estejam nesse catálogo, bem como magnitudes J, H e K_s para estrelas 2MASS (Cutri et al., 2003, Skrutskie et al., 2006).

Ao final da execução, o PRAIA gera diferentes arquivos para cada imagem CCD analisada, permitindo fácil acesso ao usuário e, de forma organizada, tanto a resultados astrométricos quanto fotométricos, bem como - e como já mencionado - um arquivo com astrometria e fotometria de alvos previamente selecionados.

2.3.2 Principais tarefas

Header extraction

A tarefa `PRAIA_header_extraction` é usada para extrair informações dos cabeçalhos (do inglês, header) de imagens no formato FITS, incluindo:

- Coordenadas (α, δ) do apontamento do telescópio do início;
- Data e hora da observação;
- Tempo de exposição;
- Identificação do objeto de interesse;
- Filtro utilizado;

- Tamanho do campo de visão (FOV).

Astrometry

A tarefa `PRAIA_astrometry` tem como objetivo:

- Determinar medidas de posições (x,y) e fotometria de PSF bruta dos objetos e do fundo do céu;
- Identificar estrelas de catálogo e alvos no campo de visão (FOV) das imagens fornecidas;
- Transformar as posições (x,y) em coordenadas equatorias ascensão reta e declinação dentro do sistema de referência do cátalogo de referência;
- Produzir saídas (α,δ), magnitudes e respectivas incertezas, além de outras informações relacionadas às estrelas e alvos.

No presente trabalho, nos servimos do catálogo Gaia EDR3 para identificar as estrelas de referência astrométrica presentes nas imagens CCD tratadas.

O perfil do fluxo dos objetos identificados é ajustado por uma PSF, como, por exemplo, uma Gaussiana simétrica, para obter o centro fotométrico, ou seja, coordenadas (x,y) sobre o CCD.

2.4 DIAPL2

O pacote DIAPL2 foi usado para isolar o centauro Chariklo em uma sequência de imagens, nas quais ele se encontrava em um campo estelar denso. Com isso, foi possível obter, com precisão, o centroide do mesmo utilizando o PRAIA.

O DIAPL2, criado por Wojtek Pych[5], utiliza o método de diferença de imagens, proposto inicialmente por Christophe Alard e Robert H. Lupton em 1998 (Alard and Lupton, 1998).

O pacote realiza uma análise de mínimos quadrados que considera todos os pixels das imagens, permitindo não só a subtração ótima, mas também o ajuste da variação de fundo. Testes práticos em imagens do bojo Galáctico mostraram que o método lida bem com variações na PSF e alcança resultados próximos ao ruído de fóton esperado, mesmo em áreas densamente povoadas por estrelas (Alard and Lupton, 1998).

2.4.1 Procedimento de execução

O primeiro passo para instalar o DIAPL2 envolveu baixar o pacote do site `https://users.camk.edu.pl/pych/DIAPL/`. No entanto, devido a problemas com o instalador, escrevemos ao responsável pelo pacote, que gentilmente nos passou uma versão mais recente.

Usamos o arquivo **diapl2_src.tgz** para instalação, que contém os códigos-fonte em um formato compactado. Para extrair seu conteúdo, usamos o comando:

```
tar xvzf diapl2_src.tgz
```

[5] `https://www.camk.edu.pl/en/staff/pych/`

resultando na criação de diversos subdiretórios com as fontes dos programas e arquivos de parâmetros padrão.

O software é compilado utilizando os compiladores GNU C e C++ em sistemas Linux através do comando `install.bash`. A compilação deve transcorrer sem erros ou avisos se seguida corretamente.

Após a compilação, todos os arquivos binários são alocados no subdiretório `'./DIAPL_BIN'`. Segue abaixo uma descrição das tarefas empregadas na aquisição das imagens de diferença de Chariklo:

- **fwhms.bash**: Esta tarefa é responsável por calcular a FWHM e o valor do céu para todas as imagens presentes na lista de entrada. Ainda, o script verifica se a lista de imagens a serem processadas está disponível e, em seguida, inicia o processo de criação de máscaras de pixels ruins e estimativa da FWHM para cada imagem, utilizando programas externos chamados **bmask** e **fwhmm**. Os resultados são registrados em um arquivo de log. Ao final, o script extrai os valores de FWHM calculados e os salva em um arquivo separado, exibindo a data e a mensagem **DONE** para indicar a conclusão do processo.

- **mktpllist.bash**: Esta tarefa prepara uma lista preliminar de imagens que servirão para construir a imagem que servirá como modelo para a subtração das imagens reamostradas. As imagens modelo são imagens de referência que são usadas no processo de subtração de imagens. A escolha de uma boa imagem modelo é crucial para a qualidade da subtração de imagens. O script também carrega configurações do script externo **diapl_setup.bash**. O script então executa o programa **elist** (também um programa externo) com parâmetros específicos para processar o arquivo de entrada **FWHMS** e gerar uma lista de imagens, que é salva no arquivo **TPLIMAGES**.

- **shifts.bash**: Esta tarefa identifica deslocamentos astrométricos lineares entre as imagens e o referencial astrométrico. Estes deslocamentos podem ser causados por vários fatores, como variações na atmosfera, no telescópio ou no detector. O script **shifts.bash** automatiza o processo de encontrar deslocamentos entre as imagens astronômicas, uma etapa importante em diversas análises e processamentos dos dados, como o alinhamento e combinação das imagens.

- **template.bash**: Esta tarefa envolve a preparação das imagens modelo para subtração, incluindo alinhamento, correspondência de níveis de fundo e convolução para ajustar à PSF. O script faz uso de diversas funções para operações astronômicas específicas. A função `match_stars.bash` é projetada para realizar o matching de estrelas, o que implica alinhar posições estelares entre diferentes frames para possibilitar a combinação de dados observacionais de forma precisa. Já a função `find_stars.bash` sugere um processo de localização de estrelas nas imagens, uma etapa preliminar essencial antes do matching e dos cálculos de PSF. Além disso, as funções `ref_fwhm.bash` e `diapl_setup.bash` apoiam operações de refinamento, como ajustes de resolução, o que é particularmente relevante tanto para a modelagem de PSF quanto para operações de resample. É importante ressaltar que a imagem modelo contém apenas as fontes fixas, isto é, o objeto transiente é removido da imagem.

- **subtract.bash**: Aqui ocorre o processo de filtragem de imagem e extração de características, onde as funções específicas como **find_stars** e **cut_section** são empregadas para identificar estrelas dentro das imagens e isolar seções particulares. Essa etapa é crucial para focar nas áreas de interesse, garantindo que apenas as regiões relevantes sejam analisadas nas etapas subsequentes. Segue-se a correlação e alinhamento de imagens, onde o script utiliza funções como **match_stars** para estabelecer correspondências entre as estrelas identificadas nas imagens modelo e em outras imagens processadas.

  Este processo é vital para determinar os deslocamentos necessários para alinhar as imagens de forma precisa, assegurando que os dados de diferentes imagens sejam comparáveis. A etapa de reamostragem e ajustes geométricos utiliza comandos como **xygrid** e **resamplem**, que adaptam geometricamente as imagens baseadas nas correlações previamente estabelecidas. Isso é essencial para manter a consistência espacial entre as imagens, facilitando análises mais detalhadas e precisas.

  Por fim, a função **agat** realiza a subtração da imagem modelo das imagens reamostradas.

Capítulo 3

Astrometria em imagem simulada

3.1 Astrometria e fotometria em campos densos

Nesta seção, apresentaremos o uso de uma imagem simulada para avaliarmos o desempenho do PRAIA num campo estelar denso. Esta avaliação é dada pela comparação da astrometria oriunda do PRAIA com aquela obtida com auxílio do DAOPHOT, pacote tradicional para fotometria em tais campos. A criação de uma única imagem simulada e sua subsequente fotometria nos é suficiente para tal avaliação. Obviamente, diversas dessas imagens, sem prejuízo do que aqui apresentamos, fornecem um campo mais robusto para testes.

3.1.1 A criação da imagem simulada

Nesta subseção, detalhamos o processo de criação e fotometria de uma imagem simulada, que foi criada utilizando parâmetros semelhantes aos encontrados em imagens de campos estelares densos reais.

A imagem foi criada com tamanho de 2048x2048 pixels, simulando a observação de um aglomerado globular com 2060 estrelas mais brilhantes que uma magnitude limite de $g = 25$, distante 20 kiloparsecs da Terra, e em um modelo ideal onde não há extinção fotométrica na Galáxia, nem estrelas de campo da Galáxia. O sistema fotométrico utilizado foi o da Dark Energy Camera (DECam, Flaugher et al. 2015), no sistema ABmag, usando a magnitude g e modelos de PARSEC (Bressan et al., 2012). A DECam serviu como instrumento modelo que observou a imagem do objeto celeste. Para a criação do aglomerado globular, foi escolhido um modelo com idade e metalicidade típicas de aglomerados globulares Galácticos (13 bilhões de anos e [Fe/H] = -2,00).

As estrelas seguiram uma função de massa de Kroupa (Kroupa, 2001), com fração de binárias não-resolvidas de 20% e uma distribuição das estrelas projetadas no céu seguindo uma curva de densidade-número exponencial, com raio de escala de 10 minutos de arco, elipticidade 0,1 e ângulo de posição do semi-eixo maior de 80 graus. Embora alguns destes parâmetros sejam citados com detalhes em demasia, a intenção aqui era criar uma imagem o mais semelhante possível a uma imagem real, advinda de observações. A escala do pixel segue o tamanho do observado pela DECam ($\sim$ 0,3 segundos de arco por pixel).

A FWHM da PSF das estrelas na observação simulada é de 10 pixels, com um brilho de céu equivalente a 3750 contagens. As estrelas seguiram uma função de

espalhamento pontual de uma Moffat com parâmetro beta = 2,5 ou moffat 2.5 ($A/(1+z)^{2.5}$ com $z = x^2/p_1^2 + y^2/p_2^2 + xyp_3$ onde p_n são os parâmetros de ajuste da PSF e A os parâmetros de normalização). A escolha desta função foi feita pelo fato de ela ser a função (dentre as funções disponíveis no DAOPHOT) que melhor se ajusta às observações da DECam.

A equação relacionando o fluxo das estrelas (F em contagens) e a magnitude aparente (m) é $m = -2.5 \log F + 35$. Foi adicionado um ruído nas contagens de céu, seguindo uma distribuição Poissoniana. A imagem simulada pode ser analisada na Fig. 3.1, com escala logarítmica de brilhos. O aglomerado é visível ao centro, e a densidade de estrelas vai decaindo em direção às bordas exponencialmente.

É importante ressaltar que, na imagem simulada utilizada neste trabalho, as fontes estelares foram inseridas em posições predefinidas, constituindo uma tabela verdade. Isto nos ajudará com as comparações apresentadas em seções posteriores deste trabalho sobre a precisão na determinação de centroides dos pacotes DAOPHOT e PRAIA.



Figura 3.1. Imagem simulada onde o aglomerado é visível com forte adensamento no centro.

3.1.2 Teste com imagens simuladas - PRAIA

Além do DAOPHOT, utilizamos também o PRAIA para cálculo dos centroides dos objetos na imagem simulada.

A versão mais atual do PRAIA permite a escolha de diferentes funções - Gaussianas bidimensionais circular e elíptica, bem como Lorentziana, entre outras - para descrever a distribuição de fluxo de um dado objeto sobre o CCD. A versão que utilizamos aqui disponibiliza apenas uma Gaussiana bidimensional circular, dada a seguir:

$$f(x,y) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-[(x-\mu_x)^2+(y-\mu_y)^2]}{2\sigma^2}}, \tag{3.1}$$

onde a variável A é a altura da Gaussiana e está associada à magnitude do objeto, (x, y) são as coordenadas sobre o CCD sobre os quais as contagens do objeto encontram-se distribuídas, (μ_x, μ_y) são os centroides do objeto em x e y e σ é a abertura da Gaussiana. Ela é uma medida da dispersão dos dados e relaciona-se com a *FWHM* (*Full Width at Half Maximum*), uma medida do *seeing*, através da relação:

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2}\ \sigma \sim 2.35482005\sigma \tag{3.2}$$

3.2 Resultados

Nesta seção, mostramos os resultados da astrometria sobre uma imagem simulada de um aglomerado utilizando os pacotes DAOPHOT e PRAIA, com diferentes níveis de densidade estelar projetada.

Para investigar o desempenho de ambas as abordagens, calculamos o desvio radial médio ($\overline{\Delta r}$) entre a posição real das estrelas usadas na construção da imagem sintética e a posição das estrelas detectadas:

$$\overline{\Delta r} = \frac{\sqrt{\sum_i^N (\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2)}}{N}, \tag{3.3}$$

onde ΔX_i e ΔY_i são as diferenças (real - medida) entre os centroides das fontes em X e Y, respectivamente. Por último, N é o número de fontes detectadas com as ferramentas utilizadas. O $\overline{\Delta r}$ pode ser interpretado como o desvio médio em pixels sobre todas as estrelas da amostra, e fornece uma boa medida da qualidade da astrometria, sendo que quanto menor o valor do desvio médio, mais fiel à imagem original é o processo de ajuste do centroide.

Como a versão do PRAIA que estamos utilizando oferece somente um modelo (Gaussiana circular), adotamos esse único modelo para a fotometria PSF na imagem simulada. Para o DAOPHOT, utilizamos diferentes parâmetros, como a função de ajuste (Gaussiana e Moffat 2.5, que é a função com a qual as estrelas sintéticas foram geradas). Depois de termos utilizado o mesmo raio de ajuste (`fitrad`) que foi utilizado no PRAIA, buscamos por pequenas modificações em outros parâmetros, de forma que valores ainda menores de $\overline{\Delta r}$ fossem ainda produzidos. Desta maneira, variamos valores de raio de ajuste e também o modo como a fotometria PSF é feita: levando em conta tabelas de resíduos ou não.

As tabelas de resíduos geradas pelo DAOPHOT podem ser utilizadas para avaliar a qualidade do ajuste da PSF (Point Spread Function) às estrelas detectadas, fornecendo informações sobre a diferença entre o modelo ajustado e os dados observados (Stetson, 1987).

Os raios de ajuste (fitrad) foram definidos como 4, 10 e 20 pixels. Isso implica que, na adaptação do perfil da estrela à função selecionada, somente os pixels localizados dentro dos raios de ajuste estabelecidos a partir do centro da estrela foram levados em conta. Isso pode ajudar a minimizar a influência de estrelas vizinhas e do ruído de fundo no ajuste, bem como diminuir possíveis variações entre a função de ajuste e a PSF da imagem.

A ordem da variação espacial da PSF (varorder) foi definida como -1, 0 e 1. Varorder determina, como especifica o IRAF, o número de tabelas de consulta (*lookup*

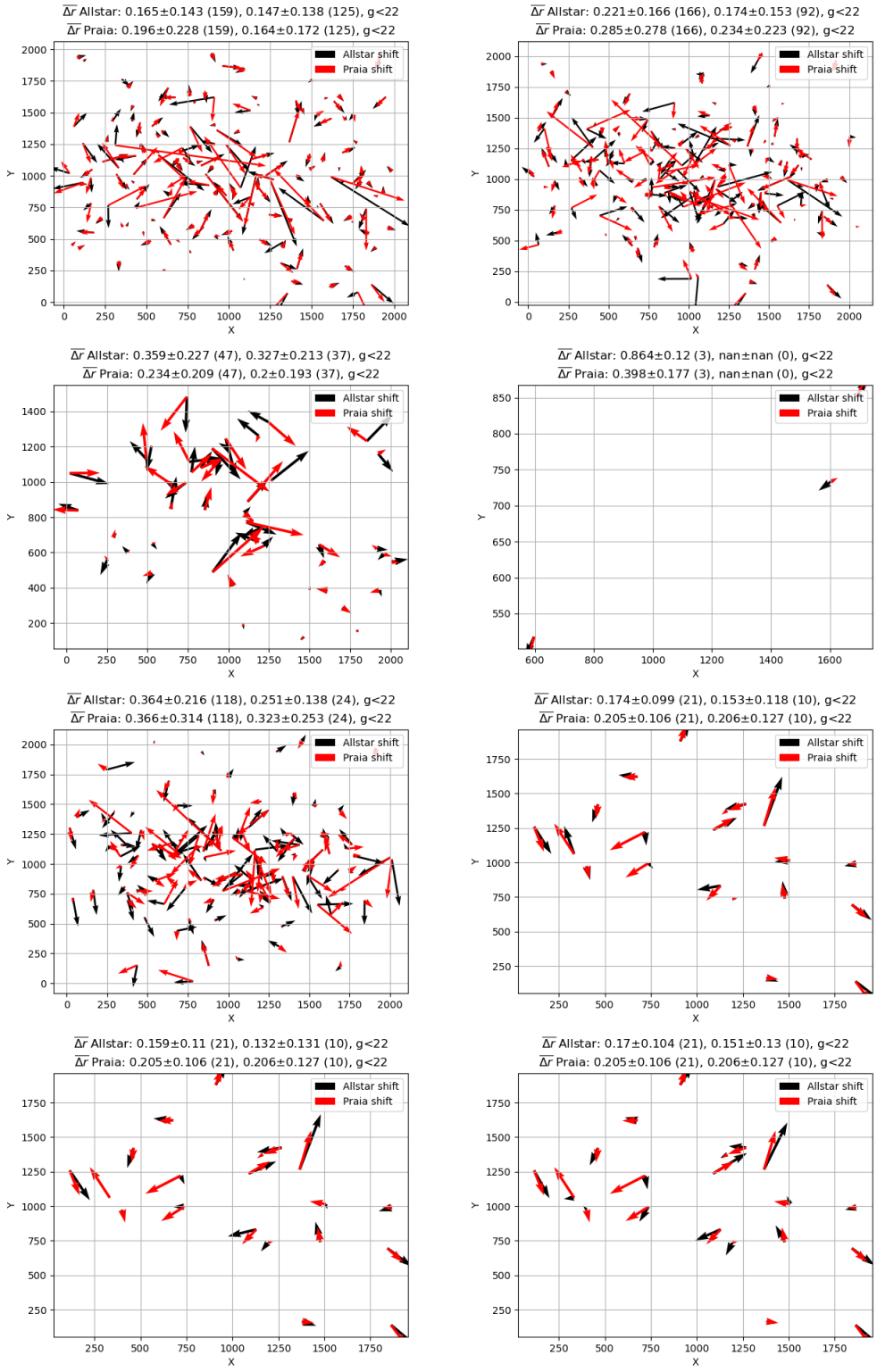


Figura 3.2. Os desvios radiais médios são mostrados em cada painel para a variação de funções e parâmetros de ajuste, indo da esquerda para a direita e de cima para baixo: Gaussiana com fitrad= 10 e varorder= 0, Gaussiana com fitrad= 4 e varorder= -1, Gaussiana com fitrad= 10 e varorder= -1, Moffat com fitrad= 10 e varorder= 0, Gaussiana com fitrad= 10 e varorder= 1, Moffat com fitrad= 10 e varorder= -1, Gaussiana com fitrad= 20 e varorder= -1, Moffat com fitrad= 20 e varorder= 0. Nestes gráficos, os vetores foram ampliados em 100 vezes.

table) contendo os desvios da PSF verdadeira com o modelo analítico que a define. Isso significa que a PSF foi assumida como a própria função e sem variação ao longo de toda a imagem (varorder = -1), constante ao longo da imagem, mas com apenas um mapa de resíduos (varorder = 0) ou com mapas de resíduos fixos e também dependentes das coordenadas (varorder = 1). Diferentemente de quando varorder = -1, para varorder = 0 e 1, tabelas acessórias são utilizadas. No caso de varorder = 0, apenas uma tabela de resíduos é utilizada, promovendo uma melhor concordância entre a PSF da imagem e a função escolhida. Mesmo assim, não há variação da função ao longo da imagem. Com varorder = 1, três tabelas são escolhidas (uma para os resíduos e duas dependentes de x e y ao longo da imagem), sendo que, então, a função de ajuste vai variar ao longo da imagem.

Na Figura 3.2 são mostrados gráficos ilustrando o valor médio do desvio radial das estrelas para várias rodadas de fotometria, utilizando parâmetros diferentes.

Os resultados obtidos com o DAOPHOT e com o PRAIA estão mostrados na Tabela 3.1.

Função	F	V	Todas as estrelas			Estrelas com $g < 22$		
			$\overline{\Delta r}$(Daophot)	$\overline{\Delta r}$(Praia)	N_T	$\overline{\Delta r}$(Daophot)	$\overline{\Delta r}$(Praia)	N_{g22}
Gaussiana	10	-1	0.165±0.143	0.196±0.228	159	0.147±0.138	0.164±0.172	125
Gaussiana	10	0	0.221±0.166	0.285±0.278	166	0.174±0.153	0.234±0.223	92
Gaussiana	10	1	0.359±0.227	0.234±0.209	47	0.327±0.213	0.200±0.193	37
Gaussiana	20	-1	0.864±0.120	0.398±0.177	3	-	-	-
Gaussiana	4	-1	0.364±0.216	0.366±0.314	118	0.251±0.138	0.323±0.253	24
Moffat 2.5	10	-1	0.174±0.099	0.205±0.106	21	0.153±0.118	0.206±0.127	10
Moffat 2.5	10	0	0.159±0.110	0.205±0.106	21	0.132±0.131	0.206±0.127	10
Moffat 2.5	20	0	0.170±0.104	0.205±0.106	21	0.151±0.13	0.206±0.127	10

Tabela 3.1. Os resultados do desvio médio radial (em pixels) utilizando DAOPHOT e PRAIA, com a variação das funções (primeira coluna) e outros parâmetros: F = raio de ajuste (fit) e V = varorder. Ainda, N_T é o número de estrelas detectadas sem corte de magnitude e N_{g22} o número de estrelas detectadas com corte de magnitude $g < 22$. Embora não haja variação nos valores do PRAIA (houve apenas uma rodada), a comparação DAOPHOT/PRAIA é feita sempre com as mesmas estrelas. Dessa maneira o que variou foi a amostra de estrelas na comparação, gerando diferentes valores para o desvio radial.

Vale ressaltar que a imagem sintética foi construída tendo como base a Moffat. Neste sentido, e tendo em conta que a versão do PRAIA que utilizamos (30.06) serve-se apenas de gaussianas circulares, as três últimas linhas da Tabela 3.1 em questão apresentam resultados de interesse, mas com limitada base para comparação dadas as diferentes PSFs. As cinco primeiras linhas dessa tabela, no entanto, oferecem um terreno um pouco mais ameno para comparações. Entendemos que o uso de uma Gaussiana com varorder $= -1$ pelo DAOPHOT seja a melhor comparação a se fazer com o PRAIA no quesito de determinação de centroides, visto que não há uso de tabelas de consulta. De todo modo, nota-se que tanto a média dos desvios quanto a dispersão das medidas dos desvios são grandes.

Embora possamos ter exagerado ao construir um campo estelar tão denso, fica claro que o desempenho do PRAIA, em comparação com um pacote desenhado para trabalhar com campos estelares densos, é competitivo. Isto é importante porque o centroide de estrelas, obviamente necessários para a tradução de coordenadas sobre o CCD para coordenadas celestes, não poderá beneficiar-se de técnicas de diferença de imagens. É interessante notar também que a detecção de estrelas torna-

se difícil num campo muito denso, visto que vários objetos aglutinados podem ser entendidos como um só que, por sua extensão e forma, acaba sendo rejeitado. Níveis de sensibilidade diferentes adotados para o PRAIA e para o DAOPHOT (i.e., limites entre aquilo que deve ser considerado como contagem de fundo de céu e aquilo que deve ser considerado como contagem oriunda de uma fonte celeste) influenciam ainda a quantidade de objetos que cada pacote irá encontrar. Obviamente, uma sensibilidade muito alta aumenta o número de detecções espúrias.

Inicialmente, ao analisar a Figura 3.2, pensamos que poderia haver uma correlação entre o desvio radial médio e a densidade de fontes, ou entre o desvio radial médio e o brilho da estrela principal. Esperávamos que as setas tivessem um comportamento radial, apontando no sentido contrário à região de maior densidade do aglomerado na imagem sintética. No entanto, não foi isso que encontramos. Aliás, não parece haver um sentido preferencial para as setas, o que indica que os desvios são, de fato, regidos pelo entorno imediato do objeto medido. Vamos avaliar alguns gráficos com ajustes para essas possíveis correlações apenas para o melhor valor do raio médio, e para ambas as abordagens DAOPHOT e PRAIA.

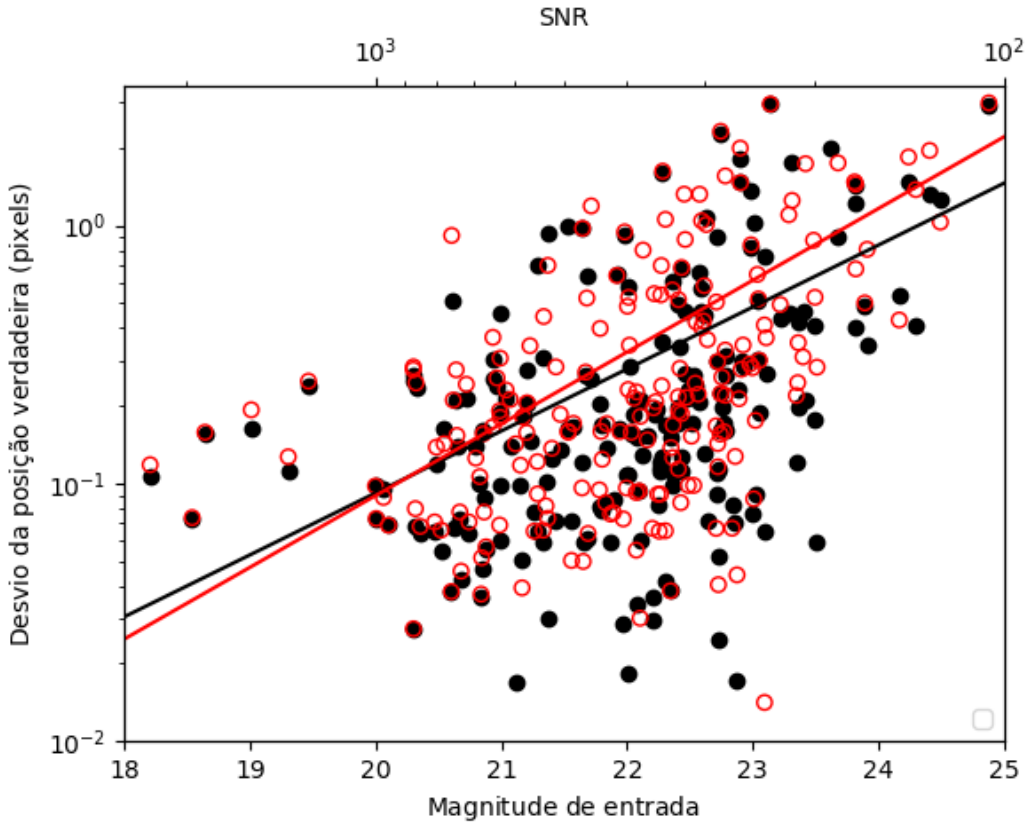


Figura 3.3. Variação do desvio médio em relação à magnitude da estrela. Os pontos pretos cheios mostram os centróides das estrelas medidos com o DAOPHOT e os vermelhos vazados mostram as estrelas medidas com o PRAIA. Além disso, é mostrado um ajuste a ambas as amostras.

A Figura 3.3 mostra o valor do desvio de cada estrela (Δr) em relação à magnitude de entrada. Podemos ver que os dados têm um grande espalhamento em relação à reta de ajuste (vale lembrar que a escala vertical é logarítmica), e calculando o valor do coeficiente de Pearson para os dados a correlação é muito próxima de zero

($7.98.10^{-14}$), indicando uma correlação completamente desprezível. Essas conclusões valem tanto para o DAOPHOT quanto para o PRAIA, visto que o ajuste é pobre para ambas as abordagens. Mesmo assim, os maiores desvios ocorrem para estrelas fracas e são da ordem de um pixel, quando comparados com o desvio da ordem de décimos de pixel para as estrelas mais brilhantes.

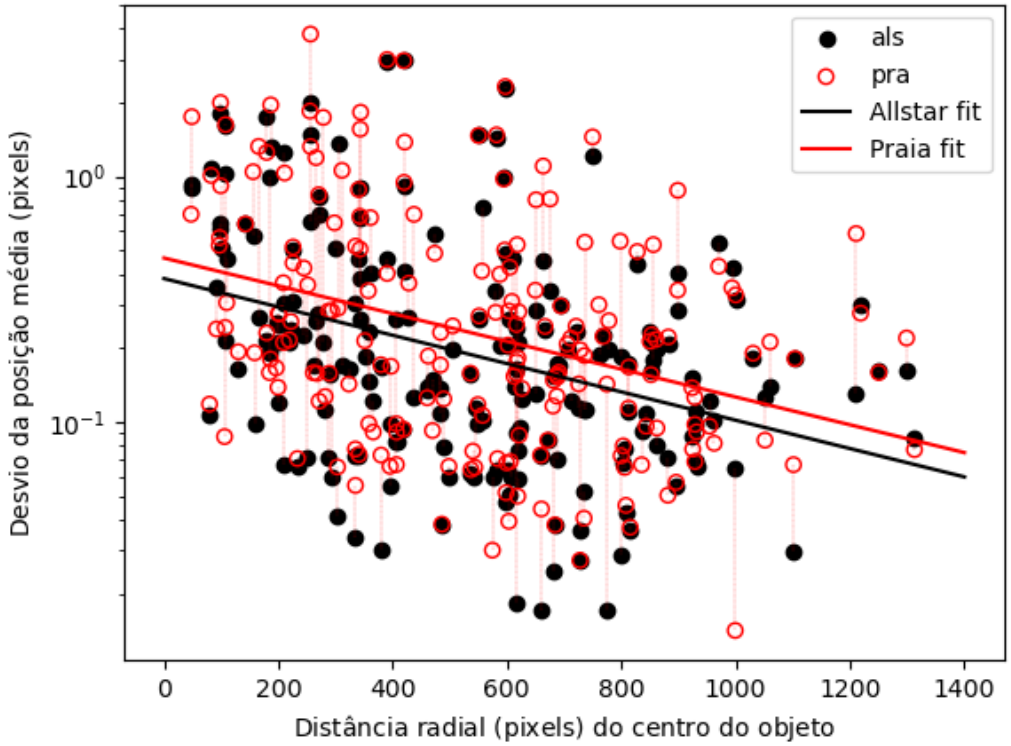


Figura 3.4. O eixo vertical mostra o desvio de cada estrela entre a detecção e a posição original. O eixo horizontal ilustra a distância entre a estrela e o centro da imagem, que corresponde ao centro do objeto. Linhas vermelhas finas marcam os desvios radiais do DAOPHOT e do PRAIA para uma mesma estrela. Embora o desvio seja em média menor para o DAOPHOT do que para o PRAIA, há vários exemplos onde o desvio dado pelo PRAIA é menor do que do DAOPHOT. Embora com grande dispersão, duas retas foram ajustadas para cada uma das abordagens.

Para ilustrar uma possível correlação entre os desvios dos centroides recuperados com os dois códigos e o adensamento de fontes, a Figura 3.4 mostra os valores do desvio radial para o DAOPHOT e para o PRAIA em relação à distância radial do centro do aglomerado simulado, no centro da imagem. Quando as estrelas foram detectadas com ambos os códigos, há uma linha vertical em vermelho tênue unindo um ponto preto cheio (centroide determinado pelo DAOPHOT) a um círculo em vermelho vazado (definido pelo PRAIA). Na maior parte dos casos, os desvios do DAOPHOT são bem menores do que os desvios do PRAIA (as bolinhas em negro estão quase sempre abaixo dos pequenos círculos vermelhos). A escala do eixo vertical é logarítmica. Para ambas as abordagens, o coeficiente de correlação de Pearson mostra valores de p muito próximos de zero ($5.06.10^{-6}$ e $8.79.10^{-6}$ para DAOPHOT e PRAIA, respectivamente).

Observando a Figura 3.3, há uma leve variação do desvio em relação à distância

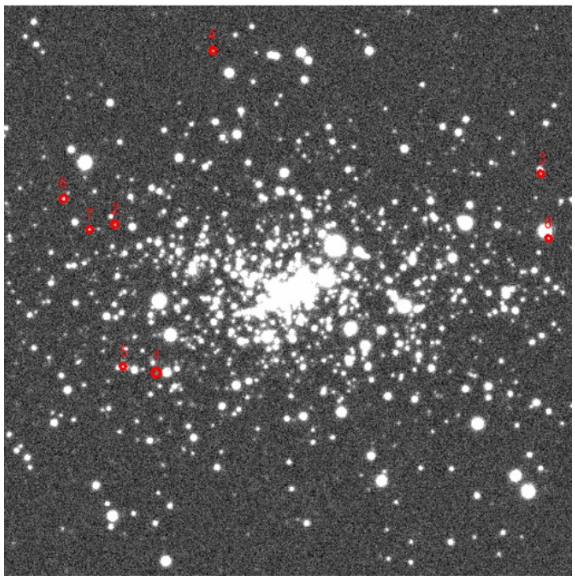


Figura 3.5. Posição das estrelas na imagem simulada que apresentam deslocamentos maiores quando detectadas pelo PRAIA em comparação com o DAOPHOT.

radial para ambas as abordagens, embora com grande dispersão. De qualquer maneira, os maiores desvios são observados no centro, onde há uma maior densidade de estrelas projetada na imagem. Na parte externa, os desvios típicos são da ordem de 10^{-2} a 10^{-1} pixels, enquanto que no centro, um desvio típico é da ordem de mais de um pixel. Sendo que um pixel corresponde a 0.3 segundos de arco, este será o maior erro esperado em uma imagem.

Nota-se ainda a grande dispersão dos dados em relação às retas de ajuste, o que pode ser justificado assumindo que o desvio deva ser proporcional tanto ao adensamento de fontes quanto à magnitude das fontes vizinhas. Também é importante destacar a presença de outliers nas detecções efetuadas. Isso é evidenciado nas Figuras 3.5 e 3.6, onde se observam estrelas a uma distância superior a 500 pixels do centro do aglomerado, resultando em um deslocamento significativamente maior para o PRAIA em relação ao DAOPHOT.

Vale notar que as maiores diferenças entre os deslocamentos para o PRAIA com relação aos do DAOPHOT são oriundas de estrelas com grande contaminação em seu perfil de fluxo pela presença de companheiras (veja a Figura 3.5). Portanto, isto não reflete um problema do algoritmo de centragem, mas sim das dificuldades inerentes desse cálculo em campos densos.

Outro ponto interessante a notar é que o aglomerado criado na imagem simulada possui 2060 estrelas, sendo 763 detectadas pelo PRAIA e 236 detectadas pelo DAOPHOT como saída de sua fotometria PSF. Não há base, por essas taxas de detecção, para avaliar o desempenho do resgate de objetos por ambos os softwares. Primeiro, o valor baixo dessa taxa deve-se ao fato do aglomerado possui uma lei exponencial radial de densidade de estrelas. Em outras palavras, muitos dos membros do aglomerado estão próximos demais para serem identificados como objetos pontuais por ambos os softwares. Além disso, a função de massa inicial (típica destes objetos celestes) faz com que o número de estrelas fracas seja muito maior que o número de estrelas brilhantes. Isso contribui para o baixo número de estrelas resgatadas.

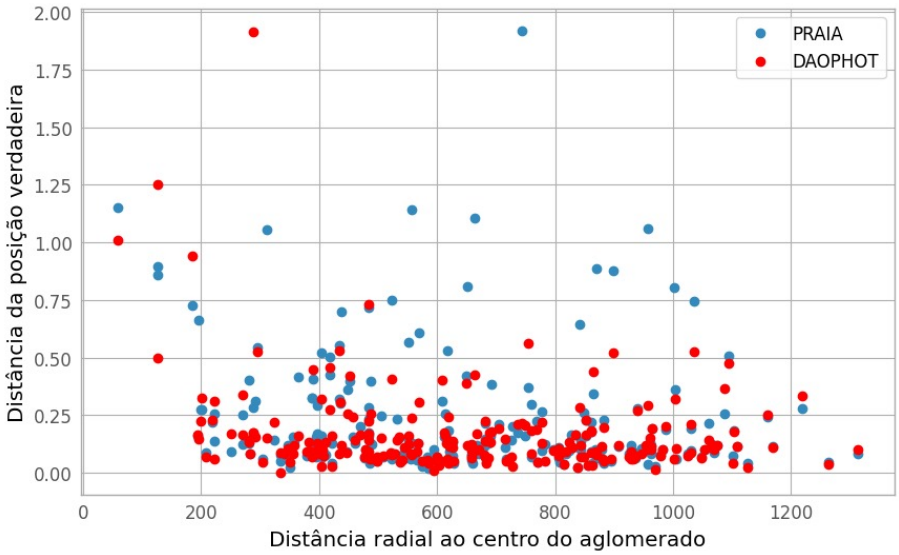


Figura 3.6. Distância da posição verdadeira das estrelas a mais de 500 pixels de distância do centro do aglomerado que apresentam um deslocamento significativamente maior para o PRAIA em comparação com o DAOPHOT. Aqui usamos as posições oriundas do ajuste com uma função gaussiana, fitrad = 10 e vardorder = -1.

Um segundo ponto é que PRAIA e DAOPHOT possuem parâmetros diferentes para estabelecer um critério de qualidade para detecção de fontes celestes. Em ambos, utilizamos aqueles parâmetros que podem ser entendidos como padrão nos respectivos softwares.

Capítulo 4

Astrometria usando Difference Imaging (DIA)

Neste capítulo, abordaremos a aplicação da técnica de diferença de imagens (DIA), começando pela descrição das imagens utilizadas, seguida da metodologia empregada para gerar as imagens de diferença de Chariklo e, por fim, apresentaremos os resultados obtidos para a astrometria com DIA.

4.1 Imagens de Chariklo

Neste trabalho, foram utilizadas 127 imagens de Chariklo obtidas com o instrumento SOAR Optical Imager (SOI, veja a Figura 4.1)[1], que atualmente se encontra descomissionado e não é mais oferecido pelo SOAR. As imagens foram tomadas no filtro R Bessel durante a noite de 20 de julho de 2015, com tempo de exposição de 80 segundos por imagem. As condições de observação apresentaram um *seeing* médio de ≈ 1.14 arcsec (correspondendo a um FWHM de ≈ 7.45 pixels, dada a escala de pixel de 0.1535 arcsec/pixel).

O campo de visão total é de aproximadamente 5.2×5.2 arcmin, dividido em dois CCDs separados por um gap de aproximadamente 7.8 arcsec. Cada CCD é lido por conjunto de 2 amplificadores. As imagens aqui tratadas são produto de metade de um CCD da SOI (chave EXTNM do header possui valor 'im4', veja Figura 4.1), onde o alvo principal esteve presente ao longo de toda a observação, resultando em uma imagem com 1024x4096 pixels (tamanho físico) ao invés dos 4096x4096 disponíveis[2].

O sistema de coordenadas adotado pelo instrumento foi o FK5 (Fricke et al., 1988) com equinócio J2000, usando projeção tangencial (TAN) para ambos os eixos RA e DEC, com o centro do campo localizado em RA = 17:52:26.634 e DEC = -36:26:16.994. As imagens foram processadas utilizando os procedimentos padrão de redução, incluindo correção de bias e flat-field.

É relevante notar que essas mesmas imagens já foram parcialmente utilizadas e publicadas anteriormente no estudo de Leiva et al. (2017). Nesse trabalho, os autores mencionam o uso de cerca de 200 imagens dessa mesma data (programa SO2015A-015), obtidas com o mesmo filtro R Bessel e com o mesmo tempo de exposição de 80 segundos.

[1] https://noirlab.edu/science/programs/ctio/instruments/soi
[2] https://noirlab.edu/science/index.php/programs/ctio/instruments/soi/hardware

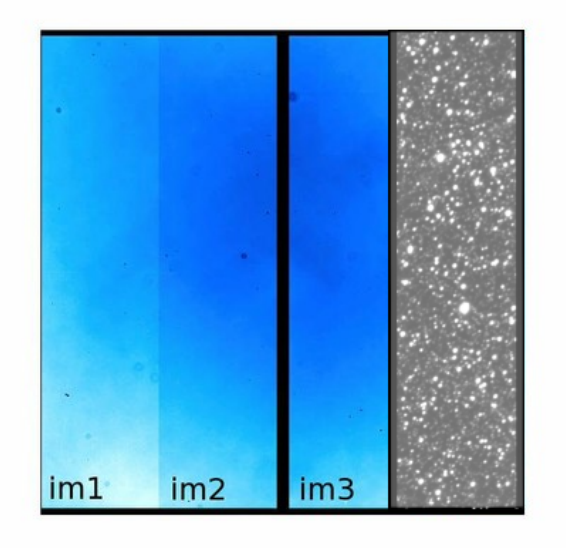


Figura 4.1. Mapa de campo plano (banda R) dos CCDs SOI, com suas extensões FITS, im1, im2, im3 e uma imagem de Chariklo sobreposta na seção im4.

Originalmente, as imagens foram tomadas com o objetivo de melhorar a astrometria de Chariklo. Contudo, Leiva et al. (2017) aproveitaram a qualidade dos dados para analisar a amplitude da curva de luz rotacional, obtendo um valor de pico-a-pico $\Delta m = 0.06 \pm 0.02$ mag. Este resultado é apresentado na Figura 5 daquele artigo e foi utilizado como uma informação *a priori* para restringir os modelos de forma e tamanho de Chariklo.

A metodologia de processamento é um ponto de diferença: enquanto Leiva et al. (2017) realizaram a fotometria utilizando rotinas IRAF e fotometria diferencial de imagem com o código DanDIA, no presente trabalho foi empregado o pacote DIAPL2 para obter resultados similares, como a curva de rotação apresentada no Capítulo 5, a partir de um subconjunto (127 imagens) desses mesmos dados brutos. Isso demonstra a robustez e a utilidade continuada dessas observações para diferentes análises fotométricas. Além disso, como mostraremos mais à frente, é possível obter a fase rotacional com precisão suficiente para relacionarmos resultados de ocultação estelar com observações separadas por uma semana.

4.2 Imagem diferencial

Para efetuar a subtração de imagens, é fundamental alinhar adequadamente as imagens de ciência com uma imagem de referência, comumente denominada imagem modelo. Este procedimento requer uma transformação astrométrica rigorosa, que envolve a correção de discrepâncias em posição central, orientação, escala, rotação e correção de distorção (Alard and Lupton, 1998, Bramich et al., 2013, Lazorenko et al., 2024).

Seguido dessas transformações astrométricas, as imagens são reamostradas para coincidirem com a imagem modelo. Este passo é executado com elevada precisão, adotando um método de interpolação chamado splines bicúbicos, essencial para a análise de diferenças de imagens astronômicas. Tal metodologia é crítica para a detecção e quantificação de alterações sutis em dados obtidos em diferentes instantes

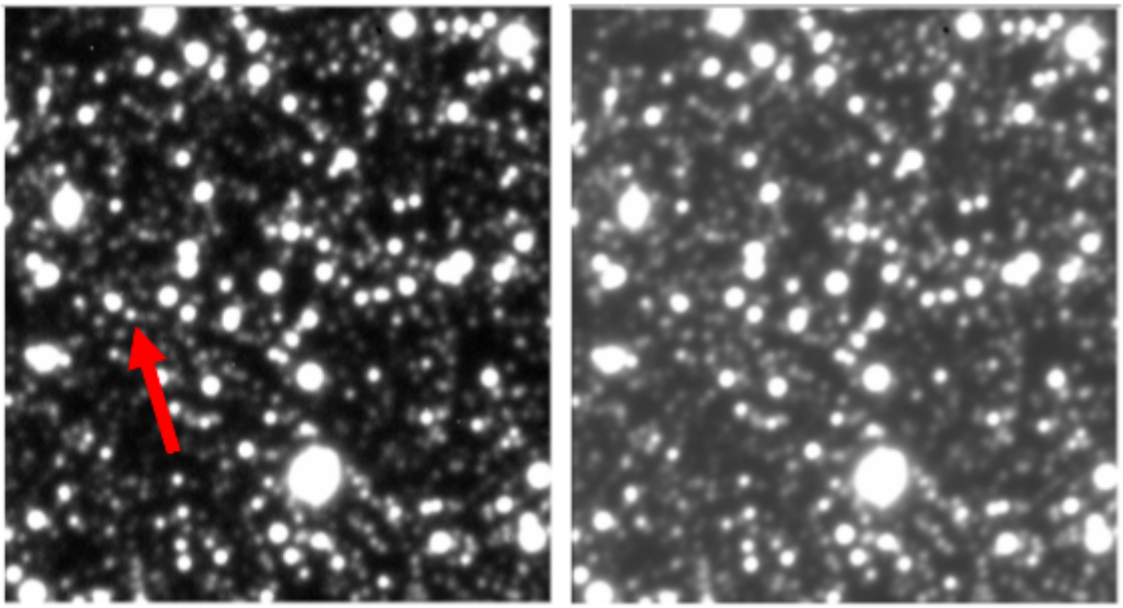


Figura 4.2. A partir da imagem de ciência (à esquerda) é obtida a imagem modelo (à direita). Na imagem modelo, observamos a ausência de Chariklo. A seta em vermelho indica a posição de Chariklo.

(Alard and Lupton, 1998, Alard, 2000, Bramich et al., 2013).

A implementação de splines cúbicos possibilita um ajuste suave das intensidades luminosas nas imagens sucessivas, facilitando a identificação de padrões temporais ou variações que podem ser ofuscadas por flutuações de brilho ou ruído de fundo (Alard and Lupton, 1998, Bramich et al., 2013). A utilização desta técnica assegura uma combinação precisa das imagens, permitindo isolar e examinar características específicas nas imagens científicas com alto grau de fidelidade. Este processo é particularmente relevante em pesquisas envolvendo a monitoração de estrelas variáveis, a detecção de exoplanetas e o rastreamento de objetos em movimento em campos estelares densos (Veja Massari et al., 2020).

4.2.1 Criação da imagem modelo

Tomamos imagens de ciência de tal forma que o deslocamento de Chariklo entre uma imagem e a seguinte é grande (várias vezes a FWHM). A coadição de tais imagens resulta numa imagem de referência (imagem modelo) na qual o objeto móvel é removido (ver a Figura 4.2). Aqui, conservamos imagens de melhor seeing ($\lesssim 1.144$ arcsec) como referência, evitando a degradação para uma imagem de pior seeing que reduziria a relação sinal-ruído. O seeing é igualado em todas as imagens através de uma convolução.

4.2.2 Reamostragem das imagens de ciência

Aqui, as imagens de ciência devem ser precisamente alinhadas com a imagem modelo. Este passo é fundamental para que a subtração da imagem modelo de cada imagem reamostrada seja bem-sucedida (ver Figura 4.3).

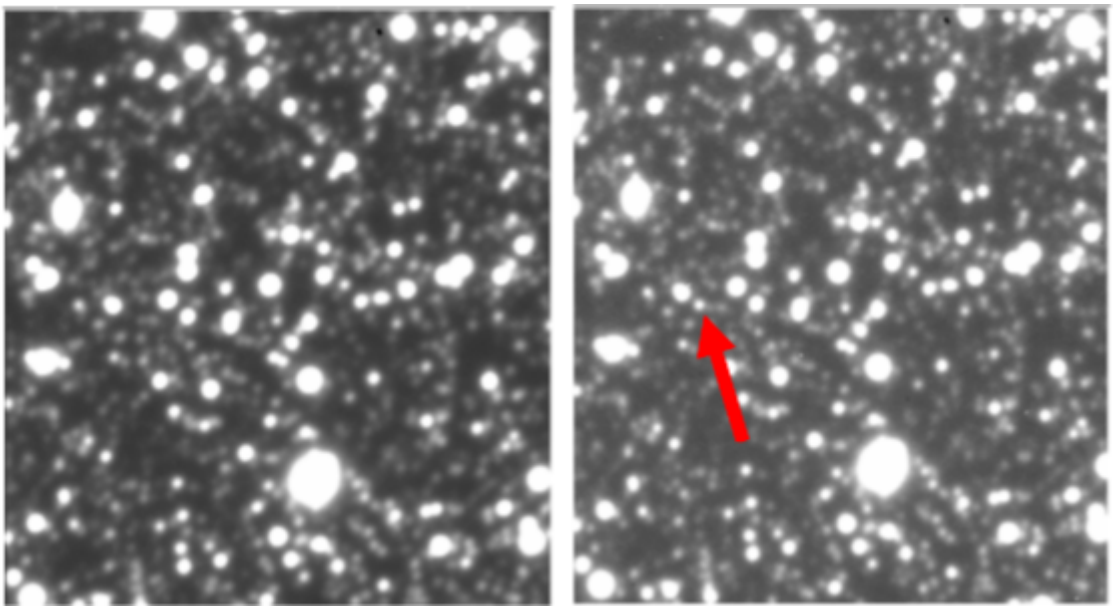


Figura 4.3. A partir da imagem modelo (à esquerda) é obtida a imagem de ciência reamostrada (à direita). A seta em vermelho indica a posição de Chariklo.

4.2.3 Determinação das imagens de diferença

A subtração da imagem modelo de cada imagem reamostrada gera uma imagem de diferença onde, idealmente, apenas o fluxo do objeto transiente está presente e isolado daquele dos objetos fixos, que no presente caso são estrelas (ver Figura 4.4).

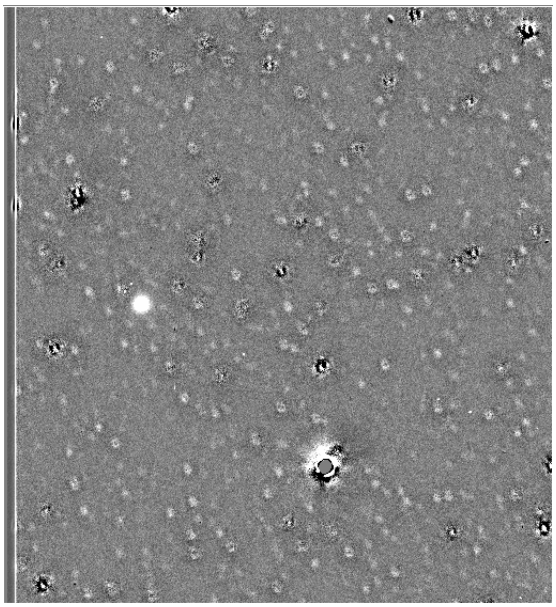


Figura 4.4. Imagem diferencial contendo apenas o fluxo do objeto transiente.

4.2.4 Estimativa aproximada da eficiência de subtração de fluxos

A Figura 4.6 mostra a razão entre o fluxo dos objetos na imagem de diferença e o fluxo na imagem reamostrada. Excluindo efeitos na borda do CCD, o resultado

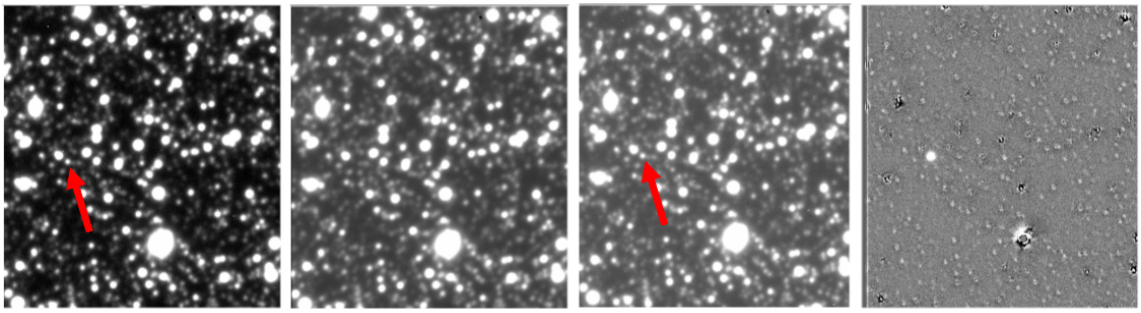


Figura 4.5. Panorama geral da aplicação do DIAPL2. Aqui, observamos todas as imagens necessárias para a execução correta do pacote. Da esquerda para a direita, temos a imagem de ciência, a imagem template, a imagem de ciência reamostrada e a imagem diferencial, respectivamente. As setas em vermelho indicam a presença de Chariklo.

mostra claramente que, para objetos com a magnitude de Chariklo, o resíduo na imagem subtraída é, no máximo, em torno de 10% do fluxo do objeto.

Para objetos mais brilhantes, o resíduo máximo esperado é menor, e para objetos mais fracos essa razão vai aumentando, até que, por volta da magnitude 20.0 - veja a Figura 4.6 - o resíduo máximo é da ordem da medida, visto que já se aproximam da magnitude do céu. Um histograma das fontes da Figura 4.6 é mostrado na Figura 4.7.

Para chegar a estas conclusões, rodamos a fotometria via PSF na imagem reamostrada e, usando as mesmas coordenadas, rodamos uma fotometria de abertura na imagem subtraída, realizando assim uma concordância precisa das fontes (i.e., efetuamos medidas fotométricas na imagem de diferença nas mesmas posições nas quais estrelas foram encontradas na imagem reamostrada). Preferimos rodar uma fotometria de abertura na imagem subtraída devido ao fato de que, na subtração, os resíduos geralmente não têm a forma da PSF.

Vale mencionar, ainda, que mesmo objetos com R$\sim$18 deixaram resíduos na imagem subtraída, diferentemente de objetos mais fracos. Isto é reflexo da dificuldade que tivemos na configuração dos parâmetros que controlam o DIAPL2. Entendemos que a variação do *seeing* ocorrida durante a noite (veja Seção 4.4), que afetou a criação da imagem modelo, pode ser uma das razões dessa dificuldade.

4.3 Aplicação do PRAIA

O PRAIA é utilizado três vezes em dois conjuntos diferentes de imagens. Esses dois conjuntos são: imagens reamostradas, alinhadas à imagem modelo, e imagens subtraídas.

Nas imagens reamostradas, os resultados oriundos do uso do PRAIA consideram que há contaminação do fluxo do alvo por objetos angularmente próximos. No entanto, e é este o objetivo, um arquivo é criado para cada imagem tratada contendo, entre outros (x_{CCD}, y_{CCD}) de cada objeto detectado, bem como suas respectivas coordenadas equatoriais (α, δ).

É fato que vários desses objetos, estrelas de referência entre elas, terão suas posições mais ou menos afetadas por conta do fluxo de objetos próximos. Todavia, tendo em conta os testes efetuados com a imagem sintética, entendemos fazer o

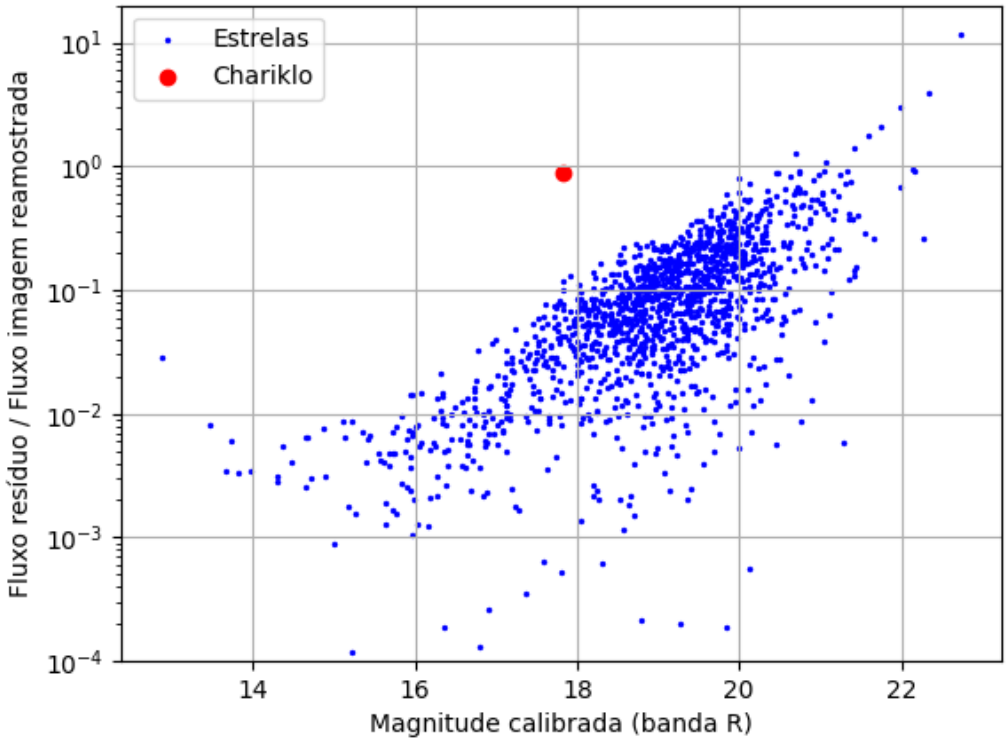


Figura 4.6. Razão entre os fluxos das fontes na imagem de diferença e imagem reamostrada em função da magnitude psf calibrada na banda R (primeira imagem da sequência).

melhor possível, nas condições dadas, no que diz respeito ao cálculo dos centroides estelares. Nas imagens subtraídas, os resultados oriundos do uso do PRAIA têm como único objetivo a determinação das coordenadas x_{CCD} e y_{CCD} do objeto alvo.

Um passo intermediário diz respeito à inserção das coordenadas x_{CCD} e y_{CCD} do alvo, oriundas das imagens subtraídas, nos arquivos obtidos com as imagens reamostradas. Com isso, nos beneficiamos de um centroide mais livre de fluxos contaminantes e tendo o benefício de estrelas de referência. Ressalta-se que este passo encontra base no fato de que as imagens reamostradas e subtraídas estão alinhadas, ou seja, os x_{CCD} e y_{CCD} da imagem reamostrada e o da respectiva imagem subtraída desfrutam idealmente dos mesmos eixos.

Mais precisamente, se o alvo tiver sido identificado na imagem reamostrada, as informações relativas a ele no respectivo arquivo são substituídas por aquelas oriundas das imagens subtraídas. Se não houve detecção do alvo na imagem reamostrada, tais informações são, então, inseridas.

Para tornar mais eficiente a identificação e substituição/inserção das coordenadas do alvo nos arquivos gerados pelo PRAIA quando aplicado às imagens reamostradas/subtraídas, identificamos (10199) Chariklo em duas imagens diferentes, e afastadas no tempo, escrevemos a variação de suas coordenadas como função do tempo, dada por:

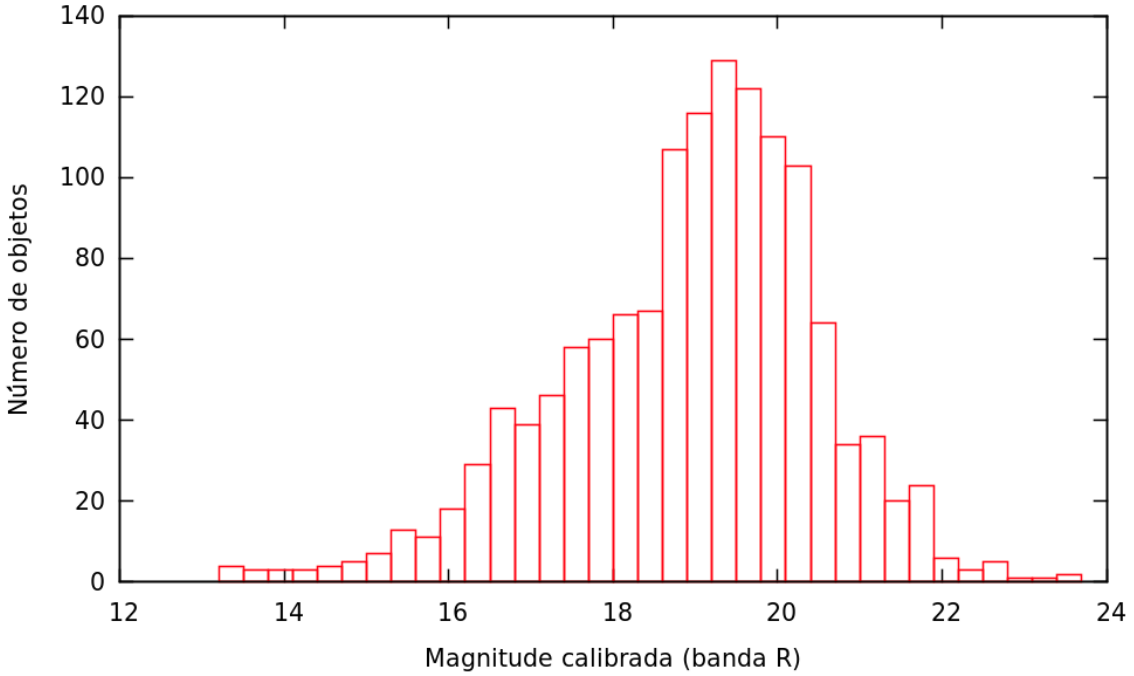


Figura 4.7. Histograma de bin 0.3, com as magnitudes medidas com o PRAIA para a mesma margem da Figura 4.6 anterior (primeira imagem da sequência).

$$X_{CALC} = 155.68 - 325.88287827 * (JD - 2457223.51162037) \quad (4.1)$$
$$Y_{CALC} = 1026.24 + 1020.66517475 * (JD - 2457223.51162037)$$

4.4 Resultados - astrometria

$< \Delta\alpha > \cos\delta = 0.004'' \pm 0.066$ e $< \Delta\delta >= 0.014'' \pm 0.075$ (95 medidas)
$< \Delta\alpha > \cos\delta = 0.005'' \pm 0.018$ e $< \Delta\delta >= 0.014'' \pm 0.017$ (129 medidas)

Tabela 4.1. Diferenças em ascensão reta e declinação, com e sem o uso da técnica de diferença de imagens, são apresentadas na tabela, onde a primeira linha refere-se aos valores médios das diferenças em ascensão reta ($\Delta\alpha \cos\delta$) e declinação ($\Delta\delta$) sem o uso dessa técnica, resultando em $0.004'' \pm 0.066''$ para $\Delta\alpha \cos\delta$ e $0.014'' \pm 0.075''$ para $\Delta\delta$, com base em 95 medidas. A segunda linha apresenta esses valores com o uso da técnica de diferença de imagens, reduzindo as incertezas para $0.005'' \pm 0.018''$ em $\Delta\alpha \cos\delta$ e $0.014'' \pm 0.017''$ em $\Delta\delta$, com um total de 129 medidas. Isso demonstra que a aplicação da técnica de diferença de imagens melhora a precisão da astrometria, reduzindo as incertezas associadas.

Conforme mostra a Figura 4.8, podemos notar que as médias em ascensão reta ($\Delta\alpha \cos\delta$) permaneceram similares porque as observações foram realizadas ao longo de aproximadamente cinco horas, distribuídas simetricamente em relação ao meridiano local. Se tivéssemos tomado apenas algumas medidas ao redor de 15 minutos antes do meridiano local, teríamos observado um desvio de aproximadamente $0,15''$ em ascensão reta sem o uso da técnica de diferença de imagens. A Figura 4.8 é quantificada pela Tabela 4.1.

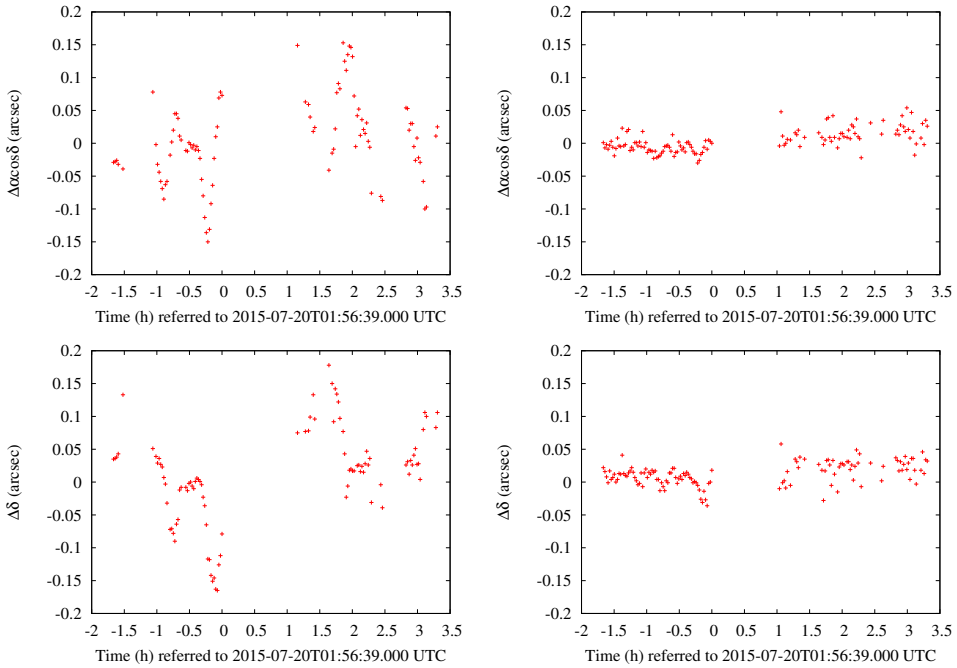


Figura 4.8. Diferenças em ascensão reta, como função do tempo, entre observações e posições de efemérides (https://lesia.obspm.fr/lucky-star/obj.php?p=1076) muito precisas de Chariklo. Painel esquerdo: sem o uso da técnica de diferença de imagens. Painel direito: com o uso da técnica de diferença de imagens.

Há dois pontos a serem notados nos painéis do lado direito na Fig. 4.8. O primeiro é a diferença entre a dispersão das medidas à esquerda e à direita do vazio de pontos. O segundo, e tendo como referência o painel superior direito, é o aumento sistemático do valor dos resíduos com o passar do tempo. Vamos discutí-los separadamente.

O primeiro caso correlaciona-se com o *seeing*. Este passou de $1.16'' \pm 0.11$, antes do vazio de pontos, para $1.38'' \pm 0.07$ (um aumento de 19%). Vale acrescentar, ainda, que o vazio de medidas deve-se a uma deterioração severa do *seeing*, tornando o procedimento de *image differencing* ineficaz neste caso.

O segundo ponto é compatível com o efeito de refração cromática diferencial. Aqui é necessário lembrar que, na época das observações em questão, Chariklo possuía baixa latitude galáctica ($b \sim -5^{\circ}$) e, como consequência, as estrelas utilizadas como referência são bastante avermelhadas. Chariklo, por sua vez, possui um tipo taxonômico BB/BR (Fulchignoni et al., 2008, DeMeo et al., 2009, Perna et al., 2010). Ou seja, seu espectro de reflectância está entre neutro e um pouco mais avermelhado com respeito ao espectro solar.

Assim, como resultado da refração cromática diferencial, as estrelas de referência sofrem, em relação à vertical local, um deslocamento devido à refração menor que o de Chariklo. A Fig. 4.9 ilustra o efeito discutido.

4.4.1 Limite para precisão astrométrica

Uma análise interessante é estimarmos qual a melhor precisão que poderíamos obter com os dados que temos. Essa precisão é aquela obtida na determinação do centroide do objeto cuja distribuição de fluxo é, assim admitimos, bem representada por uma gaussiana circular.

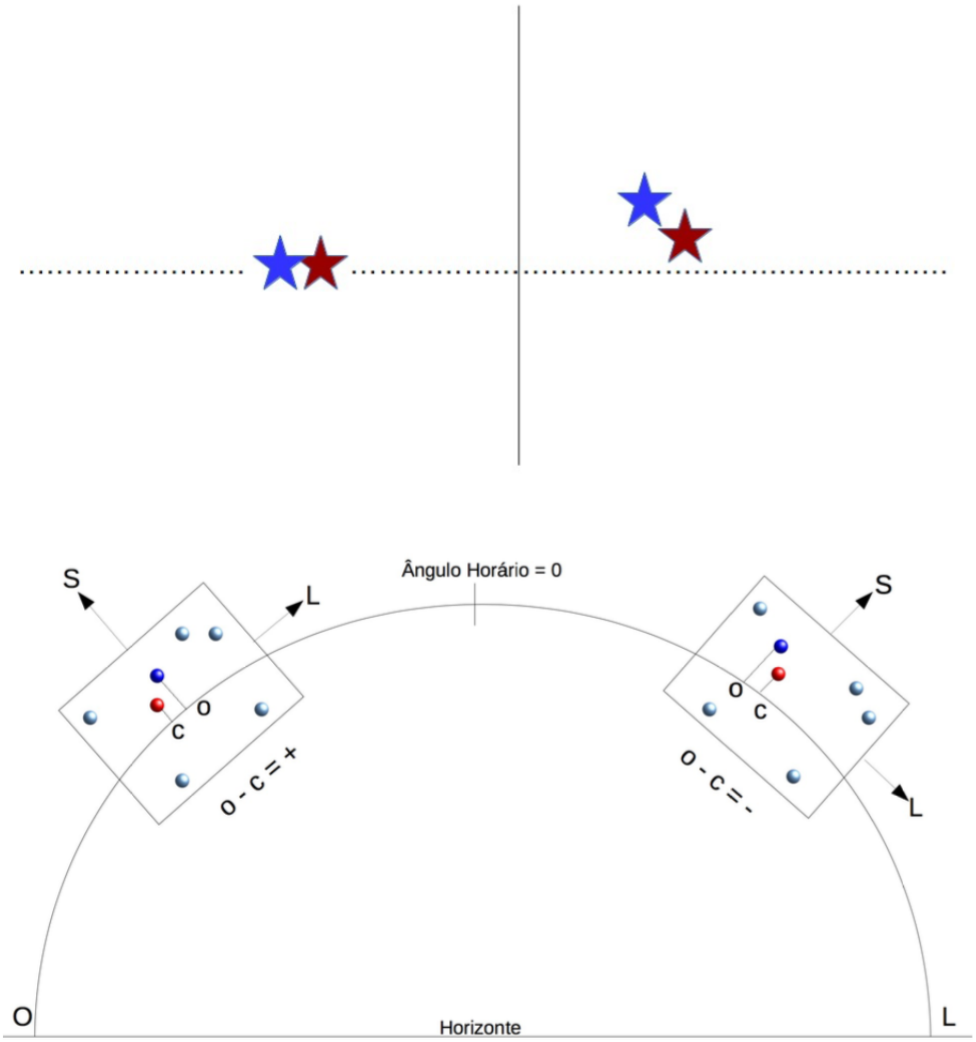


Figura 4.9. Painel superior, lado esquerdo: estrelas de cores diferentes ocupando a mesma altura em relação ao horizonte local e com ausência de atmosfera. Painel superior, lado direito: mesma situação anterior, sob presença da atmosfera. Painel inferior: posição prevista pelas efemérides (C, em vermelho) e posição observada (O, em azul e afetada pela atmosfera) do objeto alvo. Os outros pontos representam estrelas de campo, mais avermelhadas que o objeto alvo. As estrelas à direita representam estrelas próximas do nascente, enquanto que as estrelas à esquerda representam estrelas próximas do poente. Esta imagem foi obtida a partir da dissertação de mestrado de Bassallo da Silva (2017).

Tal estimativa pode ser feita através das relações

$$\sigma_{brilhante} = \frac{\sigma_{PSF}}{\sqrt{c}} \tag{4.2}$$

$$\sigma_{fraca} = \frac{2\sqrt{2\pi \cdot B} \cdot \sigma_{PSF}^2}{c} \tag{4.3}$$

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\sigma_{brilhante}^2 + \sigma_{fraca}^2}, \tag{4.4}$$

onde σ_{PSF} é o desvio padrão da distribuição gaussiana, c é o número de elétrons devido à fonte e B é o número de elétrons devido ao céu (veja King, 1983, Mighell,

2005, Camargo et al., 2022, VALENTIN, 2020).

Tomamos como referência, para medida da PSF e fundo de céu, a terceira imagem da sequência tomada para Chariklo. Ela é mostrada na Fig. 4.10.

Através do IRAF, os seguintes valores foram determinados:

$$\sigma_{PSF} = 3.2 \text{ píxels ou } (0.5'') \tag{4.5}$$

$$\text{contagens do céu} = 77\,319 \tag{4.6}$$

$$\text{contagens do objeto} = 51\,615 \tag{4.7}$$

Deve-se notar que, como mencionado mais acima, o cálculo da incerteza na posição leva em conta o número de elétrons e não o número de contagens. A transformação necessária de contagens para elétron é feita multiplicando-se o primeiro pelo valor do ganho. Para a SOI[3], o valor do ganho é 2. Ainda, vale lembrar que as contagens do céu foram subtraídas nas imagens de referência. Nesse contexto, o valor do fundo de céu é obtido através da relação (Newberry, 1991)

$$B = n\sigma_{bg}^2, \tag{4.8}$$

onde n é o número de píxels ocupados por Chariklo σ_{bg} é o valor do desvio padrão do fundo de céu na imagem de diferença. Com auxílio do IRAF, tomamos diversas medidas desse fundo em diferentes regiões da imagem, sendo então 6.9 um valor representativo desse desvio padrão. Sabendo que o raio pelo qual essa imagem se estende é 22.74 píxels, também obtido com o IRAF, n é dado por

$$n = \pi R^2 = \pi(22.74)^2 = 1\,624 \text{ píxels} \tag{4.9}$$

Nesse contexto, $\sigma_{brilhante} = 2\ mas$ e $\sigma_{fraca} = 2\ mas$. Portanto, num cenário ideal, a incerteza nas coordenadas equatoriais seria dada pelas incertezas na determinação dos centroides em x e y, ou seja, 5 *mas*.

Este último valor é cerca de 1/6 daquele apresentado na segunda linha da Tabela 4.1 e reflete uma diversidade de incertezas que se apresentam na transformação de coordenadas sobre o CCD para coordenadas celestes, incluindo uma aplicação imperfeita no uso DIAPL2 no presente caso.

[3] https://noirlab.edu/science/programs/ctio/instruments/soi/overview

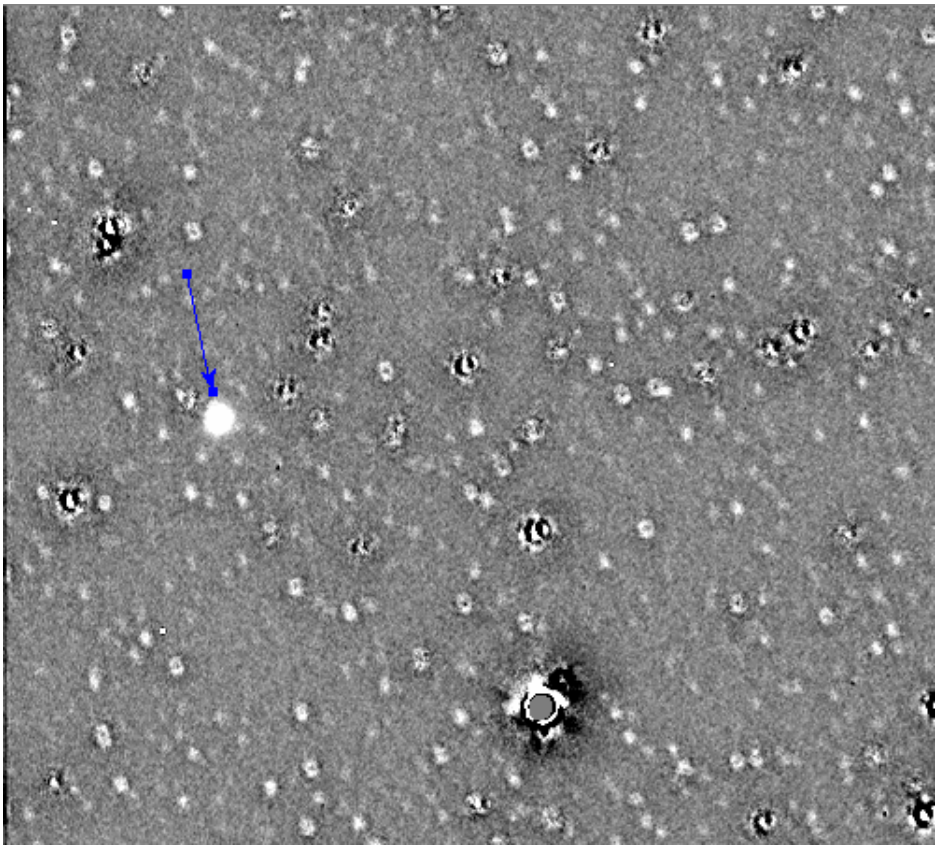


Figura 4.10. Imagem tomada como referência para estimativa da melhor precisão possível que se poderia obter para a posição de Chariklo (indicado pela seta azul).

Capítulo 5

Fotometria

Neste capítulo iremos discutir a metodologia empregada para obtenção de resultados para fotometria, utilizando as ferramentas e técnicas já descritas anteriormente. Em especial, focaremos na aplicação da técnica de diferença de imagens nas imagens de Chariklo, com o objetivo de extrair uma curva de rotação para o mesmo.

5.1 Fotometria nas imagens de Chariklo

5.1.1 Contextualização

Neste trabalho, empregamos dados fotométricos de 127 imagens de Chariklo, coletadas ao longo de um período de aproximadamente 5 horas. É importante destacar que, nesse contexto, essa observação não é suficiente para capturar mais de um ciclo de rotação de Chariklo. Assim, a análise da curva de rotação do objeto é limitada a determinados aspectos. Essa limitação compromete a capacidade de entender variações a longo prazo e de investigar fenômenos dinâmicos complexos. No entanto, mesmo dentro dessas restrições, é viável examinar aspectos fundamentais, como o momento exato em que um lado específico do objeto é observado, o que é definido pela fase rotacional.

A fase rotacional é crucial na astronomia, pois possibilita a determinação e previsão de qual lado o asteroide será visível durante eventos significativos, como ocultações estelares. Essas previsões são vitais para calcular e propagar grandezas importantes, como a posição relativa do objeto em momentos futuros, além de auxiliar no planejamento de observações astronômicas com alta precisão. Dispondo de um período definido na literatura, nosso objetivo é obter um ajuste por série de Fourier dos parâmetros médios do modelo ajustado, levando em conta as incertezas das observações. Esses parâmetros incluem amplitudes, fases e fluxos médios relacionados ao ciclo rotacional do asteroide.

5.1.2 Ajuste por série de Fourier

Aqui, apresentamos a metodologia de ajuste da variação temporal do fluxo proveniente das imagens subtraídas de Chariklo, utilizando uma série de Fourier de segundo grau (veja Bloomfield, 1976). O ajuste é realizado seguindo a equação geral:

$$F(t) = A_0 + A_1 \cos(2\pi f t + \varphi_1) + A_2 \cos(4\pi f t + \varphi_2), \tag{5.1}$$

onde:

- A_0: fluxo médio;
- A_1 e A_2: amplitudes dos harmônicos;
- f: frequência fundamental (inversa do período);
- φ_1 e φ_2: fases dos harmônicos.

A fase combinada no tempo t, denotada por $\varphi(t)$, é determinada pela soma vetorial das contribuições dos harmônicos no plano complexo:

$$\varphi(t) = \tan^{-1}\left[\frac{\mathrm{Im}(F)}{\mathrm{Re}(F)}\right], \tag{5.2}$$

onde:

$$\mathrm{Re}(F) = A_1\cos(\varphi_1) + A_2\cos(\varphi_2),$$
$$\mathrm{Im}(F) = A_1\sin(\varphi_1) + A_2\sin(\varphi_2).$$

Para obter o ajuste desejado, utilizamos um script Python desenvolvido por R. C. Boufleur, o qual pode ser acessado no Apêndice B em B. Especificamente, o módulo `LombScargle`[1] da biblioteca `astropy` foi empregado para encontrar o modelo que melhor se ajusta aos dados fotométricos de Chariklo.

O módulo `LombScargle` do Astropy é uma ferramenta usada para detectar sinais periódicos em dados observacionais irregulares. Neste trabalho, utilizamos imagens adquiridas durante um intervalo de uma observação de aproximadamente 5 horas. Esta duração é inferior ao período de rotação de Chariklo. O Lomb-Scargle implementa um método estatístico que se destaca por sua robustez e eficiência na identificação de periodicidades em séries temporais, incluindo aquelas de cadência irregular (veja Lomb, 1976, Scargle, 1982, Hocke and Kämpfer, 2009, Zechmeister and Kürster, 2009).

O módulo oferece diversas funcionalidades que facilitam a análise de dados. Entre elas, podemos destacar:

- Cálculo do periodograma: A função `autopower()` calcula o periodograma de Lomb-Scargle para um conjunto de dados de tempo e valores.
- Manipulação de incertezas: O módulo permite incorporar incertezas nas medidas, o que é crucial para obter resultados confiáveis.
- Normalizações: O Lomb-Scargle oferece diferentes normalizações para o periodograma, permitindo ajustar a interpretação dos resultados.
- Múltiplos termos: É possível ajustar o modelo para incluir mais de um termo sinusoidal, expandindo a capacidade de detecção de periodicidades complexas.
- Modelagem: Permite ajustar modelos de seno/cosseno aos dados para obter coeficientes de melhor ajuste.

[1] https://docs.astropy.org/en/stable/timeseries/lombscargle.html#id29

Estas características tornam o método particularmente adequado para a análise de dados astronômicos irregularmente amostrados (Press et al., 1986).

O LombScargle do Astropy retorna os coeficientes da decomposição de Fourier na base de seno e cosseno, em vez de amplitudes e fases, pois ajusta diretamente os termos na forma $a_n cos(\omega t) + b_n sen(\omega t)$, onde a_n e b_n são os coeficientes de Fourier. Portanto, obtemos parâmetros a_0, a_1, b_1, a_2 e b_2 ajustados para minimizar os resíduos entre o modelo teórico e os dados observacionais.

Para facilitar a interpretação dos resultados, esses coeficientes podem ser convertidos em amplitudes A_n e fases φ_n das respectivas componentes harmônicas. Essa transformação é fundamentada na Fórmula de Euler, que expressa as funções seno e cosseno em termos de exponenciais complexas (Arfken and Weber, 2005). A amplitude A_n e a fase φ_n estão relacionadas aos coeficientes de Fourier pelas seguintes transformações:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{5.3}$$

$$\varphi_n = -\arctan\frac{b_n}{a_n} \tag{5.4}$$

ou seja:

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \tag{5.5}$$

$$\varphi_1 = -\arctan\frac{b_1}{a_1} \tag{5.6}$$

$$A_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \tag{5.7}$$

$$\varphi_2 = -\arctan\frac{b_2}{a_2} \tag{5.8}$$

O modelo de Lomb-Scargle opera com frequência angular, onde os valores de φ_n estão definidos no intervalo:

$$\varphi_n \in [0, 2\pi) \tag{5.9}$$

Isso significa que φ_n é medido em "revoluções completas", onde 2π radianos correspondem a 360°. Podemos interpretar a fase em termos de tempo da seguinte forma:

- Uma volta completa (2π) representa um período completo da onda;
- A fase φ_n desloca a onda no domínio temporal proporcionalmente ao seu valor angular.

Com relação à Equação 5.4, o sinal negativo é introduzido para garantir que a fase (φ_n) esteja alinhada corretamente com o cosseno. O modelo harmônico utilizado é fundamentado no cosseno:

$$x(t) = A_n \cos\left(n\omega_0 t + \varphi_n\right)$$

O cosseno inicia com valor máximo +1 em $t = 0$. Portanto, para deslocar esta onda no tempo, é necessário ajustar φ_n para determinar o ponto inicial da função.

Considerando a relação entre cosseno e seno:

- O seno apresenta crescimento positivo no sentido anti-horário;
- O cosseno decresce para a direita no círculo trigonométrico.

Portanto, para que a fase (φ_n) corresponda adequadamente ao modelo baseado no cosseno, é necessário inverter o sinal do seno (b_n) para ajustar sua direção no círculo trigonométrico. Na ausência deste sinal negativo, a fase não indicaria corretamente o ponto inicial da onda.

5.1.3 Simulações de Monte Carlo

Neste trabalho usamos simulações de Monte Carlo para caracterizar as incertezas associadas aos parâmetros físicos derivados do ajuste realizado. Esta abordagem estatística robusta é fundamental quando lidamos com dados astronômicos que apresentam incertezas intrínsecas tanto nas medidas fotométricas quanto nos períodos determinados. As simulações nos permitem propagar essas incertezas através de todo o processo de análise, desde as observações iniciais até os parâmetros físicos finais derivados para os objetos estudados.

A metodologia de Monte Carlo é particularmente adequada para este tipo de análise por sua capacidade de lidar com distribuições de probabilidade complexas e interdependentes. Ao realizar múltiplas iterações com parâmetros ligeiramente diferentes, podemos construir um panorama estatisticamente significativo das incertezas e correlações presentes em nossos resultados. Essas iterações atuam sobre diferentes valores dos pontos (fluxos) que compõem a curva de luz, i.e., diferentes curvas de luz são formadas variando-se o valor de cada ponto segundo uma distribuição gaussiana com média igual ao valor observado do mesmo e desvio padrão igual à incerteza na medida desse ponto.

Esta abordagem é especialmente relevante no contexto de observações astronômicas, onde as fontes de erro são múltiplas e frequentemente não triviais. A simulação de Monte Carlo é uma técnica que nos permite quantificar as incertezas em nossa análise de forma robusta e sistemática. Em nossa implementação específica, levamos em conta as seguintes características:

- A distribuição gaussiana para o período rotacional é parametrizada com σ derivado das incertezas observacionais reportadas, tipicamente da ordem de algumas horas;
- O processo de reamostragem dos fluxos utiliza um método de bootstraping/-reposição (um dos dois), onde cada medida é tratada como uma distribuição normal com média igual ao valor observado e desvio padrão igual à incerteza reportada;
- Para cada iteração da simulação, um novo conjunto de dados é gerado e o ajuste completo é realizado, permitindo-nos construir distribuições de probabilidade para cada parâmetro de interesse.

Este método também é importante para:

- Revelar possíveis correlações entre os parâmetros que poderiam não ser evidentes em uma análise determinística;

- Fornecer estimativas mais realistas das incertezas, que incorporam tanto os erros observacionais quanto as limitações intrínsecas do modelo;
- Permitir a identificação de possíveis soluções múltiplas ou degenerescências no espaço de parâmetros.

As simulações são repetidas 1 milhão de vezes para garantir uma amostragem estatisticamente significativa do espaço de parâmetros, resultando em distribuições bem caracterizadas para todos os parâmetros do ajuste.

5.1.4 Propagação de erros com ponderação

A ponderação pelas amplitudes é importante pelos seguintes aspectos:

- **Contribuição relativa ao sinal:** Harmônicos com maior amplitude (A_1 ou A_2) têm maior impacto no sinal combinado. Isso ocorre porque suas contribuições para $\mathrm{Re}(F)$ e $\mathrm{Im}(F)$ são proporcionalmente maiores, o que afeta diretamente a fase total $\varphi(t)$.
- **Redução de incertezas:** A fase de um harmônico com maior amplitude é mais representativa para a fase total do que a fase de um harmônico com menor amplitude. Ponderar as incertezas pelas amplitudes garante que o erro associado a cada harmônico seja proporcional à sua relevância no sinal combinado.
- **Prevenção de superestimação:** Sem ponderação, as incertezas das fases de harmônicos menos significativos ($A_2 \ll A_1$ ou vice-versa) teriam um peso desproporcional, resultando em uma superestimação da incerteza combinada.

A incerteza combinada da fase $\varphi(t)$ é calculada como:

$$\sigma_{\varphi(t)} = \sqrt{\left(\frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot \sigma_{\varphi_1}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_1 + A_2} \cdot \sigma_{\varphi_2}\right)^2}$$

Onde:

- $\frac{A_1}{A_1+A_2}$ e $\frac{A_2}{A_1+A_2}$ são os pesos relativos das amplitudes;
- σ_{φ_1} e σ_{φ_2} são as incertezas individuais das fases dos harmônicos.

Benefícios da ponderação

- **Representação física:** A ponderação assegura que a incerteza combinada seja dominada pelos harmônicos que realmente contribuem mais para o sinal.
- **Precisão da incerteza:** O resultado é uma incerteza que captura com precisão a relevância de cada harmônico, evitando inflar o erro total.
- **Extensibilidade:** Essa abordagem pode ser estendida para sinais com mais de dois harmônicos, mantendo a mesma lógica de relevância proporcional às amplitudes.

Neste capítulo iremos analisar os resultados obtidos a partir da astrometria e fotometria realizadas com DAOPHOT e PRAIA. Além disso, mostraremos resultados oriundos da aplicação da técnica de diferença de imagens, utilizando a ferramenta DIAPL2, que também nos permitiu obter um ajuste para a curva de rotação de Chariklo.

5.2 Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados fotométricos das imagens de Chariklo, obtidos através das imagens de diferença. Também é feita uma comparação da fotometria com e sem a aplicação da DIA.

5.2.1 Curva de rotação de Chariklo com DIA

O procedimento de ajuste da curva inicia-se com a definição do tempo t como sendo a diferença entre o tempo de observação (t_o) e um tempo de referência pré-estabelecido, que para este caso é $t_{ref} = 2457223.5$. Esta definição é expressa matematicamente da seguinte forma:

$$t = t_o - t_{ref}. \tag{5.10}$$

Ou seja, essa equação converte os valores de t_o em tempos relativos a um ponto de referência. Subtraindo um tempo de referência fixo (t_{ref}), convertemos números grandes, como a data juliana, em números menores e mais manejáveis. Além disso, o modelo rotacional da curva de luz fundamenta-se na adição de funções seno e cosseno, cujas fases são influenciadas pelo ponto inicial destas séries temporais. Para assegurar a adequada propagação de erros, estabelecemos um tempo de referência que se associa diretamente ao período em que as observações ocorreram. Esta definição é necessária para converter adequadamente o tempo t em uma fase rotacional, o que é feito da seguinte maneira:

$$\text{fase}_{\text{rot}} = \frac{t}{T} \bmod 1, \tag{5.11}$$

onde fase_{rot} representa a fase rotacional normalizada pelo período T, contida no intervalo fechado $[0, 1]$, e mod1 calcula o resto da divisão de t/T por 1. Para um ajuste completo, é necessário considerar as incertezas, como a do período de Chariklo, além das incertezas instrumentais, como a medição do fluxo.

Incorporamos a incerteza do período nos parâmetros obtidos através da série de Fourier para avaliar a precisão, especialmente em relação à fase rotacional de Chariklo. Nosso objetivo aqui é evidenciar a incerteza na determinação do pico de fluxo máximo do ajuste e propagar essa incerteza para observações futuras. Para quantificar essa incerteza, realizamos uma simulação de distribuição normal de períodos, com $n_{\text{simulacoes}} = 1000000$, centrada no período do alvo, ou seja, $T = 7.004 \pm 0.036$ h (Fornasier et al., 2014). Com isso, definimos $\mu_T = 7.004$ h como a média dos períodos e $\sigma_T = 0.036$ h como o desvio padrão. Ainda, para cada um dos períodos simulados, os valores de fluxo que compõem a curva de luz foram variados seguindo uma distribuição gaussiana tendo como média o valor do ponto (fluxo) e como desvio padrão igual à incerteza no fluxo. Um milhão de tais variações foram feitas, de forma que os parâmetros da curva de fase, e suas respectivas incertezas, são oriundos de um total de 1 bilhão de simulações.

O componente total da rotação resulta da soma dos dois harmônicos, implicando que os picos refletem as incertezas de ambos φ_1 e φ_2. Matematicamente, podemos calcular isso como:

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\left(\frac{A_1}{A_1 + A_2} \cdot \sigma_{\varphi 1}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_1 + A_2} \cdot \sigma_{\varphi 2}\right)^2} \tag{5.12}$$

Parâmetro	Valor
A_1	5400 ± 200
φ_1	0.621 ± 0.002
A_2	6500 ± 100
φ_2	0.678 ± 0.004

Tabela 5.1. Parâmetros da série de Fourier e as incertezas correspondentes derivadas da incerteza do período. Neste caso, a fase foi ajustada para o intervalo [0,1], ou seja, realizamos a divisão por 2π.

Nesta fórmula:

- $\frac{A_1}{A_1+A_2}$ e $\frac{A_2}{A_1+A_2}$ são os pesos relativos das amplitudes, disponíveis na Tabela 5.1;
- σ_{φ_1} e σ_{φ_2} são as incertezas individuais das fases dos harmônicos, disponíveis na Tabela 5.1.

Após a realização dos cálculos, obtemos $\sigma_{\varphi 1} = 0.002$ e $\sigma_{\varphi 2} = 0.004$. Com isso:

$$\sigma_{\varphi} = 0.002. \tag{5.13}$$

Com relação à incerteza do fluxo σ_F, consideramos a seguinte equação:

$$\sigma_F = \sqrt{N_{\text{objeto}} + N_{\text{céu}}}, \tag{5.14}$$

onde N_{objeto} é o ruído do objeto, $N_{céu}$ o ruído do céu. Matematicamente, podemos definir:

$$N_{\text{céu}} = n \cdot (\sigma_{\text{céu}})^2, \tag{5.15}$$

em que $n = \pi \cdot r^2$ é o número de pixels que contêm contagens válidas do objeto, com r sendo o raio de abertura em que o fluxo do objeto foi calculado. Neste trabalho definimos $r = 10$ pixels, resultando em um $n = 314.159$ pixels. O $\sigma_{\text{céu}}$ é o desvio padrão das contagens de uma região do céu próxima ao objeto (mas que contenha apenas céu). Com isso, temos:

$$\sigma_F = \sqrt{N_{\text{objeto}} + n \cdot (\sigma_{\text{céu}})^2}. \tag{5.16}$$

Aqui, σ_F é calculado para cada imagem de diferença e seu valor contribui para cada barra de erro do gráfico da Figura 5.1. O resultado final do ajuste é apresentado na Tabela 5.1.

5.2.2 Comparação da fotometria com e sem DIA

Para avaliar quantitativamente o impacto da DIA na qualidade da fotometria em campos estelares densos, realizamos também a extração do fluxo de Chariklo diretamente das imagens reamostradas, sem aplicar a DIA. A Figura 5.2 apresenta esta comparação.

O painel esquerdo da Figura 5.2 mostra a variação da magnitude instrumental de Chariklo (filtro R Bessel) em função do tempo, obtida através de fotometria PSF aplicada diretamente nas imagens antes da subtração diferencial. A forma da curva

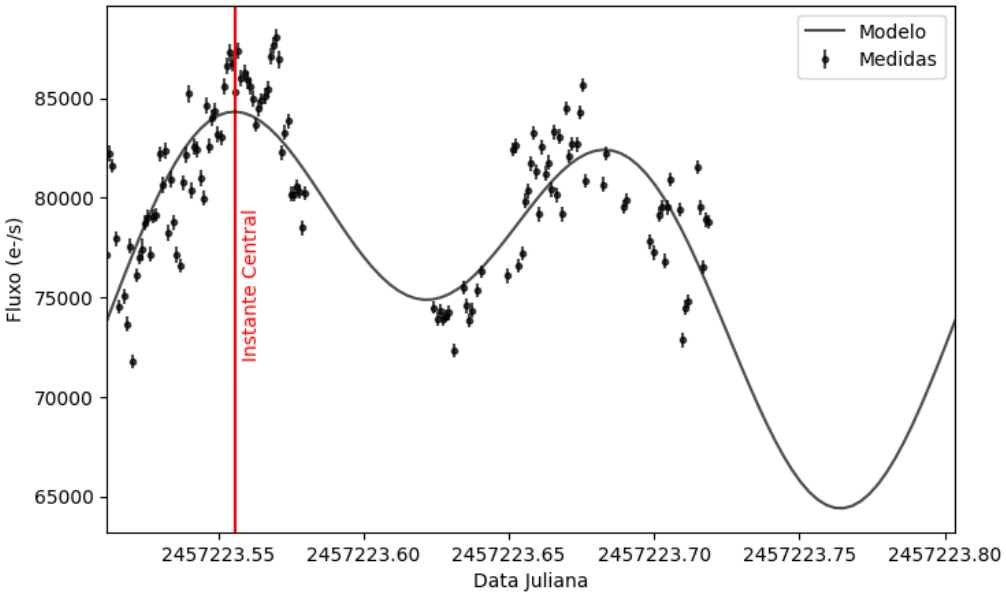


Figura 5.1. A fase foi ajustada para o pico central na curva de luz de Chariklo, com incerteza $\sigma_\varphi = 0.002$. Este pico foi associado ao hemisfério de Chariklo que possui maior fluxo. Para este pico, Chariklo apresentava um ângulo de fase de 69.1°±0.9°, o que corresponde a 2457223.5560 JD± 0.002 JD, ou seja, 1.3442 horas após o início da observação.

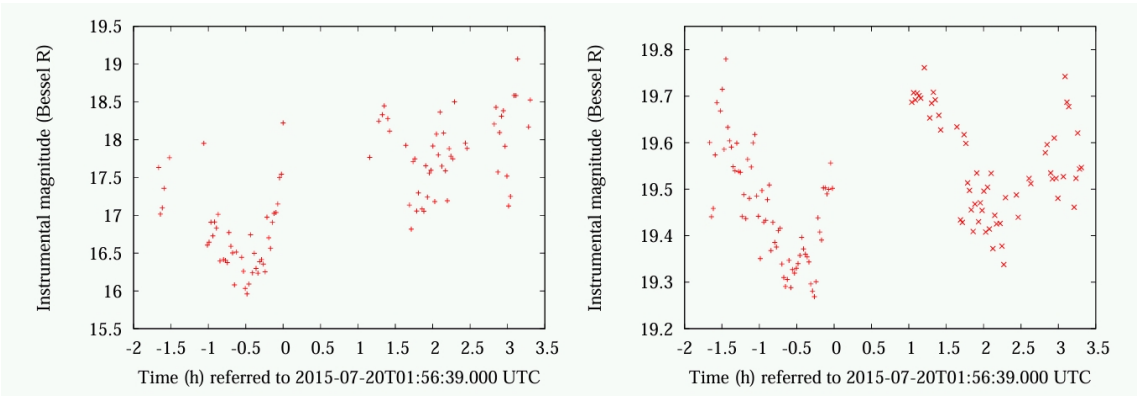


Figura 5.2. Variação da magnitude instrumental (Bessel R) em função do tempo em horas.

de luz obtida fica claramente menos nítida em comparação com aquela oriunda da aplicação da DIA.

Em contrapartida, o painel direito da Figura 5.2 exibe a fotometria de abertura realizada sobre as imagens de diferença (resultado da aplicação da DIA). Nota-se de maneira bastante mais clara, em comparação com o painel esquerdo, a variação da magnitude que resulta da rotação do corpo.

A comparação entre o painel esquerdo (sem DIA) e o painel direito (com DIA) da Figura 5.2, bem como com a Figura 5.1 (que mostra o fluxo da curva com DIA como função do tempo), demonstra a eficácia da DIA para estudos fotométricos de objetos como Chariklo em campos estelares densos.

Capítulo 6

Conclusões e comentários

6.1 Astrometria e fotometria

Obtivemos posições do Centauro (10199) Chariklo através da análise das imagens diretamente oriundas do imageador SOI (*SOAR Optical Imager* - descomissionado) e também através do uso da técnica de diferença de imagens (DIA *Difference Image Analysis*). Esta última deve-se ao fato de Chariklo encontrar-se, na época em que as observações com a SOI foram realizadas, num campo estelar muito denso. Em tais campos, o fluxo do alvo fica contaminado pelo fluxo de objetos do campo, o que em muito dificulta tanto tarefas astrométricas quanto fotométricas.

Antes de aplicar a técnica de DIA às imagens reais, foi crucial avaliar a capacidade das ferramentas astrométricas em determinar as posições das estrelas de referência astrométricas nesses mesmos campos densos, onde a DIA não pode ser usada. Para isso, realizamos uma análise detalhada (Capítulo 3) utilizando uma imagem CCD simulada de um campo estelar denso com posições conhecidas. Comparamos os resultados do pacote PRAIA com os do DAOPHOT.

A análise mostrou que, embora o DAOPHOT pudesse alcançar desvios radiais médios ligeiramente menores em certas configurações, o desempenho do PRAIA foi similar, tendo em conta o uso de uma gaussiana circular como PSF (Tabela 3.1). Observou-se, no entanto, uma baixa correlação quanto à precisão astrométrica em relação à magnitude das estrelas e à distância das mesmas ao centro da imagem. Isso foi evidenciado pelos valores próximos de zero do coeficiente de correlação de Pearson. Esta etapa validou o uso do PRAIA para a determinação confiável dos centroides das estrelas de referência astrométrica nos dados observacionais de Chariklo, mesmo sob condições de alta densidade estelar.

Se a astrometria a partir da DIA permite que se trabalhe sobre o fluxo do alvo idealmente livre daquele de objetos do campo ela, pela natureza do método, retira da imagem subtraída as estrelas que servirão como referência. Neste ponto, nos valemos do excelente alinhamento que existe entre a imagem modelo, na qual o alvo móvel não aparece, e as imagens que ela irá subtrair (imagens realinhadas). Nesse contexto, as coordenadas sobre o CCD do alvo, calculadas na imagem de diferença e sem a influência (ou com mínima influência) de fluxos espúrios, são utilizadas em conjunto com as coordenadas de estrelas de referência presentes na respectiva imagem realinhada.

As posições obtidas desse procedimento ficaram próximas daquelas oriundas de efemérides precisas de Chariklo, com um desvio padrão entre 4 e 5 vezes menor que

aquele oriundo da astrometria aplicada sobre as imagens diretamente oriundas do telescópio. Além disso, um número maior de imagens contribui para a astrometria.

Como consequência de uma medida mais precisa de fluxo através da DIA, o estudo da curva de luz rotacional foi possível. Os resultados mostram que podemos conhecer a fase rotacional de Chariklo com incerteza de $21,6^{o}$ uma semana após essas observações e $43,2^{o}$ após duas semanas. Portanto, apesar das dificuldades, a DIA auxilia no uso de dados oriundos de campos densos na combinação de cordas de ocultações estelares obtidas em épocas diferentes. Sem dúvida, num contexto mais amplo, o estudo da rotação de pequenos corpos em campos densos tem como refúgio seguro o uso da DIA.

O pacote que utilizamos para aplicar a DIA possui muitos parâmetros e ajustá-los de forma perfeita não nos parece ser uma tarefa fácil (e tampouco conseguimos neste trabalho). Este ajuste foi um dos gargalos do tempo gasto para sua aplicação e, junto com o melhor conhecimento de como tais parâmetros atuam, técnicas de *machine learning* parecem ser boas candidatas para um preenchimento otimizado dos arquivos de parâmetros. O tempo gasto para cada subtração das imagens de ciência aqui utilizadas é de poucos segundos numa máquina com processador i7, 1200MHz (CPU), 128 GB (RAM). Num contexto onde há um grande número dessas imagens, lançar cada uma em um núcleo diferente do processador é recomendável.

Vale ainda ressaltar que o Legacy Survey of Space and Time (LSST) não cobrirá toda a esfera celeste. Portanto, o trabalho aqui desenvolvido será particularmente útil no caso de alvos de interesse não observados por esse grande levantamento.

Referências Bibliográficas

C. Alard. Image subtraction using a space-varying kernel. , 144:363–370, June 2000. doi: 10.1051/aas:2000214. 8, 41

C. Alard and Robert H. Lupton. A Method for Optimal Image Subtraction. , 503 (1):325–331, August 1998. doi: 10.1086/305984. iii, 2, 8, 9, 27, 40, 41

K. Altwegg, H. Balsiger, A. Bar-Nun, J. J. Berthelier, A. Bieler, P. Bochsler, C. Briois, U. Calmonte, M. Combi, J. De Keyser, P. Eberhardt, B. Fiethe, S. Fuselier, S. Gasc, T. I. Gombosi, K. C. Hansen, M. Hässig, A. Jäckel, E. Kopp, A. Korth, L. LeRoy, U. Mall, B. Marty, O. Mousis, E. Neefs, T. Owen, H. Rème, M. Rubin, T. Sémon, C. Y. Tzou, H. Waite, and P. Wurz. 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science*, 347(6220):1261952, January 2015. doi: 10.1126/science.1261952. 15

R. A. N. Araujo, O. C. Winter, and R. Sfair. Rings under close encounters with the giant planets: Chariklo versus Chiron. , 479(4):4770–4777, October 2018. doi: 10.1093/mnras/sty1770. 17

George B. Arfken and Hans J. Weber. *Mathematical methods for physicists 6th ed.* 2005. 52

M. Assafin, R. Vieira Martins, J. I. B. Camargo, A. H. Andrei, D. N. Da Silva Neto, and F. Braga-Ribas. PRAIA - Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically. In *Gaia follow-up network for the solar system objects : Gaia FUN-SSO workshop proceedings*, pages 85–88, June 2011. 1

M. V. Banda-Huarca, J. I. B. Camargo, J. Desmars, R. L. C. Ogando, R. Vieira-Martins, M. Assafin, L. N. da Costa, G. M. Bernstein, M. Carrasco Kind, A. Drlica-Wagner, R. Gomes, M. M. Gysi, F. Braga-Ribas, M. A. G. Maia, D. W. Gerdes, S. Hamilton, W. Wester, T. M. C. Abbott, F. B. Abdalla, S. Allam, S. Avila, E. Bertin, D. Brooks, E. Buckley-Geer, D. L. Burke, A. Carnero Rosell, J. Carretero, C. E. Cunha, C. Davis, J. De Vicente, H. T. Diehl, P. Doel, P. Fosalba, J. Frieman, J. García-Bellido, E. Gaztanaga, D. Gruen, R. A. Gruendl, J. Gschwend, G. Gutierrez, W. G. Hartley, D. L. Hollowood, K. Honscheid, D. J. James, K. Kuehn, N. Kuropatkin, F. Menanteau, C. J. Miller, R. Miquel, A. A. Plazas, A. K. Romer, E. Sanchez, V. Scarpine, M. Schubnell, S. Serrano, I. Sevilla-Noarbe, M. Smith, M. Soares-Santos, F. Sobreira, E. Suchyta, M. E. C. Swanson, G. Tarle, and DES Collaboration. Astrometry and Occultation Predictions to Trans-Neptunian and Centaur Objects Observed within the Dark Energy Survey. , 157(3):120, March 2019. doi: 10.3847/1538-3881/aafb37. 2

M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and Renee Dotson. *The Solar System Beyond Neptune*. 2008. 19

T. Bassallo da Silva. Redução de imagens astronômicas obtidas a partir do solo: preparando-se para a astrometria da missão espacial gaia. Master's thesis, Observatorio Nacional, 2017. v, 47

A. Bellini, G. Piotto, L. R. Bedin, J. Anderson, I. Platais, Y. Momany, A. Moretti, A. P. Milone, and S. Ortolani. Ground-based CCD astrometry with wide field imagers. III. WFI@2.2m proper-motion catalog of the globular cluster ω Centauri. *A&A*, 493(3):959–978, January 2009. doi: 10.1051/0004-6361:200810880. 6

A. Bieler, K. Altwegg, H. Balsiger, A. Bar-Nun, J. J. Berthelier, P. Bochsler, C. Briois, U. Calmonte, M. Combi, J. de Keyser, E. F. van Dishoeck, B. Fiethe, S. A. Fuselier, S. Gasc, T. I. Gombosi, K. C. Hansen, M. Hässig, A. Jäckel, E. Kopp, A. Korth, L. Le Roy, U. Mall, R. Maggiolo, B. Marty, O. Mousis, T. Owen, H. Rème, M. Rubin, T. Sémon, C. Y. Tzou, J. H. Waite, C. Walsh, and P. Wurz. Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. , 526(7575):678–681, October 2015. doi: 10.1038/nature15707. 15

Peter Bloomfield. *Fourier analysis of time series: an introduction*. 1976. 50

Jr. Bottke, W. F., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel. *Asteroids III*. 2002. 10, 13

William F. Bottke, Daniel D. Durda, David Nesvorný, Robert Jedicke, Alessandro Morbidelli, David Vokrouhlický, and Harold F. Levison. Linking the collisional history of the main asteroid belt to its dynamical excitation and depletion. , 179 (1):63–94, December 2005. doi: 10.1016/j.icarus.2005.05.017. 13

William F. Bottke, David Vokrouhlický, and David Nesvorný. An asteroid breakup 160Myr ago as the probable source of the K/T impactor. , 449(7158):48–53, September 2007. doi: 10.1038/nature06070. 13

F. Braga-Ribas, B. Sicardy, J. L. Ortiz, R. Vieira Martins, F. Colas, R. Duffard, J. I. B. Camargo, J. Desmars, A. Gulbis, M. Assafin, L. Maquet, W. Beisker, G. Benedetti-Rossi, F. Vachier, C. Dumas, V. D. Ivanov, S. Renner, K. L. Bath, A. Klotz, and J. T. Pollock. The Ring System Discovered Around the Centaur Object (10199) Chariklo. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2014, pages P43F–01, December 2014. 11, 18, 19

D. M. Bramich. A new algorithm for difference image analysis. , 386(1):L77–L81, May 2008. doi: 10.1111/j.1745-3933.2008.00464.x. 2, 7

D. M. Bramich, Keith Horne, M. D. Albrow, Y. Tsapras, C. Snodgrass, R. A. Street, M. Hundertmark, Noé Kains, A. Arellano Ferro, Jaimes R. Figuera, and Sunetra Giridhar. Difference image analysis: extension to a spatially varying photometric scale factor and other considerations. , 428(3):2275–2289, January 2013. doi: 10.1093/mnras/sts184. 40, 41

D. M. Bramich, Keith Horne, K. A. Alsubai, E. Bachelet, D. Mislis, and N. Parley. Difference image analysis: automatic kernel design using information criteria. , 457(1):542–574, March 2016. doi: 10.1093/mnras/stv2910. 2, 7, 8

Alessandro Bressan, Paola Marigo, Léo. Girardi, Bernardo Salasnich, Claudia Dal Cero, Stefano Rubele, and Ambra Nanni. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. , 427(1):127–145, November 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x. 30

Schelte J. Bus and Richard P. Binzel. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. , 158(1):146–177, July 2002. doi: 10.1006/icar.2002.6856. 2, 13

Nahuel Cabral, Aurélie Guilbert-Lepoutre, Wesley C. Fraser, Michaël Marsset, Kathryn Volk, Jean-Marc Petit, Philippe Rousselot, Mike Alexandersen, Michele T. Bannister, Ying-Tung Chen, Brett Gladman, Stephen D. J. Gwyn, and John J. Kavelaars. OSSOS. XI. No active centaurs in the Outer Solar System Origins Survey. *A&A*, 621:A102, January 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201834021. 17

J. I. B. Camargo, C. H. Veiga, R. Vieira-Martins, A. Fienga, and M. Assafin. The five largest satellites of Uranus: Astrometric observations spread over 29 years at the Pico dos Dias Observatory. , 210:105376, January 2022. doi: 10.1016/j.pss.2021.105376. 48

Bradley W. Carroll and Dale A. Ostlie. *An Introduction to Modern Astrophysics*. 1996. 14

V. Carruba, J. I. B. Camargo, S. Aljbaae, F. S. Ferreira, E. Lin, V. Figueiredo-Peixoto, M. V. Banda-Huarca, A. Pieres, R. C. Boufleur, L. N. da Costa, T. M. C. Abbott, M. Aguena, Sahar S. Allam, O. Alves, P. H. Bernardinelli, E. Bertin, D. Brooks, A. Carnero Rosell, J. Carretero, M. E. S. Pereira, T. M. Davis, J. De Vicente, S. Desai, P. Doel, I. Ferrero, D. Friedel, J. Frieman, J. García-Bellido, M. Gatti, G. Giannini, D. Gruen, R. A. Gruendl, K. Herner, S. R. Hinton, D. L. Hollowood, D. J. James, S. Kent, K. Kuehn, O. Lahav, J. L. Marshall, J. Mena-Fernández, R. Miquel, A. Palmese, A. A. Plazas Malagón, M. Rodríguez-Monroy, E. Sanchez, B. Santiago, M. Schubnell, M. Smith, E. Suchyta, M. E. C. Swanson, G. Tarle, A. R. Walker, N. Weaverdyck, P. Wiseman, and DES Collaboration. Main belt asteroids taxonomical information from dark energy survey data. , 527 (3):6495–6505, January 2024. doi: 10.1093/mnras/stad3466. 2

B. Carry. Density of asteroids. , 73(1):98–118, December 2012. doi: 10.1016/j.pss.2012.03.009. 12

B. Carry, F. Vachier, J. Berthier, M. Marsset, P. Vernazza, J. Grice, W. J. Merline, E. Lagadec, A. Fienga, A. Conrad, E. Podlewska-Gaca, T. Santana-Ros, M. Viikinkoski, J. Hanuš, C. Dumas, J. D. Drummond, P. M. Tamblyn, C. R. Chapman, R. Behrend, L. Bernasconi, P. Bartczak, Z. Benkhaldoun, M. Birlan, J. Castillo-Rogez, F. Cipriani, F. Colas, A. Drouard, J. Ďurech, B. L. Enke, S. Fauvaud, M. Ferrais, R. Fetick, T. Fusco, M. Gillon, E. Jehin, L. Jorda, M. Kaasalainen, M. Keppler, A. Kryszczynska, P. Lamy, F. Marchis, A. Marciniak, T. Michalowski, P. Michel, M. Pajuelo, P. Tanga, A. Vigan, B. Warner, O. Witasse, B. Yang, and A. Zurlo. Homogeneous internal structure of CM-like asteroid (41) Daphne. *A&A*, 623:A132, March 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201833898. 13

B. Carry, P. Vernazza, F. Vachier, M. Neveu, J. Berthier, J. Hanuš, M. Ferrais, L. Jorda, M. Marsset, M. Viikinkoski, P. Bartczak, R. Behrend, Z. Benkhaldoun, M. Birlan, J. Castillo-Rogez, F. Cipriani, F. Colas, A. Drouard, G. P. Dudziński, J. Desmars, C. Dumas, J. Ďurech, R. Fetick, T. Fusco, J. Grice, E. Jehin, M. Kaasalainen, A. Kryszczynska, P. Lamy, F. Marchis, A. Marciniak, T. Michalowski, P. Michel, M. Pajuelo, E. Podlewska-Gaca, N. Rambaux, T. Santana-Ros, A. Storrs, P. Tanga, A. Vigan, B. Warner, M. Wieczorek, O. Witasse, and B. Yang. Evidence for differentiation of the most primitive small bodies. *A&A*, 650:A129, June 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202140342. 13

J. M. Carvano, P. H. Hasselmann, D. Lazzaro, and T. Mothé-Diniz. SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids. *A&A*, 510: A43, February 2010. doi: 10.1051/0004-6361/200913322. 2

F. J. Castander, S. Serrano, M. Eriksen, E. Gaztañaga, R. Casas, A. Alarcon, A. H. Bauer, E. Fernández, D. Navarro-Gironés, N. Tonello, L. Cabayol, J. Carretero, J. De Vicente, J. Garcia-Bellido, H. Hildebrandt, H. Hoekstra, B. Joachimi, R. Miquel, C. Padilla, P. Renard, E. Sanchez, I. Sevilla-Noarre, and P. Tallada-Crespí. The PAU survey: photometric calibration of narrow band images. , 531(4):5067–5083, July 2024. doi: 10.1093/mnras/stae1507. 5

C. A. Christian. CCD stellar photometry. In J. P. Baluteau and S. D'Odorico, editors, *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings*, volume 25 of *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings*, pages 189–201, January 1987. 6

C. F. Chyba. Impact delivery and erosion of planetary oceans in the early inner Solar System. , 343(6254):129–133, January 1990. doi: 10.1038/343129a0. 17

James N. Connelly, Martin Bizzarro, Alexander N. Krot, Åke Nordlund, Daniel Wielandt, and Marina A. Ivanova. The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk. *Science*, 338(6107):651, November 2012. doi: 10.1126/science.1226919. 13

R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, C. A. Beichman, J. M. Carpenter, T. Chester, L. Cambresy, T. Evans, J. Fowler, J. Gizis, E. Howard, J. Huchra, T. Jarrett, E. L. Kopan, J. D. Kirkpatrick, R. M. Light, K. A. Marsh, H. McCallon, S. Schneider, R. Stiening, M. Sykes, M. Weinberg, W. A. Wheaton, S. Wheelock, and N. Zacarias. *2MASS All Sky Catalog of point sources.* 2003. 26

James M. D. Day. Planet formation processes revealed by meteorites. *Geology Today*, 31(1):12–20, January 2015. doi: 10.1111/gto.12082. 13

F. E. DeMeo and B. Carry. The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys. , 226(1):723–741, September 2013. doi: 10.1016/j.icarus.2013.06.027. 2

F. E. DeMeo, S. Fornasier, M. A. Barucci, D. Perna, S. Protopapa, A. Alvarez-Candal, A. Delsanti, A. Doressoundiram, F. Merlin, and C. de Bergh. Visible and near-infrared colors of Transneptunian objects and Centaurs from the second ESO large program. *A&A*, 493(1):283–290, January 2009. doi: 10.1051/0004-6361:200810561. 46

Francesca E. DeMeo, Brian J. Burt, Michaël Marsset, David Polishook, Thomas H. Burbine, Benoît Carry, Richard P. Binzel, Pierre Vernazza, Vishnu Reddy, Michelle Tang, Cristina A. Thomas, Andrew S. Rivkin, Nicholas A. Moskovitz, Stephen M. Slivan, and Schelte J. Bus. Connecting asteroids and meteorites with visible and near-infrared spectroscopy. , 380:114971, July 2022. doi: 10.1016/j.icarus.2022.114971. 10

Romina P. Di Sisto and Adrián Brunini. The origin and distribution of the Centaur population. , 190(1):224–235, September 2007. doi: 10.1016/j.icarus.2007.02.012. 17

A. Dias-Oliveira, B. Sicardy, E. Lellouch, R. Vieira-Martins, M. Assafin, J. Ignácio Bueno Camargo, F. Braga-Ribas, A. Gomes-Júnior, G. Bendetti-Rossi, F. Colas, A. Decock, A. Doressoundiram, C. Dumas, M. Emílio, J. Fabrega Polleri, R. Gil-Hutton, M. Gillon, J. Girard, G. Hau, V. Ivanov, E. Jehin, J. Lecacheux, R. Leiva, C. Lopez-Sisterna, L. Mancini, J. Manfroid, A. Maury, E. Meza, N. Morales, L. Nagy, C. Opitom, J. L. Ortiz, J. Pollock, F. Roques, C. Snodgrass, J. François Soulier, A. Thirouin, L. Vanzi, T. Widemann, D. Reichart, A. LaCluyze, J. B. Haislip, K. Ivarsen, M. Dominik, U. Jørgensen, and J. Skottfelt. Pluto's atmosphere from stellar occultations in 2012 and 2013. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volume 47 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 200.09, November 2015. 11

J. R. Donnison. The Hill stability of a binary or planetary system during encounters with a third inclined body. , 369(3):1267–1280, July 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10372.x. 19

E. Dotto, J. P. Emery, M. A. Barucci, A. Morbidelli, and D. P. Cruikshank. De Troianis: The Trojans in the Planetary System. In M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and Renee Dotson, editors, *The Solar System Beyond Neptune*, pages 383–395. 2008. 17

Léa Ferellec, Colin Snodgrass, Alan Fitzsimmons, Agata Rożek, Daniel Gardener, Richard Smith, Hissa Medeiros, Cyrielle Opitom, and Henry H. Hsieh. A targeted search for Main Belt Comets. , 518(2):2373–2384, January 2023. doi: 10.1093/mnras/stac3199. 16

B. Flaugher, H. T. Diehl, K. Honscheid, T. M. C. Abbott, O. Alvarez, R. Angstadt, J. T. Annis, M. Antonik, O. Ballester, L. Beaufore, G. M. Bernstein, R. A. Bernstein, B. Bigelow, M. Bonati, D. Boprie, D. Brooks, E. J. Buckley-Geer, J. Campa, L. Cardiel-Sas, F. J. Castander, J. Castilla, H. Cease, J. M. Cela-Ruiz, S. Chappa, E. Chi, C. Cooper, L. N. da Costa, E. Dede, G. Derylo, D. L. DePoy, J. de Vicente, P. Doel, A. Drlica-Wagner, J. Eiting, A. E. Elliott, J. Emes, J. Estrada, A. Fausti Neto, D. A. Finley, R. Flores, J. Frieman, D. Gerdes, M. D. Gladders, B. Gregory, G. R. Gutierrez, J. Hao, S. E. Holland, S. Holm, D. Huffman, C. Jackson, D. J. James, M. Jonas, A. Karcher, I. Karliner, S. Kent, R. Kessler, M. Kozlovsky, R. G. Kron, D. Kubik, K. Kuehn, S. Kuhlmann, K. Kuk, O. Lahav, A. Lathrop, J. Lee, M. E. Levi, P. Lewis, T. S. Li, I. Mandrichenko, J. L. Marshall, G. Martinez, K. W. Merritt, R. Miquel, F. Muñoz, E. H. Neilsen, R. C. Nichol, B. Nord, R. Ogando, J. Olsen, N. Palaio, K. Patton, J. Peoples, A. A. Plazas, J. Rauch,

K. Reil, J. P. Rheault, N. A. Roe, H. Rogers, A. Roodman, E. Sanchez, V. Scarpine, R. H. Schindler, R. Schmidt, R. Schmitt, M. Schubnell, K. Schultz, P. Schurter, L. Scott, S. Serrano, T. M. Shaw, R. C. Smith, M. Soares-Santos, A. Stefanik, W. Stuermer, E. Suchyta, A. Sypniewski, G. Tarle, J. Thaler, R. Tighe, C. Tran, D. Tucker, A. R. Walker, G. Wang, M. Watson, C. Weaverdyck, W. Wester, R. Woods, B. Yanny, and DES Collaboration. The Dark Energy Camera. , 150 (5):150, November 2015. doi: 10.1088/0004-6256/150/5/150. 30

S. Fornasier, E. Lellouch, T. Müller, P. Santos-Sanz, P. Panuzzo, C. Kiss, T. Lim, M. Mommert, D. Bockelée-Morvan, E. Vilenius, J. Stansberry, G. P. Tozzi, S. Mottola, A. Delsanti, J. Crovisier, R. Duffard, F. Henry, P. Lacerda, A. Barucci, and A. Gicquel. TNOs are Cool: A survey of the trans-Neptunian region. VIII. Combined Herschel PACS and SPIRE observations of nine bright targets at 70-500 μm. *A&A*, 555:A15, July 2013. doi: 10.1051/0004-6361/201321329. 18

S. Fornasier, D. Lazzaro, A. Alvarez-Candal, C. Snodgrass, G. P. Tozzi, J. M. Carvano, Y. Jiménez-Teja, J. S. Silva, and D. M. Bramich. The Centaur 10199 Chariklo: investigation into rotational period, absolute magnitude, and cometary activity. *A&A*, 568:L11, August 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201424439. 18, 55

W. Fricke, H. Schwan, T. Lederle, U. Bastian, R. Bien, G. Burkhardt, B. Du Mont, R. Hering, R. Jährling, H. Jahreiß, S. Röser, H. M. Schwerdtfeger, and H. G. Walter. Fifth Fundamental Catalogue (FK5). Part 1. The Basic Fundamental Stars. *Veroeffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg*, 32: 1–106, January 1988. 39

M. Fulchignoni, I. Belskaya, M. A. Barucci, M. C. de Sanctis, and A. Doressoundiram. Transneptunian Object Taxonomy. In M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and Renee Dotson, editors, *The Solar System Beyond Neptune*, pages 181–192. 2008. 46

M. A. Galiazzo, E. A. Silber, and R. Dvorak. The threat of Centaurs for terrestrial planets and their orbital evolution as impactors. , 482(1):771–784, January 2019. doi: 10.1093/mnras/sty2614. 17

M. Galinier, M. Delbo, C. Avdellidou, and L. Galluccio. Discovery of the first olivine-dominated A-type asteroid family. *A&A*, 683:L3, March 2024. doi: 10.1051/0004-6361/202349057. 13

B. Gladman, B. G. Marsden, and C. Vanlaerhoven. Nomenclature in the Outer Solar System. In M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and Renee Dotson, editors, *The Solar System Beyond Neptune*, pages 43–57. 2008. 19

R. Gomes, H. F. Levison, K. Tsiganis, and A. Morbidelli. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. , 435(7041):466–469, May 2005. doi: 10.1038/nature03676. 10

A. R. Gomes-Júnior, M. Assafin, F. Braga-Ribas, G. Benedetti-Rossi, B. E. Morgado, J. I. B. Camargo, R. Vieira-Martins, J. Desmars, B. Sicardy, T. Barry, J. Campbell-White, E. Fernández-Lajús, D. Giles, W. Hanna, T. Hayamizu, T. Hirose, A. De Horta, R. Horvat, K. Hosoi, E. Jehin, S. Kerr, D. I. Machado, L. A.

Mammana, D. Maybour, M. Owada, S. Rahvar, and C. Snodgrass. The first observed stellar occultations by the irregular satellite Phoebe (Saturn IX) and improved rotational period. , 492(1):770–781, February 2020. doi: 10.1093/mnras/stz3463. 12

A. R. Gomes-Júnior, B. E. Morgado, G. Benedetti-Rossi, R. C. Boufleur, F. L. Rommel, M. V. Banda-Huarca, Y. Kilic, F. Braga-Ribas, and B. Sicardy. SORA: Stellar occultation reduction and analysis. , 511(1):1167–1181, March 2022. doi: 10.1093/mnras/stac032. 11

K. R. Grazier, J. Horner, and J. C. Castillo-Rogez. The relationship between Centaurs and Jupiter Family Comets with implications for K-Pg-type impacts. , 490 (3):4388–4400, December 2019. doi: 10.1093/mnras/stz2872. 17

Paul Hartogh, Dariusz C. Lis, Dominique Bockelée-Morvan, Miguel de Val-Borro, Nicolas Biver, Michael Küppers, Martin Emprechtinger, Edwin A. Bergin, Jacques Crovisier, Miriam Rengel, Raphael Moreno, Slawomira Szutowicz, and Geoffrey A. Blake. Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2. , 478(7368): 218–220, October 2011. doi: 10.1038/nature10519. 15

John D. Hefele, Francesco Bortolussi, and Simon Portegies Zwart. Identifying Earth-impacting asteroids using an artificial neural network. *A&A*, 634:A45, February 2020. doi: 10.1051/0004-6361/201935983. 13

F. R. Herpich, F. Almeida-Fernandes, G. B. Oliveira Schwarz, E. V. R. Lima, L. Nakazono, J. Alonso-García, M. A. Fonseca-Faria, M. J. Sartori, G. F. Bolutavicius, G. Fabiano de Souza, E. A. Hartmann, L. Li, L. Espinosa, A. Kanaan, W. Schoenell, A. Werle, E. Machado-Pereira, L. A. Gutiérrez-Soto, T. Santos-Silva, A. V. Smith Castelli, E. A. D. Lacerda, C. L. Barbosa, H. D. Perottoni, C. E. Ferreira Lopes, R. R. Valença, P. A. Re Martho, C. R. Bom, C. J. Bonatto, M. S. Carvalho, V. Cernic, R. Cid Fernandes, P. Coelho, A. Cortesi, B. Cubillos Palma, L. Doubrawa, V. S. Ferreira Alberice, F. Quispe-Huaynasi, G. Jacob Perin, M. Jaque Arancibia, A. Krabbe, C. Lima-Dias, L. Lomelí-Núñez, R. Lopes de Oliveira, A. R. Lopes, A. Luiz Figueiredo, E. Lösch, F. Navarete, J. M. Oliveira, R. Overzier, V. M. Placco, F. V. Roig, M. Rubet, A. Santos, V. H. Sasse, J. Thainá-Batista, S. Torres-Flores, T. C. Beers, A. Alvarez-Candal, S. Akras, S. Panda, G. Limberg, J. L. Nilo Castellón, E. Telles, P. A. A. Lopes, G. D. Pardo Montaguth, L. Beraldo e Silva, P. K. Humire, M. Borges Fernandes, V. Cordeiro, T. Ribeiro, and C. Mendes de Oliveira. The Fourth S-PLUS Data Release: 12-filter photometry covering 3000 square degrees in the southern hemisphere. *A&A*, 689:A249, September 2024. doi: 10.1051/0004-6361/202449725. 2

K. Hocke and N. Kämpfer. Gap filling and noise reduction of unevenly sampled data by means of the Lomb-Scargle periodogram. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 9(12):4197–4206, June 2009. doi: 10.5194/acp-9-4197-200910.5194/acpd-8-4603-2008. 51

J. Horner and P. S. Lykawka. Planetary Trojans - the main source of short period comets? *International Journal of Astrobiology*, 9(4):227–234, October 2010. doi: 10.1017/S1473550410000212. 17

J. Horner, N. W. Evans, and M. E. Bailey. Simulations of the population of Centaurs - I. The bulk statistics. , 354(3):798–810, November 2004. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08240.x. 18

Steve B. Howell. *Handbook of CCD Astronomy*. 2000. iii, 4, 5

Steve Bruce Howell. *Handbook of CCD Astronomy*, volume 5. 2006. 4, 5, 6

Henry H. Hsieh and David Jewitt. A Population of Comets in the Main Asteroid Belt. *Science*, 312(5773):561–563, April 2006. doi: 10.1126/science.1125150. 16

James R. Janesick. *Scientific charge-coupled devices*. 2001. 4, 5

D. Jewitt and J. Luu. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB_1. , 362(6422):730–732, April 1993. doi: 10.1038/362730a0. 19

D. Jewitt, A. Morbidelli, and H. Rauer. *Trans-Neptunian Objects and Comets*. 2008. 19

David Jewitt. The Active Centaurs. , 137(5):4296–4312, May 2009. doi: 10.1088/0004-6256/137/5/4296. 17

David Jewitt and Henry H. Hsieh. The Asteroid-Comet Continuum. *arXiv e-prints*, art. arXiv:2203.01397, March 2022. doi: 10.48550/arXiv.2203.01397. 16

A. Johansen, J. Blum, H. Tanaka, C. Ormel, M. Bizzarro, and H. Rickman. The Multifaceted Planetesimal Formation Process. In Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, and Thomas Henning, editors, *Protostars and Planets VI*, pages 547–570, January 2014. doi: 10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch024. 13

Mario Jurić, Željko Ivezić, Alyson Brooks, Robert H. Lupton, David Schlegel, Douglas Finkbeiner, Nikhil Padmanabhan, Nicholas Bond, Branimir Sesar, Constance M. Rockosi, Gillian R. Knapp, James E. Gunn, Takahiro Sumi, Donald P. Schneider, J. C. Barentine, Howard J. Brewington, J. Brinkmann, Masataka Fukugita, Michael Harvanek, S. J. Kleinman, Jurek Krzesinski, Dan Long, Eric H. Neilsen, Jr., Atsuko Nitta, Stephanie A. Snedden, and Donald G. York. The Milky Way Tomography with SDSS. I. Stellar Number Density Distribution. , 673(2):864–914, February 2008. doi: 10.1086/523619. 1

Michael S. P. Kelley, Henry H. Hsieh, Dennis Bodewits, Mohammad Saki, Geronimo L. Villanueva, Stefanie N. Milam, and Heidi B. Hammel. Spectroscopic identification of water emission from a main-belt comet. , 619(7971):720–723, July 2023. doi: 10.1038/s41586-023-06152-y. 16

I. R. King. Accuracy of measurement of star images on a pixel array. , 95:163–168, February 1983. doi: 10.1086/131139. 47

Hubert Klahr and Andreas Schreiber. Linking the Origin of Asteroids to Planetesimal Formation in the Solar Nebula. In S. R. Chesley, A. Morbidelli, R. Jedicke, and D. Farnocchia, editors, *Asteroids: New Observations, New Models*, volume 318 of *IAU Symposium*, pages 1–8, January 2016. doi: 10.1017/S1743921315010406. 13

David Korda, Antti Penttilä, Arto Klami, and Tomáš Kohout. Neural network for determining an asteroid mineral composition from reflectance spectra. *A&A*, 669: A101, January 2023. doi: 10.1051/0004-6361/202243886. 13

Pavel Kroupa. On the variation of the initial mass function. , 322(2):231–246, April 2001. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x. 30

Dante Lauretta and Patrick Michel. The OSIRIS-REx Asteroid Sample Return Mission: Anticipating Asteroid (101955) Bennu. In *42nd COSPAR Scientific Assembly*, volume 42, pages B1.1–38–18, July 2018. 14

P. F. Lazorenko, J. Sahlmann, M. Mayor, and E. L. Martin. Differential image motion in astrometric observations with very large seeing-limited telescopes. *A&A*, 689:A94, September 2024. doi: 10.1051/0004-6361/202449734. 40

R. Leiva, B. Sicardy, J. I. B. Camargo, J. L. Ortiz, J. Desmars, D. Bérard, E. Lellouch, E. Meza, P. Kervella, C. Snodgrass, R. Duffard, N. Morales, A. R. Gomes-Júnior, G. Benedetti-Rossi, R. Vieira-Martins, F. Braga-Ribas, M. Assafin, B. E. Morgado, F. Colas, C. De Witt, A. A. Sickafoose, H. Breytenbach, J. L. Dauvergne, P. Schoenau, L. Maquet, K. L. Bath, H. J. Bode, A. Cool, B. Lade, S. Kerr, and D. Herald. Size and Shape of Chariklo from Multi-epoch Stellar Occultations. , 154(4):159, October 2017. doi: 10.3847/1538-3881/aa8956. 39, 40

H. F. Levison. Comet Taxonomy. In Terrence Rettig and Joseph M. Hahn, editors, *Completing the Inventory of the Solar System*, volume 107 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 173–191, January 1996. 15

J. Licandro, H. Campins, G. P. Tozzi, J. de León, N. Pinilla-Alonso, H. Boehnhardt, and O. R. Hainaut. Testing the comet nature of main belt comets. The spectra of 133P/Elst-Pizarro and 176P/LINEAR. *A&A*, 532:A65, August 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201117018. 16

L. Lindegren, S. A. Klioner, J. Hernández, A. Bombrun, M. Ramos-Lerate, H. Steidelmüller, U. Bastian, M. Biermann, A. de Torres, E. Gerlach, R. Geyer, T. Hilger, D. Hobbs, U. Lammers, P. J. McMillan, C. A. Stephenson, J. Castañeda, M. Davidson, C. Fabricius, G. Gracia-Abril, J. Portell, N. Rowell, D. Teyssier, F. Torra, S. Bartolomé, M. Clotet, N. Garralda, J. J. González-Vidal, J. Torra, U. Abbas, M. Altmann, E. Anglada Varela, L. Balaguer-Núñez, Z. Balog, C. Barache, U. Becciani, M. Bernet, S. Bertone, L. Bianchi, S. Bouquillon, A. G. A. Brown, B. Bucciarelli, D. Busonero, A. G. Butkevich, R. Buzzi, R. Cancelliere, T. Carlucci, P. Charlot, M. R. L. Cioni, M. Crosta, C. Crowley, E. F. del Peloso, E. del Pozo, R. Drimmel, P. Esquej, A. Fienga, E. Fraile, M. Gai, M. Garcia-Reinaldos, R. Guerra, N. C. Hambly, M. Hauser, K. Janßen, S. Jordan, Z. Kostrzewa-Rutkowska, M. G. Lattanzi, S. Liao, E. Licata, T. A. Lister, W. Löffler, J. M. Marchant, A. Masip, F. Mignard, A. Mints, D. Molina, A. Mora, R. Morbidelli, C. P. Murphy, C. Pagani, P. Panuzzo, X. Peñalosa Esteller, E. Poggio, P. Re Fiorentin, A. Riva, A. Sagristà Sellés, V. Sanchez Gimenez, M. Sarasso, E. Sciacca, H. I. Siddiqui, R. L. Smart, D. Souami, A. Spagna, I. A. Steele, F. Taris, E. Utrilla, W. van Reeven, and A. Vecchiato. Gaia Early Data Release 3. The astrometric solution. *A&A*, 649:A2, May 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202039709. 11, 26

N. R. Lomb. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data. , 39(2): 447–462, February 1976. doi: 10.1007/BF00648343. 51

Patryk Sofia Lykawka and Takashi Ito. Terrestrial planet and asteroid belt formation by Jupiter-Saturn chaotic excitation. *Scientific Reports*, 13:4708, March 2023. doi: 10.1038/s41598-023-30382-9. 13

J. Mah, R. Brasser, J. M. Y. Woo, A. Bouvier, and S. J. Mojzsis. Evidence of a primordial isotopic gradient in the inner region of the solar protoplanetary disc. *A&A*, 660:A36, April 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202142926. 13

J. Marques Oliveira, B. Sicardy, A. R. Gomes-Júnior, J. L. Ortiz, D. F. Strobel, T. Bertrand, F. Forget, E. Lellouch, J. Desmars, D. Bérard, A. Doressoundiram, J. Lecacheux, R. Leiva, E. Meza, F. Roques, D. Souami, T. Widemann, P. Santos-Sanz, N. Morales, R. Duffard, E. Fernández-Valenzuela, A. J. Castro-Tirado, F. Braga-Ribas, B. E. Morgado, M. Assafin, J. I. B. Camargo, R. Vieira-Martins, G. Benedetti-Rossi, S. Santos-Filho, M. V. Banda-Huarca, F. Quispe-Huaynasi, C. L. Pereira, F. L. Rommel, G. Margoti, A. Dias-Oliveira, F. Colas, J. Berthier, S. Renner, R. Hueso, S. Pérez-Hoyos, A. Sánchez-Lavega, J. F. Rojas, W. Beisker, M. Kretlow, D. Herald, D. Gault, K. L. Bath, H. J. Bode, E. Bredner, K. Guhl, T. V. Haymes, E. Hummel, B. Kattentidt, O. Klös, A. Pratt, B. Thome, C. Avdellidou, K. Gazeas, E. Karampotsiou, L. Tzouganatos, E. Kardasis, A. A. Christou, E. M. Xilouris, I. Alikakos, A. Gourzelas, A. Liakos, V. Charmandaris, M. Jelínek, J. Štrobl, A. Eberle, K. Rapp, B. Gährken, B. Klemt, S. Kowollik, R. Bitzer, M. Miller, G. Herzogenrath, D. Frangenberg, L. Brandis, I. Pütz, V. Perdelwitz, G. M. Piehler, P. Riepe, K. von Poschinger, P. Baruffetti, D. Cenadelli, J. M. Christille, F. Ciabattari, R. Di Luca, D. Alboresi, G. Leto, R. Zanmar Sanchez, P. Bruno, G. Occhipinti, L. Morrone, L. Cupolino, A. Noschese, A. Vecchione, C. Scalia, R. Lo Savio, G. Giardina, S. Kamoun, R. Barbosa, R. Behrend, M. Spano, E. Bouchet, M. Cottier, L. Falco, S. Gallego, L. Tortorelli, S. Sposetti, J. Sussenbach, F. Van Den Abbeel, P. André, M. Llibre, F. Pailler, J. Ardissone, M. Boutet, J. Sanchez, M. Bretton, A. Cailleau, V. Pic, L. Granier, R. Chauvet, M. Conjat, J. L. Dauvergne, O. Dechambre, P. Delay, M. Delcroix, L. Rousselot, J. Ferreira, P. Machado, P. Tanga, J. P. Rivet, E. Frappa, M. Irzyk, F. Jabet, M. Kaschinski, A. Klotz, Y. Rieugnie, A. N. Klotz, O. Labrevoir, D. Lavandier, D. Walliang, A. Leroy, S. Bouley, S. Lisciandra, J. F. Coliac, F. Metz, D. Erpelding, P. Nougayrède, T. Midavaine, M. Miniou, S. Moindrot, P. Morel, B. Reginato, E. Reginato, J. Rudelle, B. Tregon, R. Tanguy, J. David, W. Thuillot, D. Hestroffer, G. Vaudescal, D. Baba Aissa, Z. Grigahcene, D. Briggs, S. Broadbent, P. Denyer, N. J. Haigh, N. Quinn, G. Thurston, S. J. Fossey, C. Arena, M. Jennings, J. Talbot, S. Alonso, A. Román Reche, V. Casanova, E. Briggs, R. Iglesias-Marzoa, J. Abril Ibáñez, M. C. Díaz Martín, H. González, J. L. Maestre García, J. Marchant, I. Ordonez-Etxeberria, P. Martorell, J. Salamero, F. Organero, L. Ana, F. Fonseca, V. Peris, O. Brevia, A. Selva, C. Perello, V. Cabedo, R. Gonçalves, M. Ferreira, F. Marques Dias, A. Daassou, K. Barkaoui, Z. Benkhaldoun, M. Guennoun, J. Chouqar, E. Jehin, C. Rinner, J. Lloyd, M. El Moutamid, C. Lamarche, J. T. Pollock, D. B. Caton, V. Kouprianov, B. W. Timerson, G. Blanchard, B. Payet, A. Peyrot, J. P. Teng-Chuen-Yu, J. Françoise, B. Mondon, T. Payet, C. Boissel, M. Castets, W. B. Hubbard, R. Hill, H. J.

Reitsema, O. Mousis, L. Ball, G. Neilsen, S. Hutcheon, K. Lay, P. Anderson, M. Moy, M. Jonsen, I. Pink, R. Walters, and B. Downs. Constraints on the structure and seasonal variations of Triton's atmosphere from the 5 October 2017 stellar occultation and previous observations. *A&A*, 659:A136, March 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202141443. 11

D. Massari, A. Marasco, O. Beltramo-Martin, J. Milli, G. Fiorentino, E. Tolstoy, and F. Kerber. Successful application of PSF-R techniques to the case of the globular cluster NGC 6121 (M 4). *A&A*, 634:L5, February 2020. doi: 10.1051/0004-6361/201937359. 7, 41

Jr. McSween, Harry Y. *Meteorites and their Parent Planets*. 1999. 13

Patrick Michel, Francesca E. DeMeo, and William F. Bottke. *Asteroids IV*. 2015. doi: 10.2458/azu_uapress_9780816532131. 10

K. J. Mighell. Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions. *MNRAS*, 361:861–878, August 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09208.x. 47

Kenneth Mighell. MATPHOT: Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1601.018, January 2016. 7

A. Morbidelli. The Formation of a Water-Rich Earth. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2001, pages U51A–04, December 2001. 14

A. Morbidelli, R. Jedicke, W. F. Bottke, P. Michel, and E. F. Tedesco. From Magnitudes to Diameters: The Albedo Distribution of Near Earth Objects and the Earth Collision Hazard. , 158(2):329–342, August 2002. doi: 10.1006/icar.2002.6887. 14

A. Morbidelli, H. F. Levison, K. Tsiganis, and R. Gomes. Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System. , 435(7041):462–465, May 2005. doi: 10.1038/nature03540. 10

B. E. Morgado, B. Sicardy, F. Braga-Ribas, J. Desmars, A. R. Gomes-Júnior, D. Bérard, R. Leiva, J. L. Ortiz, R. Vieira-Martins, G. Benedetti-Rossi, P. Santos-Sanz, J. I. B. Camargo, R. Duffard, F. L. Rommel, M. Assafin, R. C. Boufleur, F. Colas, M. Kretlow, W. Beisker, R. Sfair, C. Snodgrass, N. Morales, E. Fernández-Valenzuela, L. S. Amaral, A. Amarante, R. A. Artola, M. Backes, K.-L. Bath, S. Bouley, M. W. Buie, P. Cacella, C. A. Colazo, J. P. Colque, J.-L. Dauvergne, M. Dominik, M. Emilio, C. Erickson, R. Evans, J. Fabrega-Polleri, D. Garcia-Lambas, B. L. Giacchini, W. Hanna, D. Herald, G. Hesler, T. C. Hinse, C. Jacques, E. Jehin, U. G. Jørgensen, S. Kerr, V. Kouprianov, S. E. Levine, T. Linder, P. D. Maley, D. I. Machado, L. Maquet, A. Maury, R. Melia, E. Meza, B. Mondon, T. Moura, J. Newman, T. Payet, C. L. Pereira, J. Pollock, R. C. Poltronieri, F. Quispe-Huaynasi, D. Reichart, T. de Santana, E. M. Schneiter, M. V. Sieyra, J. Skottfelt, J. F. Soulier, M. Starck, P. Thierry, P. J. Torres, L. L. Trabuco, E. Unda-Sanzana, T. A. R. Yamashita, O. C. Winter, A. Zapata, and C. A. Zuluaga. Refined physical parameters for chariklo's body and rings from stellar occultations observed between 2013 and 2020. *Astronomy amp; Astrophysics*, 652:

A141, August 2021. ISSN 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/202141543. URL http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202141543. 17, 18

B. E. Morgado, G. Bruno, A. R. Gomes-Júnior, I. Pagano, B. Sicardy, A. Fortier, J. Desmars, P. F. L. Maxted, F. Braga-Ribas, D. Queloz, S. G. Sousa, J. L. Ortiz, A. Brandeker, A. Collier Cameron, C. L. Pereira, H. G. Florén, N. Hara, D. Souami, K. G. Isaak, G. Olofsson, P. Santos-Sanz, T. G. Wilson, J. Broughton, Y. Alibert, R. Alonso, G. Anglada, T. Bárczy, D. Barrado, S. C. C. Barros, W. Baumjohann, M. Beck, T. Beck, W. Benz, N. Billot, X. Bonfils, C. Broeg, J. Cabrera, S. Charnoz, S. Csizmadia, M. B. Davies, M. Deleuil, L. Delrez, O. D. S. Demangeon, B. O. Demory, D. Ehrenreich, A. Erikson, L. Fossati, M. Fridlund, D. Gandolfi, M. Gillon, M. Güdel, K. Heng, S. Hoyer, L. L. Kiss, J. Laskar, A. Lecavelier des Etangs, M. Lendl, C. Lovis, D. Magrin, L. Marafatto, V. Nascimbeni, R. Ottensamer, E. Pallé, G. Peter, D. Piazza, G. Piotto, D. Pollacco, R. Ragazzoni, N. Rando, F. Ratti, H. Rauer, C. Reimers, I. Ribas, N. C. Santos, G. Scandariato, D. Ségransan, A. E. Simon, A. M. S. Smith, M. Steller, G. M. Szabó, N. Thomas, S. Udry, V. Van Grootel, N. A. Walton, and K. Westerdorff. A stellar occultation by the transneptunian object (50000) Quaoar observed by CHEOPS. *A&A*, 664:L15, August 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202244221. 11

B. E. Morgado, B. Sicardy, F. Braga-Ribas, J. L. Ortiz, H. Salo, F. Vachier, J. Desmars, C. L. Pereira, P. Santos-Sanz, R. Sfair, T. de Santana, M. Assafin, R. Vieira-Martins, A. R. Gomes-Júnior, G. Margoti, V. S. Dhillon, E. Fernández-Valenzuela, J. Broughton, J. Bradshaw, R. Langersek, G. Benedetti-Rossi, D. Souami, B. J. Holler, M. Kretlow, R. C. Boufleur, J. I. B. Camargo, R. Duffard, W. Beisker, N. Morales, J. Lecacheux, F. L. Rommel, D. Herald, W. Benz, E. Jehin, F. Jankowsky, T. R. Marsh, S. P. Littlefair, G. Bruno, I. Pagano, A. Brandeker, A. Collier-Cameron, H. G. Florén, N. Hara, G. Olofsson, T. G. Wilson, Z. Benkhaldoun, R. Busuttil, A. Burdanov, M. Ferrais, D. Gault, M. Gillon, W. Hanna, S. Kerr, U. Kolb, P. Nosworthy, D. Sebastian, C. Snodgrass, J. P. Teng, and J. de Wit. A dense ring of the trans-Neptunian object Quaoar outside its Roche limit. , 614(7947):239–243, February 2023. doi: 10.1038/s41586-022-05629-6. 19

F. Namouni. Orbit injection of planet-crossing asteroids. , 527(3):4889–4898, January 2024. doi: 10.1093/mnras/stad3570. 17

F. Namouni and M. H. M. Morais. An interstellar origin for high-inclination Centaurs. , 494(2):2191–2199, May 2020. doi: 10.1093/mnras/staa712. 17

J. R. Neeley, B. E. Clark, M. E. Ockert-Bell, M. K. Shepard, J. Conklin, E. A. Cloutis, S. Fornasier, and S. J. Bus. The composition of M-type asteroids II: Synthesis of spectroscopic and radar observations. , 238:37–50, August 2014. doi: 10.1016/j.icarus.2014.05.008. 10

M. V. Newberry. Signal-to-noise considerations for sky-subtracted CCD data. , 103: 122–130, January 1991. doi: 10.1086/132801. 48

Bojan Novaković, David Vokrouhlický, Federica Spoto, and David Nesvorný. Asteroid families: properties, recent advances, and future opportunities. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 134(4):34, August 2022. doi: 10.1007/s10569-022-10091-7. 13

David P. O'Brien, Alessandro Morbidelli, and William F. Bottke. The primordial excitation and clearing of the asteroid belt—Revisited. , 191(2):434–452, November 2007. doi: 10.1016/j.icarus.2007.05.005. 10

J. L. Ortiz, P. Santos-Sanz, B. Sicardy, G. Benedetti-Rossi, D. Bérard, N. Morales, R. Duffard, F. Braga-Ribas, U. Hopp, C. Ries, V. Nascimbeni, F. Marzari, V. Granata, A. Pál, C. Kiss, T. Pribulla, R. Komžík, K. Hornoch, P. Pravec, P. Bacci, M. Maestripieri, L. Nerli, L. Mazzei, M. Bachini, F. Martinelli, G. Succi, F. Ciabattari, H. Mikuz, A. Carbognani, B. Gaehrken, S. Mottola, S. Hellmich, F. L. Rommel, E. Fernández-Valenzuela, A. C. Bagatin, S. Cikota, A. Cikota, J. Lecacheux, R. Vieira-Martins, J. I. B. Camargo, M. Assafin, F. Colas, R. Behrend, J. Desmars, E. Meza, A. Alvarez-Candal, W. Beisker, A. R. Gomes-Junior, B. E. Morgado, F. Roques, F. Vachier, J. Berthier, T. G. Mueller, J. M. Madiedo, O. Unsalan, E. Sonbas, N. Karaman, O. Erece, D. T. Koseoglu, T. Ozisik, S. Kalkan, Y. Guney, M. S. Niaei, O. Satir, C. Yesilyaprak, C. Puskullu, A. Kabas, O. Demircan, J. Alikakos, V. Charmandaris, G. Leto, J. Ohlert, J. M. Christille, R. Szakáts, A. T. Farkas, E. Varga-Verebélyi, G. Marton, A. Marciniak, P. Bartczak, T. Santana-Ros, M. Butkiewicz-Bąk, G. Dudziński, V. Alí-Lagoa, K. Gazeas, L. Tzouganatos, N. Paschalis, V. Tsamis, A. Sánchez-Lavega, S. Pérez-Hoyos, R. Hueso, J. C. Guirado, V. Peris, and R. Iglesias-Marzoa. The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *nat*, 550:219–223, October 2017. doi: 10.1038/nature24051. 11, 19

C. L. Pereira, B. Sicardy, B. E. Morgado, F. Braga-Ribas, E. Fernández-Valenzuela, D. Souami, B. J. Holler, R. C. Boufleur, G. Margoti, M. Assafin, J. L. Ortiz, P. Santos-Sanz, B. Epinat, P. Kervella, J. Desmars, R. Vieira-Martins, Y. Kilic, A. R. Gomes Júnior, J. I. B. Camargo, M. Emilio, M. Vara-Lubiano, M. Kretlow, L. Albert, C. Alcock, J. G. Ball, K. Bender, M. W. Buie, K. Butterfield, M. Camarca, J. H. Castro-Chacón, R. Dunford, R. S. Fisher, D. Gamble, J. C. Geary, C. L. Gnilka, K. D. Green, Z. D. Hartman, C. K. Huang, H. Januszewski, J. Johnston, M. Kagitani, R. Kamin, J. J. Kavelaars, J. M. Keller, K. R. de Kleer, M. J. Lehner, A. Luken, F. Marchis, T. Marlin, K. McGregor, V. Nikitin, R. Nolthenius, C. Patrick, S. Redfield, A. W. Rengstorf, M. Reyes-Ruiz, T. Seccull, M. F. Skrutskie, A. B. Smith, M. Sproul, A. W. Stephens, A. Szentgyorgyi, S. Sánchez-Sanjuán, E. Tatsumi, A. Verbiscer, S. Y. Wang, F. Yoshida, R. Young, and Z. W. Zhang. The two rings of (50000) Quaoar. *A&A*, 673:L4, May 2023. doi: 10.1051/0004-6361/202346365. 19

D. Perna, M. A. Barucci, S. Fornasier, F. E. DeMeo, A. Alvarez-Candal, F. Merlin, E. Dotto, A. Doressoundiram, and C. de Bergh. Colors and taxonomy of Centaurs and trans-Neptunian objects. *A&A*, 510:A53, February 2010. doi: 10.1051/0004-6361/200913654. 46

S. Pfalzner, M. B. Davies, M. Gounelle, A. Johansen, C. Münker, P. Lacerda, S. Portegies Zwart, L. Testi, M. Trieloff, and D. Veras. The formation of the solar system. , 90(6):068001, June 2015. doi: 10.1088/0031-8949/90/6/068001. 13

S. Pirani, A. Johansen, B. Bitsch, A. J. Mustill, and D. Turrini. Consequences of planetary migration on the minor bodies of the early solar system. *A&A*, 623: A169, March 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201833713. 13

M. Popescu, J. Licandro, J. M. Carvano, R. Stoicescu, J. de León, D. Morate, I. L. Boacă, and C. P. Cristescu. Taxonomic classification of asteroids based on MOVIS near-infrared colors. *A&A*, 617:A12, September 2018. doi: 10.1051/0004-6361/201833023. 2

William H. Press, Brian P. Flannery, and Saul A. Teukolsky. *Numerical recipes. The art of scientific computing*. 1986. 52

Wojtek Pych. Difference image analysis package. http://users.camk.edu.pl/pych/DIAPL/, 2016. Acessado em 26 de Março de 2024. 1, 2

S. D. Raducan, M. Jutzi, A. F. Cheng, Y. Zhang, O. Barnouin, G. S. Collins, R. T. Daly, T. M. Davison, C. M. Ernst, T. L. Farnham, F. Ferrari, M. Hirabayashi, K. M. Kumamoto, P. Michel, N. Murdoch, R. Nakano, M. Pajola, A. Rossi, H. F. Agrusa, B. W. Barbee, M. Bruck Syal, N. L. Chabot, E. Dotto, E. G. Fahnestock, P. H. Hasselmann, I. Herreros, S. Ivanovski, J. Y. Li, A. Lucchetti, R. Luther, J. Ormö, M. Owen, P. Pravec, A. S. Rivkin, C. Q. Robin, P. Sánchez, F. Tusberti, K. Wünnemann, A. Zinzi, E. Mazzotta Epifani, C. Manzoni, and B. H. May. Physical properties of asteroid Dimorphos as derived from the DART impact. *Nature Astronomy*, 8:445–455, April 2024. doi: 10.1038/s41550-024-02200-3. 13

Dong-Goo Roh, Hong-Kyu Moon, Min-Su Shin, and Francesca E. DeMeo. A new approach to feature-based asteroid taxonomy in 3D color space. I. SDSS photometric system. *A&A*, 664:A51, August 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202039551. 2

F. L. Rommel, F. Braga-Ribas, J. Desmars, J. I. B. Camargo, J. L. Ortiz, B. Sicardy, R. Vieira-Martins, M. Assafin, P. Santos-Sanz, R. Duffard, E. Fernández-Valenzuela, J. Lecacheux, B. E. Morgado, G. Benedetti-Rossi, A. R. Gomes-Júnior, C. L. Pereira, D. Herald, W. Hanna, J. Bradshaw, N. Morales, J. Brimacombe, A. Burtovoi, T. Carruthers, J. R. de Barros, M. Fiori, A. Gilmore, D. Hooper, K. Hornoch, C. Jacques, T. Janik, S. Kerr, P. Kilmartin, Jan Maarten Winkel, G. Naletto, D. Nardiello, V. Nascimbeni, J. Newman, A. Ossola, A. Pál, E. Pimentel, P. Pravec, S. Sposetti, A. Stechina, R. Szakáts, Y. Ueno, L. Zampieri, J. Broughton, J. B. Dunham, D. W. Dunham, D. Gault, T. Hayamizu, K. Hosoi, E. Jehin, R. Jones, K. Kitazaki, R. Komžík, A. Marciniak, A. Maury, H. Mikuž, P. Nosworthy, J. Fábrega Polleri, S. Rahvar, R. Sfair, P. B. Siqueira, C. Snodgrass, P. Sogorb, H. Tomioka, J. Tregloan-Reed, and O. C. Winter. Stellar occultations enable milliarcsecond astrometry for Trans-Neptunian objects and Centaurs. *A&A*, 644:A40, December 2020. doi: 10.1051/0004-6361/202039054. 11

F. L. Rommel, F. Braga-Ribas, J. L. Ortiz, B. Sicardy, P. Santos-Sanz, J. Desmars, J. I. B. Camargo, R. Vieira-Martins, M. Assafin, B. E. Morgado, R. C. Boufleur, G. Benedetti-Rossi, A. R. Gomes-Júnior, E. Fernández-Valenzuela, B. J. Holler, D. Souami, R. Duffard, G. Margoti, M. Vara-Lubiano, J. Lecacheux, J. L. Plouvier, N. Morales, A. Maury, J. Fabrega, P. Ceravolo, E. Jehin, D. Albanese, H. Mariey, S. Cikota, D. Ruždjak, A. Cikota, R. Szakáts, D. Baba Aissa, Z. Gringahcene, V. Kashuba, N. Koshkin, V. Zhukov, S. Fişek, O. Çakir, S. Özer, C. Schnabel, M. Schnabel, F. Signoret, L. Morrone, T. Santana-Ros, C. L. Pereira, M. Emilio, A. Y. Burdanov, J. de Wit, K. Barkaoui, M. Gillon, G. Leto, A. Frasca,

G. Catanzaro, R. Zanmar Sanchez, U. Tagliaferri, M. Di Sora, G. Isopi, Y. Krugly, I. Slyusarev, V. Chiorny, H. Mikuž, P. Bacci, M. Maestripieri, M. D. Grazia, I. de la Cueva, M. Yuste-Moreno, F. Ciabattari, O. M. Kozhukhov, M. Serra-Ricart, M. R. Alarcon, J. Licandro, G. Masi, R. Bacci, J. M. Bosch, R. Behem, J. P. Prost, S. Renner, M. Conjat, M. Bachini, G. Succi, L. Stoian, A. Juravle, D. Carosati, B. Gowe, J. Carrillo, A. P. Zheleznyak, N. Montigiani, C. R. Foster, M. Mannucci, N. Ruocco, F. Cuevas, P. Di Marcantonio, I. Coretti, G. Iafrate, V. Baldini, M. Collins, A. Pál, B. Csák, E. Fernández-Garcia, A. J. Castro-Tirado, L. Hudin, J. M. Madiedo, R. M. Anghel, J. F. Calvo-Fernández, A. Valvasori, E. Guido, R. M. Gherase, S. Kamoun, R. Fafet, M. Sánchez-González, L. Curelaru, C. D. Vîntdevară, C. A. Danescu, J. F. Gout, C. J. Schmitz, A. Sota, I. Belskaya, M. Rodríguez-Marco, Y. Kilic, E. Frappa, A. Klotz, M. Lavayssière, J. Marques Oliveira, M. Popescu, L. A. Mammana, E. Fernández-Lajús, M. Schmidt, U. Hopp, R. Komžík, T. Pribulla, D. Tomko, M. Husárik, O. Erece, S. Eryilmaz, L. Buzzi, B. Gährken, D. Nardiello, K. Hornoch, E. Sonbas, H. Er, V. Burwitz, P. Waldemar Sybilski, W. Bykowski, T. G. Müller, W. Ogloza, R. Gonçalves, J. F. Ferreira, M. Ferreira, M. Bento, S. Meister, M. N. Bagiran, M. Tekeş, A. Marciniak, Z. Moravec, P. Delinčák, G. Gianni, G. B. Casalnuovo, M. Boutet, J. Sanchez, B. Klemt, N. Wuensche, W. Burzynski, M. Borkowski, M. Serrau, G. Dangl, O. Klös, C. Weber, M. Urbaník, L. Rousselot, J. Kubánek, P. André, C. Colazo, J. Spagnotto, A. A. Sickafoose, R. Hueso, A. Sánchez-Lavega, R. S. Fisher, A. W. Rengstorf, C. Perelló, M. Dascalu, M. Altan, K. Gazeas, T. de Santana, R. Sfair, O. C. Winter, S. Kalkan, O. Canales-Moreno, J. M. Trigo-Rodríguez, V. Tsamis, K. Tigani, N. Sioulas, G. Lekkas, D. N. Bertesteanu, V. Dumitrescu, A. J. Wilberger, J. W. Barnes, S. K. Fieber-Beyer, R. L. Swaney, C. Fuentes, R. A. Mendez, B. D. Dumitru, R. L. Flynn, and D. A. Wake. A large topographic feature on the surface of the trans-Neptunian object (307261) 2002 MS_4 measured from stellar occultations. *A&A*, 678:A167, October 2023. doi: 10.1051/0004-6361/202346892. 12

Flavia L. Rommel, Felipe Braga-Ribas, Mónica Vara-Lubiano, Jose L. Ortiz, Josselin Desmars, Bruno E. Morgado, Gustavo Benedetti-Rossi, Bruno Sicardy, Roberto Vieira-Martins, Julio I. B. Camargo, Pablo Santos-Sanz, Nicolás Morales, Rene Duffard, Estela Fernández-Valenzuela, Giuliano Margoti, Marcelo Assafin, Chrystian L. Pereira, Yucel Kilic, Eric Frappa, and Jean Lecacheux. Evidence of topographic features on (307261) 2002 MS4 surface. In *European Planetary Science Congress*, pages EPSC2021–440, September 2021. doi: 10.5194/epsc2021-440. 12

J. D. Scargle. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. , 263:835–853, December 1982. doi: 10.1086/160554. 51

Lutz D. Schmadel. *Dictionary of Minor Planet Names*. 2007. 17

Scott S. Sheppard, David C. Jewitt, Chadwick A. Trujillo, Michael J. I. Brown, and Michael C. B. Ashley. A Wide-Field CCD Survey for Centaurs and Kuiper Belt Objects. , 120(5):2687–2694, November 2000. doi: 10.1086/316805. 17

B. Sicardy, G. Benedetti-Rossi, M. W. Buie, M. Langlois, E. Lellouch, J. I. B. Camargo, F. Braga-Ribas, R. Duffard, J. L. Ortiz, D. Bérard, E. Meza, A. Boccaletti, D. Bockelée-Morvan, C. Dumas, and D. Gratadour. Observations of Chariklo's

rings in 2015. In *European Planetary Science Congress*, pages EPSC2015–750, October 2015. iv, 18

B. Sicardy, A. Tej, A. R. Gomes-Júnior, F. D. Romanov, T. Bertrand, N. M. Ashok, E. Lellouch, B. E. Morgado, M. Assafin, J. Desmars, J. I. B. Camargo, Y. Kilic, J. L. Ortiz, R. Vieira-Martins, F. Braga-Ribas, J. P. Ninan, B. C. Bhatt, S. Pramod Kumar, V. Swain, S. Sharma, A. Saha, D. K. Ojha, G. Pawar, S. Deshmukh, A. Deshpande, S. Ganesh, J. K. Jain, S. K. Mathew, H. Kumar, V. Bhalerao, G. C. Anupama, S. Barway, A. Brandeker, H. G. Florén, G. Olofsson, G. Bruno, Y. M. Mao, R. H. Ye, Q. Y. Zou, Y. K. Sun, Y. Y. Shen, J. Y. Zhao, D. N. Grishin, L. V. Romanova, F. Marchis, K. Fukui, R. Kukita, G. Benedetti-Rossi, P. Santos-Sanz, N. Dhyani, A. Gokhale, and A. Kate. Constraints on the evolution of the Triton atmosphere from occultations: 1989-2022. *A&A*, 682:L24, February 2024. doi: 10.1051/0004-6361/202348756. 11

M. Sirianni, M. J. Jee, N. Benítez, J. P. Blakeslee, A. R. Martel, G. Meurer, M. Clampin, G. De Marchi, H. C. Ford, R. Gilliland, G. F. Hartig, G. D. Illingworth, J. Mack, and W. J. McCann. The Photometric Performance and Calibration of the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys. , 117(836):1049–1112, October 2005. doi: 10.1086/444553. 6

M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D. G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, K. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk, and S. Wheelock. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). , 131(2):1163–1183, February 2006. doi: 10.1086/498708. 26

N. H. Sleep, K. Zahnle, and P. S. Neuhoff. Inaugural Article: Initiation of clement surface conditions on the earliest Earth. *Proceedings of the National Academy of Science*, 98(7):3666–3672, March 2001. doi: 10.1073/pnas.071045698. 13

Colin Snodgrass, Jessica Agarwal, Michael Combi, Alan Fitzsimmons, Aurelie Guilbert-Lepoutre, Henry H. Hsieh, Man-To Hui, Emmanuel Jehin, Michael S. P. Kelley, Matthew M. Knight, Cyrielle Opitom, Roberto Orosei, Miguel de Val-Borro, and Bin Yang. The Main Belt Comets and ice in the Solar System. , 25 (1):5, November 2017. doi: 10.1007/s00159-017-0104-7. 16

Peter B. Stetson. DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry. , 99:191, March 1987. doi: 10.1086/131977. 1, 6, 22, 32

D. J. Tholen. Asteroid taxonomic classifications. In Richard P. Binzel, Tom Gehrels, and Mildred Shapley Matthews, editors, *Asteroids II*, pages 1139–1150, January 1989. 14

Nicolas Thomas, Holger Sierks, Cesare Barbieri, Philippe L. Lamy, Rafael Rodrigo, Hans Rickman, Detlef Koschny, Horst Uwe Keller, Jessica Agarwal, Michael F. A'Hearn, Francesco Angrilli, Anne-Therese Auger, M. Antonella Barucci, Jean-Loup Bertaux, Ivano Bertini, Sebastien Besse, Dennis Bodewits, Gabriele Cremonese, Vania Da Deppo, Björn Davidsson, Mariolino De Cecco, Stefano Debei, Mohamed Ramy El-Maarry, Francesca Ferri, Sonia Fornasier, Marco

Fulle, Lorenza Giacomini, Olivier Groussin, Pedro J. Gutierrez, Carsten Güttler, Stubbe F. Hviid, Wing-Huen Ip, Laurent Jorda, Jörg Knollenberg, J. Rainer Kramm, Ekkehard Kührt, Michael Küppers, Fiorangela La Forgia, Luisa M. Lara, Monica Lazzarin, Josè J. Lopez Moreno, Sara Magrin, Simone Marchi, Francesco Marzari, Matteo Massironi, Harald Michalik, Richard Moissl, Stefano Mottola, Giampiero Naletto, Nilda Oklay, Maurizio Pajola, Antoine Pommerol, Frank Preusker, Lola Sabau, Frank Scholten, Colin Snodgrass, Cecilia Tubiana, Jean-Baptiste Vincent, and Klaus-Peter Wenzel. The morphological diversity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Science*, 347(6220):aaa0440, January 2015. doi: 10.1126/science.aaa0440. 15

Matthew S. Tiscareno and Renu Malhotra. The Dynamics of Known Centaurs. , 126(6):3122–3131, December 2003. doi: 10.1086/379554. 17

D. Tody. The IRAF Data Reduction and Analysis System. In D. L. Crawford, editor, *Instrumentation in astronomy VI*, volume 627 of *procspie*, page 733, January 1986. doi: 10.1117/12.968154. 1, 22

K. Tsiganis, R. Gomes, A. Morbidelli, and H. F. Levison. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. , 435(7041):459–461, May 2005. doi: 10.1038/nature03539. 10, 13, 20

MARTIN VALENTIN. Astrometria, predição de ocultações estelares e exploração de dados fotométricos do des para tnos e centauros em preparação ao lsst. 2020. 48

K. J. Walsh and A. Morbidelli. The effect of an early planetesimal-driven migration of the giant planets on terrestrial planet formation. *A&A*, 526:A126, February 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201015277. 13

Kevin J. Walsh, Alessandro Morbidelli, Sean N. Raymond, David P. O'Brien, and Avi M. Mandell. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. , 475(7355):206–209, July 2011. doi: 10.1038/nature10201. 13, 16

Tom J. Wilson and Tim Naylor. Improving catalogue matching by supplementing astrometry with additional photometric information. , 473(4):5570–5590, February 2018a. doi: 10.1093/mnras/stx2692. 2

Tom J. Wilson and Tim Naylor. A contaminant-free catalogue of Gaia DR2-WISE Galactic plane matches: including the effects of crowding in the cross-matching of photometric catalogues. , 481(2):2148–2167, December 2018b. doi: 10.1093/mnras/sty2395. 2

Tom J. Wilson and Tim Naylor. Solving the Catalogue Cross-Match Problem in the Era of LSST: The Effect of Unresolved Contaminant Objects on Photometric Catalogues. In *The 21st Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, page 79, December 2022. doi: 10.5281/zenodo.7464177. 2

O. C. Winter, G. Borderes-Motta, and T. Ribeiro. On the location of the ring around the dwarf planet Haumea. , 484(3):3765–3771, April 2019. doi: 10.1093/mnras/stz246. 11

Ron Wodaski. *The new CCD astronomy: how to capture the stars with a CCD camera in your own backyar*. 2002. 4

M. Zechmeister and M. Kürster. The generalised Lomb-Scargle periodogram. A new formalism for the floating-mean and Keplerian periodograms. *A&A*, 496(2): 577–584, March 2009. doi: 10.1051/0004-6361:200811296. 51

Géraldine Zenhäusern, Natalia Wójcicka, Simon C. Stähler, Gareth S. Collins, Ingrid J. Daubar, Martin Knapmeyer, Savas Ceylan, John F. Clinton, and Domenico Giardini. An estimate of the impact rate on Mars from statistics of very-high-frequency marsquakes. *Nature Astronomy*, 8:1138–1147, September 2024. doi: 10.1038/s41550-024-02301-z. 13

M. Zhang and J. Kainulainen. Deep point spread function photometric catalog of the VVV survey data. *A&A*, 632:A85, December 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201935513. 22

Apêndice A

Apêndice A

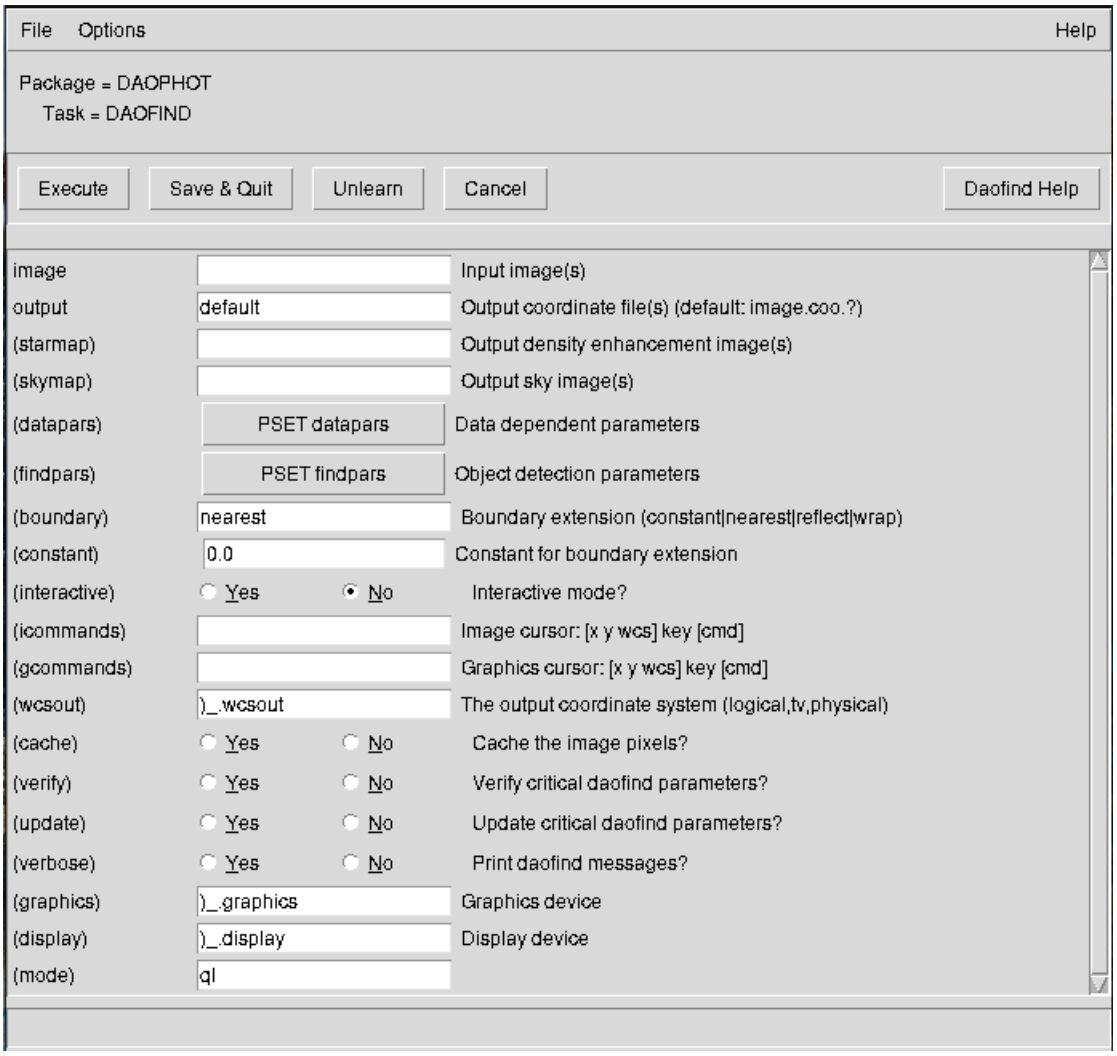


Figura A.1. Tela de parâmetros da tarefa daofind.

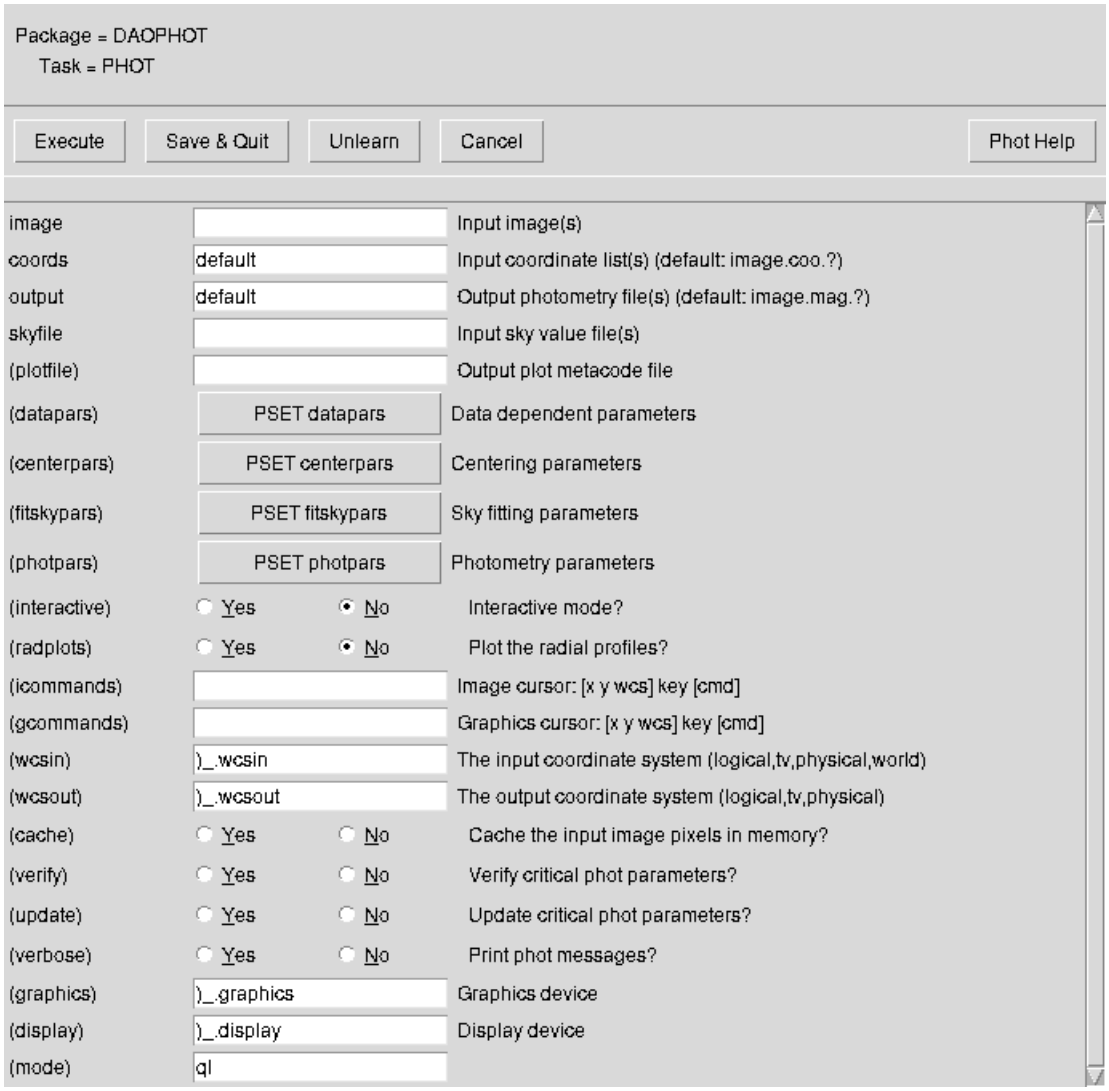


Figura A.2. Tela de parâmetros da tarefa phot.

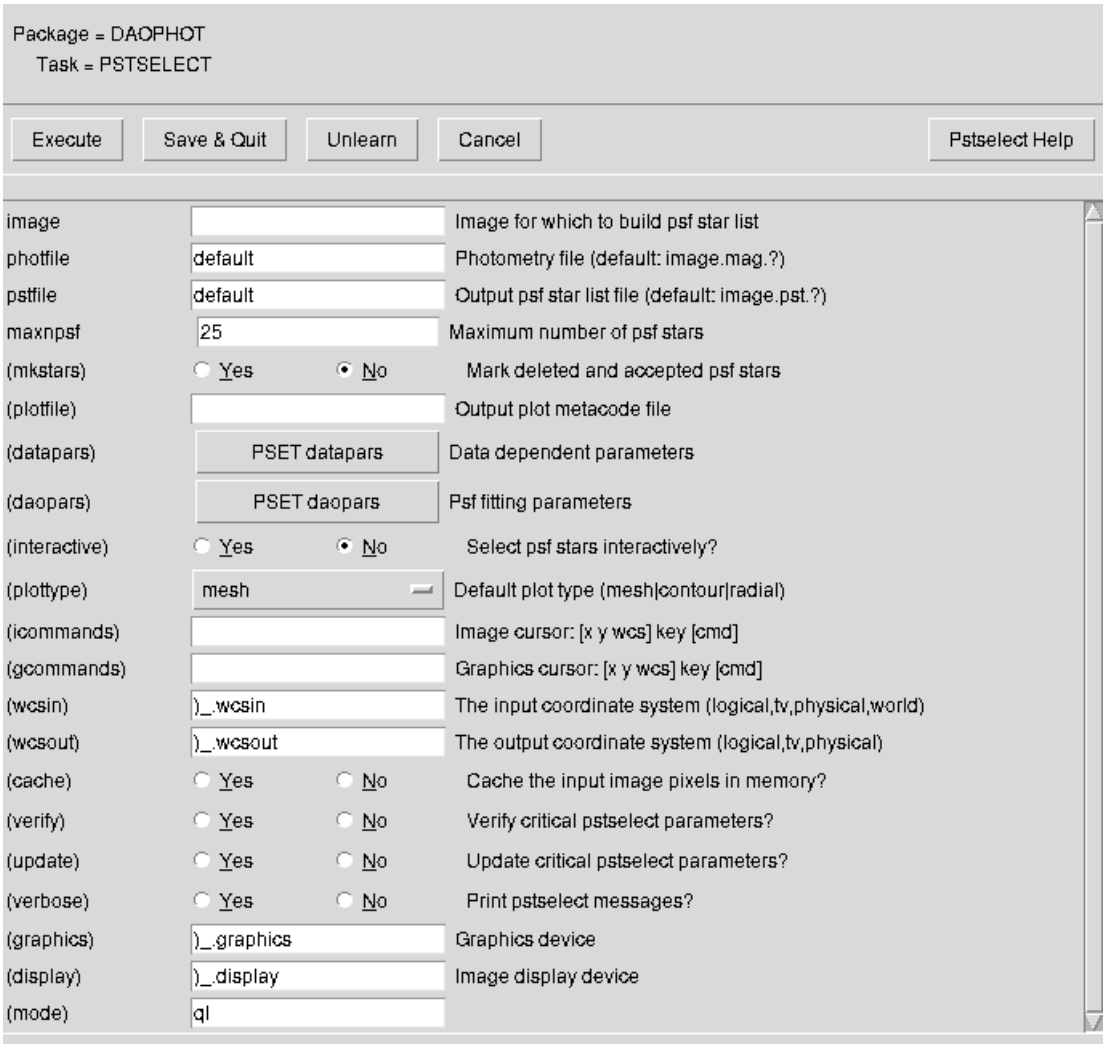


Figura A.3. Tela de parâmetros da tarefa pstselect.

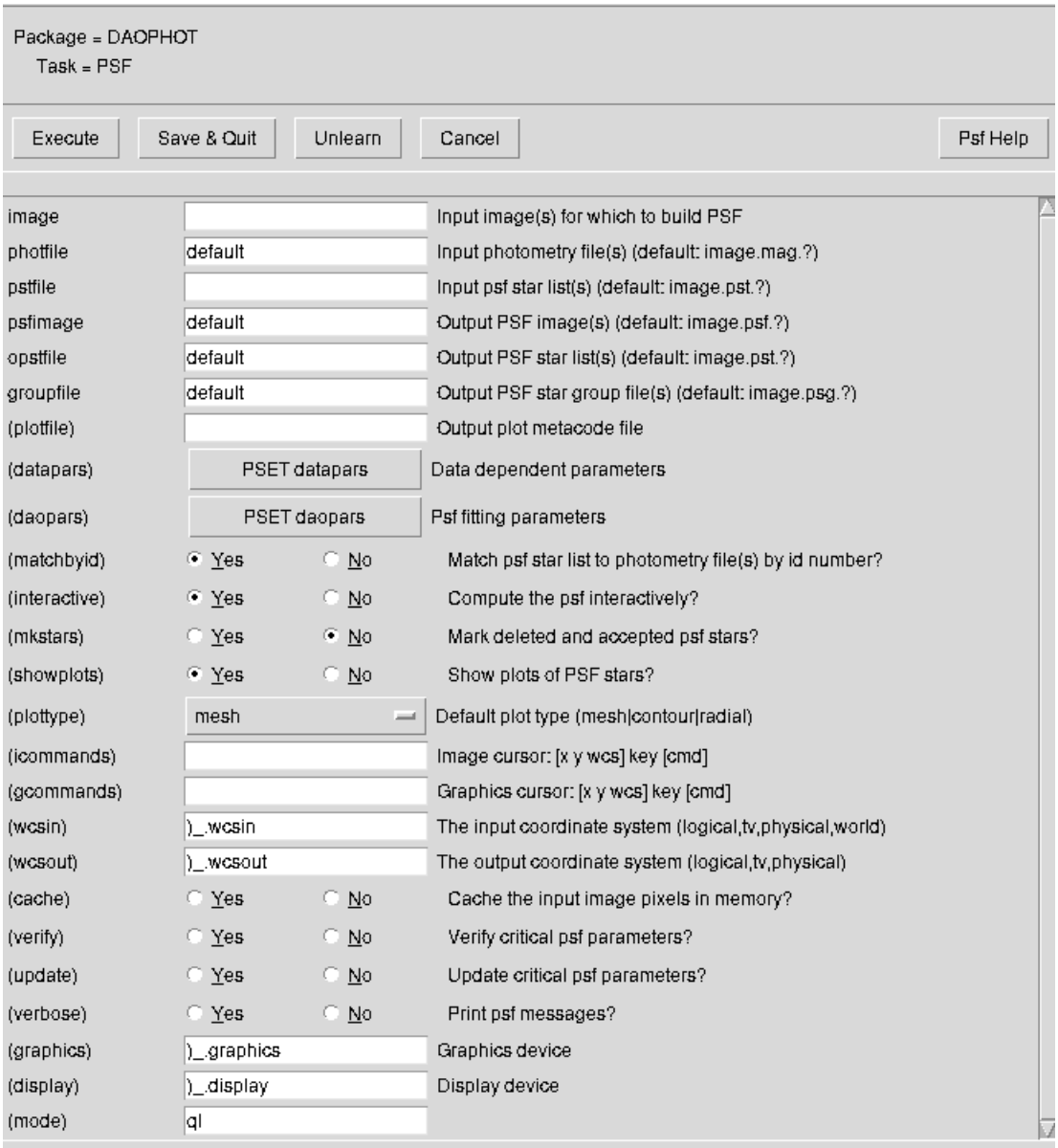


Figura A.4. Tela de parâmetros da tarefa psf.

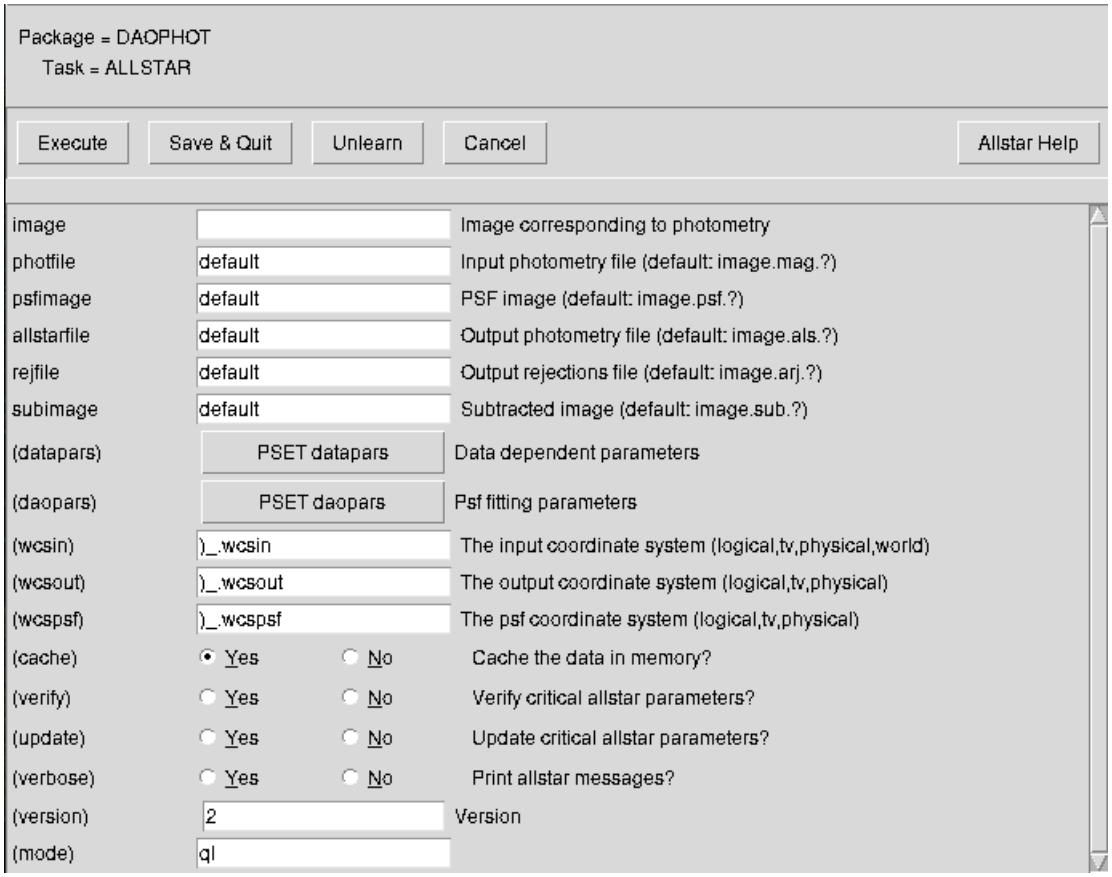


Figura A.5. Tela de parâmetros da tarefa allstar.

Apêndice B

Apêndice B

Códigos de Implementação

Dependências e funções utilizadas

```
import numpy as np
from astropy.timeseries import LombScargle
from tqdm import tqdm

def fourier_ap(t, a, phi, k, f):
    # Gera o harmônico de Fourier com coeficientes de amplitude e
    # fase, com valor fixo, situado entre 0 e 2*pi, k sendo o harmônico, e
    # f: a frequência.
    return a * np.cos(2 * np.pi * f * k * t + phi)
```

Carregamento e pré-processamento da série temporal

```
tempo_original, fluxo, erro_fluxo = np.loadtxt('flux_sigmas.txt',
    usecols=(0,1,2), unpack=True, dtype=float, comments="#")

ganho = 2

# Converter fluxo de ADU para e-/s
fluxo *= ganho
erro_fluxo *= np.sqrt(ganho)

tempo_referencia = 2457223.5  # Tempo de referência
tempo = tempo_original - tempo_referencia

print(f"Tempo de referência: {tempo_referencia}")
```

Análise de dados com o módulo LombScargle

```
periodo = 7.004/24  # Dias
frequencia = 1/periodo  # Ciclos por dia

ls = LombScargle(tempo, fluxo, erro_fluxo, nterms=2)
theta = ls.model_parameters(frequencia)
media = ls.offset()

a0, b1, a1, b2, a2 = theta
A0 = a0
A1 = np.sqrt(a1**2 + b1**2)
P1 = -np.arctan2(b1, a1) % (2*np.pi)  # (normalizada entre 0 e 1)
A2 = np.sqrt(a2**2 + b2**2)  # (normalizada entre 0 e 1)
P2 = -np.arctan2(b2, a2) % (2*np.pi)

print(f"Coeficientes de Fourier:\n"
      f"A0 = {A0:.3f}, A1 = {A1:.3f}, phi1 = {P1:.3f} rad\n"
      f"A2 = {A2:.3f}, phi2 = {P2:.3f} rad")

x_fit = np.linspace(0, periodo, 100)  # Valores de X para o modelo
y_fit = ls.model(x, frequencia)    # Modelo do Lomb-Scargle

# Contribuições individuais de cada frequência
z0 = fourier_ap(x, A0, 0, 0, frequencia)
z1 = fourier_ap(x, A1, P1, 1, frequencia)
z2 = fourier_ap(x, A2, P2, 2, frequencia)
```

Simulações para estimar as incertezas nos parâmetros modelados

```
periodo = 7.004/24      # Dias
erro_periodo = 0.036/24  # Dias
n_simulacoes = 1_000_000

print(f"Criando períodos...")
periodos = np.random.normal(periodo, erro_periodo, n_simulacoes)

nfluxo = len(fluxo)
print(f"\nSimulando fluxos...")
fluxos = [ [np.random.normal(fluxo[i], erro_fluxo[i])
    for i in range(nfluxo)] for n in tqdm(range(n_simulacoes))]

thetas = []
offsets = []

print(f"\nFazendo ajustes...")
for i in tqdm(range(n_simulacoes)):
    ls = LombScargle(tempo, fluxos[i], nterms=2)
    f = 1/periodos[i]
    thetas.append(ls.model_parameters(f))
    offsets.append(ls.offset())
print(f"\nSimulação concluída")

```

```
# Extraindo os coeficientes
thetas = np.array(thetas)
a0s, b1s, a1s, b2s, a2s, offsets = thetas.T[0], thetas.T[1], thetas.T[2],
    thetas.T[3], thetas.T[4], np.array(offsets)

A0s = a0s
A1s = np.sqrt(a1s**2 + b1s**2)
P1s = [(np.arctan2(-b1s[i], a1s[i]) % (2*np.pi))
    for i in range(len(a0s))]
A2s = [np.sqrt(a2s[i]**2 + b2s[i]**2) for i in range(len(a0s))]
P2s = [(np.arctan2(-b2s[i], a2s[i]) % (2*np.pi))
    for i in range(len(a0s))]

# Calculando as incertezas (erro padrão)!!
A1s_uncertainty = np.std(A1s, ddof=1)
A2s_uncertainty = np.std(A2s, ddof=1)

print(f"A1: {np.mean(A1s):.4f} +-{A1s_uncertainty:.4f}")
print(f"A2: {np.mean(A2s):.4f} +-{A2s_uncertainty:.4f}")

P1s_uncertainty = np.std(P1s, ddof=1)
P2s_uncertainty = np.std(P2s, ddof=1)

print(f"phi1: {np.mean(P1s):.4f} +-{P1s_uncertainty:.4f}")
print(f"phi2: {np.mean(P2s):.4f} +-{P2s_uncertainty:.4f}")

print("\nNormalizando entre 0 e 1 dividindo por 2pi:")
print(f"phi1: {np.mean(P1s)/(2*np.pi):.4f} +-{P1s_uncertainty
    /(2*np.pi):.4f}")
print(f"phi2: {np.mean(P2s)/(2*np.pi):.4f} +-{P2s_uncertainty
    /(2*np.pi):.4f}")

# Calculando a incerteza total na fase rotacional
inc_phi1 = P1s_uncertainty/(2*np.pi)
inc_phi2 = P2s_uncertainty/(2*np.pi)

a1, a2 = np.mean(A1s), np.mean(A2s)
inc_total = np.sqrt(((a1/(a1+a2))*inc_phi1)**2 +
    ((a2/(a1+a2))*inc_phi2)**2)

print(f"Incerteza total: {inc_total:.3f}")
print(f"Incerteza na posição do pico em segundos: {7.004*3600*
    inc_total:.0f}")
print(f"Incerteza na posição do pico em minutos: {7.004*60*
    inc_total:.1f}")
print(f"Incerteza na posição do pico em horas: {7.004*inc_total
    :.2f}")
print(f"Incerteza na posição do pico em dias: {periodo*inc_total
    :.4f}")
```

Determinação do pico da curva

```
offset = np.mean(offsets)
modelo = a0 + z1 + z2 + offset
phase_idx = np.argmax(modelo)
```

```
print(f"Ponto da fase rotacional onde o fluxo \'{e} máximo: {x[
    phase_idx]:.4f}")

# Convertendo o instante da fase em dias
print(f"Fase rotacional a partir do instante inicial (dias): {x[
    phase_idx]:.4f}")
print(f"Fase rotacional a partir do instante inicial (horas): {x
    [phase_idx]*24:.4f}")

# Determinando o instante central (lado maior de Chariklo)
print(f"Instante central do lado maior de Chariklo: {
    tempo_referencia+x[phase_idx]:.3f} +-{inc_total:.3f}")
print(f"Instante central do lado maior de Chariklo (em graus):
    {360*x[phase_idx]/periodo:.2f} +-{360*inc_total:.2f}")
```