



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

SOBRE A NATUREZA DOS COMETAS
HIPERBÓLICOS

MARÇAL EVANGELISTA SANTANA

ORIENTADOR: DR. JORGE MÁRCIO F. CARVANO
CO-ORIENTADOR: DR. MÁRIO DE PRÁ

RIO DE JANEIRO - RJ
2022

SOBRE A NATUREZA DOS COMETAS HIPERBÓLICOS

Marçal Evangelista Santana

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

Orientador: Jorge Marcio F. Carvano

Co-orientador: Mário De Prá

Rio de Janeiro
Novembro de 2022

SOBRE A NATUREZA DOS COMETAS HIPERBÓLICOS

Marçal Evangelista Santana

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

Examinada por:

Dr. Fernando Virgílio Roig, Observatório Nacional

Dr.Prof. Alvaro Augusto Alvarez Candal, Observatório Nacional

Dr. Julio Angel Fernandez Alves, UDELAR/Uruguai

Dr. Ricardo Gil-Hutton, CASLEO - Argentina

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2022

Evangelista Santana, Marçal

Sobre a natureza dos cometas hiperbólicos/Marçal
Evangelista Santana. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2022.

XIV, 94 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Jorge Marcio F. Carvano

Co-orientador: Mário De Prá

Tese (doutorado) – ON/MCTI/Programa de Pós-
graduação em Astronomia, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 75 – 83.

1. Cometas Hiperbólicos.
2. Fotometria.
3. Espectroscopia. I. Jorge Márcio F. Carvano.
II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-
graduação em Astronomia. III. Sobre a natureza dos
cometas hiperbólicos

*Em memória aos amados:
Marçal Evangelista Santana
(avô), Maria de Paulo Gomes
(avó).*

Agradecimentos

Agradecimento especial ao **Dr. Jorge Marcio F. Carvano** por toda paciência e dedicação. Eu não tenho palavras o suficiente para demonstrar toda gratidão e estima. Obrigado!

Ao meu coorientador **Dr. Mário de Prá**, obrigado pela amizade e parceria constante. Eu sou o *"bicho"* mais sortudo do Sistema Solar por receber a orientação e coorientação de vocês.

Ao Observatório Nacional, por oferecer a infraestrutura necessária para minha formação e realização deste trabalho.

Aos meus pais: Manoel e Socorro, o amor de vocês vai além das palavras. Aos meus irmãos e irmãs: Inácio, Ismael, Izuina, Eunice, João, Samuel, Cássia e Izac obrigado por se manterem próximos a mim. E aos meus amigos da IPBI, obrigado pelo acolhimento familiar.

Também, quero agradecer aos bons amigos do Observatório Nacional: Nacizo Holanda, Filipe Monteiro, Verónica Tacuri, Fredi Quispe. Todos tiveram significativa participação.

À equipe do projeto IMPACTON, por toda iniciativa e esforço para manter a pesquisa brasileira de pequenos corpos do Sistema Solar em andamento, muito obrigado Dra. Daniela Lazzaro e Dra. Terezinha e demais pesquisadores. Aos técnicos Roberto Souza, Santiago e Juliano. À equipe de observadores, Dr. Eduardo Rondón, Dr. Filipe Monteiro, Dra. Hissa Medeiros, Dra. Plícida Arcoverde, Me. Jonatan Michimani, Me. Francisco Wesley, Me. Wesley Pereira e Tatiane Corrêa. Obrigado pela paciência e por todo o trabalho e cuidado em observar os cometas *"é com tracking?, dithering? e sem binagem?"*, reconheço que foi cansativo, afinal, observar cometas era novidade para todos nós.

Ao Marcelo De Cicco e Luciana Fontes e aos amigos da EXOSS Citizen Science Project, obrigado!

Aos professores do PPG: **Dr. Alvaro Candal**, **Dr. Jorge Carvano**, **Dr. Júlio Camargo**, a **Dra. Daniela Lazzaro** pelo aprendizado e discussões durante as aulas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, que financiou este trabalho.

“O espaço, a fronteira final.

*Estas são as viagens da nave estelar Enterprise (**todos os seres vivos**), em sua missão de cinco anos (**quanto for necessário**) para a exploração de novos mundos, para pesquisar novas vidas, novas civilizações, audaciosamente indo onde nenhum homem jamais esteve!”*

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

SOBRE A NATUREZA DOS COMETAS HIPERBÓLICOS

Marçal Evangelista Santana

Novembro/2022

Orientador: Jorge Marcio F. Carvano

Co-orientador: Mário De Prá

Programa: Astronomia

Este trabalho apresenta um estudo sobre a caracterização de alguns cometas hiperbólicos. Esses objetos representam aproximadamente 12% da população total de cometas e são potencialmente importantes, uma vez dentro da população de cometas hiperbólicos estão aqueles provenientes de outros sistemas planetários, os cometas interestelares. Ou ainda, os Cometas Manx que são objetos vindos dos limites do Sistema Solar, mas que possuem baixa ou nenhuma atividade. Com o intuito de investigar os objetos hiperbólicos nós realizamos um estudo observacional voltado para a caracterização física desses objetos. Para isso nós realizamos observações sistemáticas a partir do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) para obtenção de dados fotométricos e a partir do telescópio SOAR para aquisição de dados espectroscópicos e fotométricos. Neste trabalho nós analisamos o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) que mostrou uma banda atípica em $0,595\mu\text{m}$. E a partir daí realizamos um estudo comparativo das cores e espectros de refletância de diferentes populações de pequenos corpos (por exemplo, cometas, centauros e objetos transnetunianos ou TNOs) da literatura e concluímos que os espectros e as cores deste cometa são atípicos, mostrando apenas alguma sobreposição com os de alguns membros conhecidos dos TNOs e Centauros, dentro das grandes incertezas de medições dessas populações. Outro objeto estudado foi o cometa hiperbólico C/2021 O3 (PANSTARRS) que mostrou decréscimo da atividade a medida que se aproximava de seu periélio e pode ter experimentado uma fragmentação durante essa aproximação. Esse objeto foi classificado como dinamicamente velho.

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

SOBRE A NATUREZA DOS COMETAS HIPERBÓLICOS

Marçal Evangelista Santana

November/2022

Advisor: Jorge Marcio F. Carvano

Co-advisor: Mário De Prá

Department: Astronomy

This work presents a study of the characterization of some hyperbolic comets. These objects represent approximately 12% of the total population of comets and are potentially important since within the population of hyperbolic comets are those from other planetary systems, the interstellar comets. Or still, the Manx Comets that are objects coming from the limits of the solar system, but that have low or no activity. In order to investigate hyperbolic objects, we performed an observational study aimed at the physical characterization of these objects. We carried out systematic observations at Astronomical Observatory of Sertão de Itaparica (OASI) to obtain photometric data and at SOAR telescope to acquire spectroscopic and photometric data. In this work we analyzed the hyperbolic comet C/2017 U7 (PANSTARRS) which showed an atypical band at $0.595\mu\text{m}$. And from there we carried out a comparative study of the colors and reflectance spectra of different populations of small bodies (for example, comets, centaurs and trans-Neptunian objects or TNOs) from the literature and concluded that the spectrum and colors of this comet are atypical, showing only some overlap with those of some known members of the TNOs and Centaurs, within the large uncertainties of the measurements of these populations. Another object studied was the hyperbolic comet C/2021 O3 (PANSTARRS) which showed a decrease in activity as it approached its perihelion and may have experienced fragmentation during this approach. This object has been classified as dynamically old.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
2 Cometas: Origens e destino	5
2.1 Os pequenos corpos do Sistema Solar	5
2.2 Cometas hiperbólicos	8
2.2.1 Por que estudar cometas hiperbólicos:	10
2.3 Taxonomia de Cometas	11
2.3.1 Definição Dinâmica	11
2.3.2 Definição Observacional	13
2.3.3 Definição Física	14
2.4 Sobre a evolução dos corpos gelados	15
3 Metodologia	21
3.1 Da obtenção dos dados	21
3.1.1 OASI: Um observatório no sertão pernambucano	21
3.1.2 Telescópio SOAR	22
3.1.3 Redução de dados	24
3.1.4 Fotometria	24
3.1.5 Espectroscopia	25
3.2 Tipo de Magnitudes:	26
3.2.1 Magnitude instrumental	26
3.2.2 Magnitude calibrada	27
3.3 Correção do Seeing	28
3.4 Cores	29
3.5 Gradiente espectral	30
3.6 Estimativa da produção de poeira ($Af\rho$)	30
3.6.1 Luz refletida em termos da perda massa	32
3.6.2 Fator de preenchimento	33

3.6.3	Observando Fluxo e $Af\rho$	33
3.6.4	Magnitude observada e $Af\rho$	33
4	Um estudo sobre as propriedades físicas do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS)	35
4.1	Um estudo sobre as propriedades físicas do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS)	36
4.1.1	Sobre a dinâmica	37
4.1.2	Evolução da coma	38
4.1.3	Estimativa do núcleo do cometa	39
4.1.4	Produção de poeira, $Af\rho$	41
4.1.5	Cores e propriedades espectrais	41
4.2	Conclusões	47
4.3	Trabalhos e Artigo apresentado	50
4.3.1	Congresso Nacional	50
4.3.2	Congresso Internacional	50
4.3.3	Artigo: Physical and dynamical characterization of hyperbolic comet C/2017 U7 (PANSTARRS)	50
5	Um estudo sobre o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS)	62
5.1	O cometa C/2021 O3 (PANSTARRS)	62
5.1.1	Sobre a dinâmica	63
5.1.2	O estudo observacional	63
5.1.3	Evolução da coma	65
5.1.4	Magnitude e produção de poeira	66
5.1.5	Propriedades Espectrais	67
5.1.6	Comparação com outros grupos de cometas	69
5.2	Conclusão	70
6	Conclusões e Perspectivas Futuras	73
	Referências Bibliográficas	75
A	Projetos de pedido de tempo submetido durante o doutorado	84
B	Trabalhos Desenvolvidos em Colaboração Durante a Tese	87

Lista de Figuras

2.1	Semieixo maior em função da inclinação. Acesso em 25 de Outubro de 2022: https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html	6
2.2	Esquema das órbitas cometárias: em azul, os cometas elíptico (excentricidade, $e < 1$); em verde, os cometas em órbitas parabólicas (excentricidade, $e = 1$) e em vermelho, os cometas hiperbólicos (excentricidade, $e > 1$).	9
2.3	Razão de descobertas de cometas hiperbólicos (em vermelho) entre 1800 e 2022 (26 de março). O intervalo do histograma é 1 por ano.	10
2.4	Classificação de cometas em duas populações. Os cometas de longo período (LPCs) e cometas de curto período (SPCs). Figura adaptada de Levison (1996).	12
2.5	Classificação de cometas usando o Parâmetro de Tisserand em relação a Júpiter Levison (1996)	13
2.6	Parâmetro de Tisserand em relação a Júpiter (T_J) em função da atividade. A linha vertical marcada em $T_J = 3,08$ indica o limite inferior para asteroides ativos. Esquema extraído de Jewitt and Hsieh (2022).	14
2.7	Abundâncias de várias espécies de voláteis relativos à água. Para cada espécie molecular, o número de cometas em que foi detectado é mostrado na margem direita, e o intervalo de valores encontrados entre essas detecções são mostrados na barra colorida (verde-claro) (Mumma and Charnley, 2011).	16
2.8	Relação dos primeiros planetesimais com os processos evolutivos dos corpos gelados no Sistema Solar (Meech et al., 2016).	17
2.9	Histograma de gradiente de refletividade para a região espectral no intervalo do ótico (5500Å a 6500Å). São plotados KBOs, núcleos, cometas mortos, Centauros e Troianos de Júpiter. A matéria ultravermelha, com gradiente de espectral, $\geq 25\%/1000\text{Å}$ está presente apenas no cinturão de Kuiper e nos centauros (Jewitt, 2004)	18
2.10	Comparação do espectro do C/2014 S3 (PANSTARRS) com asteroide tipo S, Meech et al. (2016)	19

3.1	Sítio do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica(OASI) e telescópio de 1metro e estrutura interna da cúpula (Para maiores detalhes: http://impacton.on.br/index.html ; (Rondón et al., 2020).	22
3.2	Imagem do sítio onde o telescópio SOAR está instalado (imagem obtida do LNA: https://www.gov.br/lna/pt-br/composicao-1/coast/obs/soar/telescopio-soar	23
3.3	Estimativa da melhor abertura através do S/R e da incerteza da magnitude.	25
3.4	O gráfico das magnitudes para fontes sintéticas: estrela, cometa (núcleo+coma) e coma versus σ da PSF da imagem.	29
4.1	Órbita do C/2017 U7 (PANSTARRS) com destaque para as observações analisadas neste trabalho.	38
4.2	Perfil radial de um grupo de estrela comparando com o cometa	40
4.3	$Af\rho$ em relação à distância cometocêntrica para o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) nos filtros g, r, r e i do sistema SDSS para observações obtidas em setembro de 2019. A Figura mostra uma linha tracejada que representa o tamanho da HWMN.	42
4.4	Espectro de baixa resolução do cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) e comparações com espectro fotométrico derivados a partir das cores obtidas com os filtros do sistema SDSS. Espectro foi obtido em 2018 e as cores foram obtidas em 2019, ambos a partir do SOAR.	43
4.5	Diagramas cor-cor para as diferentes populações de corpos menores mostrando a cor do C/2017 U7 (PANSTARRS) inativo (obtido do DES) e ativo (obtido do SOAR). Os dados sobre a população de cometas são de (Solontoi et al., 2012), a população de Centauros (Ofek, 2012; Peixinho et al., 2015) e Objetos transnetunianos ou TNOs (Terai et al., 2018).	45
4.6	Espectro de baixa resolução do cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) e comparações com espectro fotométrico derivados a partir das cores obtidas com os filtros do sistema SDSS. Espectro foi obtido em 2018, as cores foram obtidas em 2019, ambos a partir do SOAR.	46
4.7	Espectro de baixa resolução do cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) e comparações com espectro fotométrico derivados a partir das cores obtidas com os filtros do sistema SDSS. Espectro foi obtido a partir das cores foram obtidas em 2019, ambos a partir do SOAR.	47

4.8	Comparação dos espectros de refletância do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) (em preto) com espectros selecionados do RELAB (em vermelho) e entre parênteses o nome do arquivo espectral: (a) CI Tagish Lake (C1MT237B); (b) Meteorito de Ferro DRP78007 (CFMB47); (c) Mesosiderite Barea (C1MB33); (d) Amostra de Querite #13 (CAMS22).	48
5.1	Órbita do C/2021 O3 (PANSTARRS) com destaque para as observações analisadas neste trabalho.	65
5.2	Perfil radial de um grupo de estrela comparando com o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS)	65
5.3	Variação da produção de poeira, $Af\rho$ para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) ao longo dos meses de observação.	67
5.4	Produção de poeira $Af\rho$, considerando $\rho = 10.000$ km, em função da distância heliocêntrica. No gráfico (a) são mostrados os valores de $Af\rho$ considerando a banda g do sistema SDSS; no gráfico (b) são mostrados os valores de $Af\rho$ para a banda r do sistema SDSS e no gráfico (c) são mostrados o $Af\rho$ para a banda i do sistema SDSS.	68
5.5	Variação da inclinação espectral em função da produção de poeira, $Af\rho$ para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) ao longo dos meses de observação.	70
5.6	Reflectância espectral normalizado em $0.62\mu\text{m}$ do cometa C/2021 O3 (PANSTARRS).	71
5.7	$\log(Af\rho)$ computados para cometas em função das distâncias heliocêntricas. Em triângulo temos o parâmetro para Cometas de Longo Período (LPCs); em cruz os Cometas de Curto Período (SPCs); em hexágonos são os Asteroides Ativos e nos círculos vermelho as medidas obtidas para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) (Borysenko et al., 2020, 2019, 2022; Ivanova, 2020)	72

Lista de Tabelas

4.1	Circunstâncias observacionais para o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS). Em que são apresentados inicialmente o <i>survey</i> ou observatório de onde foram realizadas as observações, seguidos das datas, dos filtros usados para a fotometria e a região espectral quando para o caso dos espectros, por fim $\Delta_{(ua)}$, $r_{sol(ua)}$, $\alpha_{(0)}$, distâncias Terra-cometa, Sol-cometa e ângulo de fase observacional, respectivamente.	37
4.2	Parâmetros orbitais do cometa hiperbólico C/2021 O3 (PANSTARRS). Tempo de periélio em 21 de outubro de 2019.	37
4.3	Valores do $Af\rho$ para o cometa C 2017 U7 (PANSTARRS), derivados a partir do filtro na banda r do sistema SDSS.	42
5.1	Parâmetros orbitais do cometa hiperbólico C/2021 O3 (PANTARRS) antes e depois da desintegração.	63
5.2	Observações realizadas para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS). Δ : distancia geocêntrica, r : distancia heliocêntrica, e α : ângulo de fase.	64
5.3	Valores $Af\rho$ para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS), derivados a partir dos filtros do sistema SDSS, com referência para a abertura de $\rho = 10^4$ km e centrada no optocentro do cometa.	66

Capítulo 1

Introdução

Os pequenos corpos do Sistema Solar são, em uma primeira definição, os resíduos da formação dos planetas. Tais objetos testemunharam os processos pelos quais nosso Sistema Solar passou, incluindo contribuições de fontes pré-solares e até interestelares. Além disso, quando o gás estava presente no disco protoplanetário, durante os primeiros 5 milhões de anos, a assinatura química local foi impressa nos planetesimais. Assim, o estudo químico e físico de tais objetos pode trazer luz às condições iniciais no nosso sistema planetário e nos permitir inferir as condições iniciais em outros sistemas (Meech et al., 2016).

Contudo, a conexão entre a atual configuração do Sistema Solar e essas condições iniciais do sistema pode depender de como esse material foi sendo redistribuído dinamicamente ao longo do processo de formação planetária. E para conectar a formação inicial com a configuração atual, um possível caminho é realizar medições dos grupos de pequenos corpos oriundos de diferentes locais e compará-los com modelos dinâmicos e inferir sobre os rearranjos pelos quais o Sistema Solar passou. Os gelos encontrados nos cometas, por exemplo, podem sugerir que tenham se formado nas regiões dos planetas gigantes e migrado para outras regiões.

Neste contexto, realizamos um estudo observacional voltado para a caracterização física de cometas, especialmente aqueles que em suas órbitas atuais estão descritas na base de dados do JPL¹ como sendo hiperbólicos (neste grupo estão incluídos os cometas que são realmente hiperbólicos e os cometas que parecem hiperbólicos, mas possuem poucas observações ou não foram consideradas as perturbações planetárias), ou seja, excentricidade $e > 1$. A motivação inicial deste trabalho deu-se por parceria com colaboradores dinamicistas da Universidad Complutense de Madrid, inicialmente para a caracterização física e dinâmica do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS). A partir dessa parceria inicial, nós montamos uma estratégia observacional para estudar objetos com essa característica

¹<https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdblookup.html#/>

orbital.

Deste modo, todos os trabalhos percorridos nesta tese objetivam investigar cometas que em suas órbitas atuais estão definidos como hiperbólicos a partir de um ponto de vista observacional, buscando obter propriedades físicas dos núcleos e comas. Entretanto, além do estudo observacional, nós contamos com a colaboração de parceiros dinamicistas para a caracterização completo do objeto. Dentro deste objetivo geral, nós buscamos interagir com algumas questões fundamentais sobre o Sistema Solar. E dentro da nossa proposta, nós buscamos por alguns objetivos específicos:

- Estudar possíveis cometas interestelares.
- Observar e estudar Cometas Manxs (objetos de longo período com baixa ou nenhuma atividade).
- Caracterizar Cometas hiperbólicos de periélios maiores que 5 unidades astronômicas.
- Monitorar a atividade pré e pós-periélio.

Para atingir esses objetivos e enquanto proposta integrante do Projeto IMPACTON realizamos observações sistemáticas a partir do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI. Além do OASI, nós montamos e submetemos propostas observacionais para o telescópio SOAR. Tanto quanto possível, nós idealizamos a obtenção de dados espectroscópicos e fotométricos a partir do SOAR e paralelo uma observação mais sistemática a partir do OASI.

Durante o projeto de doutorado nós analisamos dados do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) obtidos a partir de dois projetos observacionais submetidos e executados a partir do telescópio SOAR para as propostas de 2018B e 2019B. A escolha desse alvo deu-se, inicialmente, em consequência de ele ser considerado um candidato a Cometa Manx (descreveremos melhor na seção 2.4). A primeira proposta (PI: Mário de Prá) foi executada em agosto de 2018, e as primeiras análises já mostraram característica cometária, embora ainda não tão evoluída. Uma nova proposta observacional foi submetida em 2019B (PI: Jorge Carvano) visando monitorar o cometa próximo a sua passagem pelo periélio.

Outro projeto observacional submetido e executado a partir do SOAR foi a da caracterização do primeiro cometa de origem interestelar, o C/2019 Q4 (2I Borisov). Entre os meses de novembro e dezembro de 2019 foram realizadas observações fotométricas a partir do OASI e nos meses de fevereiro e março de 2020 foram realizadas as observações a partir do SOAR (PI: Jorge Carvano) nos modos de imageamento e espectroscopia. A proposta em ambos os períodos deu-se para estudar a produção de poeira em distâncias pré e pós periélica para os dados obtidos por

imageamento e os dados espectroscópicos foram obtidos para estudar a contribuição do gás.

A partir desses dois objetos, nós montamos uma estratégia para continuar observando os cometas em órbitas hiperbólicas. Para o semestre 2021B, nós executamos as observações a partir do SOAR (PI: Marçal Evangelista) dos cometas C/2018 U1 (LEMMON) e C/2021 O3 (PANSTARRS) com o objetivo de estudar a produção de poeira a partir do imageamento na banda r do sistema SDSS e em modo espectroscópico na faixa espectral entre $0,5 - 0,9\mu\text{m}$. As observações foram distribuídas em três intervalos de três horas durante os meses de agosto, setembro e outubro de 2021. E ao passo que íamos obtendo essas medidas a partir do SOAR, nós também realizamos observações fotométricas sistemáticas a partir do OASI.

Por último e ainda em execução nós submetemos proposta para o semestre 2022B para o SOAR (PI: Marçal Evangelista) cujos objetivos são, estudar a evolução da atividade dos cometas C/2021 X1 (MAURY-ATTARD) e o cometa C/2022 F1 (ATLAS). O cometa hiperbólico C/2021 X1 foi inicialmente observado a partir do OASI quando ainda era considerando um asteroide hiperbólico, porém já durante as primeiras observações nós notamos uma aparência cometária. Desde o mês de março de 2022 temos coletado dados a partir do OASI e já temos duas observações a partir do SOAR (setembro e outubro) e ainda teremos mais uma a ser executada em janeiro de 2023. Outro ponto que é necessário mencionar é que este cometa terá sua passagem pelo periélio em maio de 2023, com isso teremos uma oportunidade única de acompanhar a evolução temporal da coma com mais de um ano de antecedência do periélio e seguir monitorando possivelmente no pós-periélio. Já o cometa C/2022 F1 (ATLAS) foi proposto como candidato a cometa interestelar, o que motivou ao envio de uma proposta para o programa de retorno rápido (fast turnaround program) do GEMINI (não foi aceito) e por isso incorporado neste projeto observacional para o semestre 2022B e observado durante os meses de agosto e setembro de 2022. Vale ressaltar que posteriormente esse cometa foi descartado como candidato a cometa interestelar.

Nesta tese nós não abordaremos todos esses objetos, alguns ainda estão em andamento. E alguns trabalhos estão sendo desenvolvidos tanto a análise das observações quanto o estudo dinâmico por nossos colaboradores dinamicistas. Assim, neste documento nós iremos apresentar a análise de dois objetos.

No trabalho que se segue, nós realizamos uma revisão bibliográfica no capítulo 2 sobre a taxonomia dos cometas e definições do ponto de vista dinâmico, observacional e físico. Analisamos ainda sobre a natureza dos cometas, possíveis locais de formação e diversos grupos que compõem essa população, seguido de uma discussão sobre a natureza dos cometas hiperbólicos, o objeto desta pesquisa observacional. No capítulo 3, nós realizamos uma descrição da metodologia, sítios de observação

e redução de dados. Enquanto no capítulo 4 nós analisamos o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) e no capítulo 5 nós analisamos o cometa hiperbólico C/2021 O3 (PANSTARRS). Finalmente, no capítulo 6, as conclusões e as perspectivas futuras deste trabalho.

Capítulo 2

Cometas: Origens e destino

Dos desenhos cunhados em rochas pelos povos antigos aos trabalhos observacionais de Tycho Brahe e o uso da mecânica newtoniana por Edmond Halley, os cometas passaram dos lampejos do misticismo para o estudo sistemático e científico. E a partir de um estudo sistemático usando mecânica newtoniana para descrever as órbitas dos cometas, Edmond Halley mostrou que os cometas que apareceram no ano de 1531, 1607 e 1682 são o mesmo cometa, e ainda previu seu retorno em 1758. Concluindo, portanto, que os cometas fazem parte do Sistema Solar.

É fato que aparições de cometas desde os tempos mais antigos e nas várias civilizações sempre despertaram o interesse da humanidade. Perpassando a mitologia e o misticismo para despontar como importante área de estudo das ciências planetárias. Portanto, a tarefa de estudar cometas e ir para além do que parece e chegar ao entendimento do que o é e suas estruturas e composições, têm logrado resultados que auxiliam na investigação de questões fundamentais nas Ciências Planetárias.

Neste capítulo, faremos uma abordagem sobre a população dos pequenos corpos do Sistema Solar, para então, definir sobre as características gerais dos cometas e suas principais definições tanto do ponto de vista dinâmico quanto sobre a perspectiva observacional e física.

2.1 Os pequenos corpos do Sistema Solar

Atualmente, a tentativa de conectar os dados observacionais com o local de formação desempenha um papel fundamental no mapeamento da química do Sistema Solar primitivo. E essa conexão pode fornecer as condições de contorno para modelos químicos do disco. Além disso, o estudo de propriedades químicas e físicas fornecem informações que podem impor restrições importantes aos modelos dinâmicos para a formação e evolução do Sistema Solar (Gomes et al. 2005; Walsh et al. 2011; Raymond and Izidoro 2017). Dentro desta perspectiva, os pequenos corpos, são de longe a ponte capaz de conectar os primeiros estágios do Sistema Solar, perpassando pela

história evolutiva com a atual configuração. São corpos rochosos e/ou gelados cuja distribuição de tamanho pode ir de alguns poucos metros até algumas centenas de quilômetros e são os objetos que menos sofreram modificação ao longo da história evolutiva do sistema planetário. Esses objetos são frequentemente organizados em grupos obedecendo alguns critérios distintos.

Na Figura 2.1 temos a distribuição dos pequenos corpos, dispostos ao longo de 200 unidades astronômicas e para fins didáticos mostramos apenas os objetos com inclinação menor que 70° : no gráfico (a) são mostrados a população dos Objetos Próximos à Terra (NEOs), Cinturão Principal de Asteroides, Troianos de Júpiter e Cometas; no gráfico (b) são mostrados os Centauros, os Objetos trans-Netunianos (TNOs) e os Cometas. A seguir discutiremos resumidamente sobre cada população.

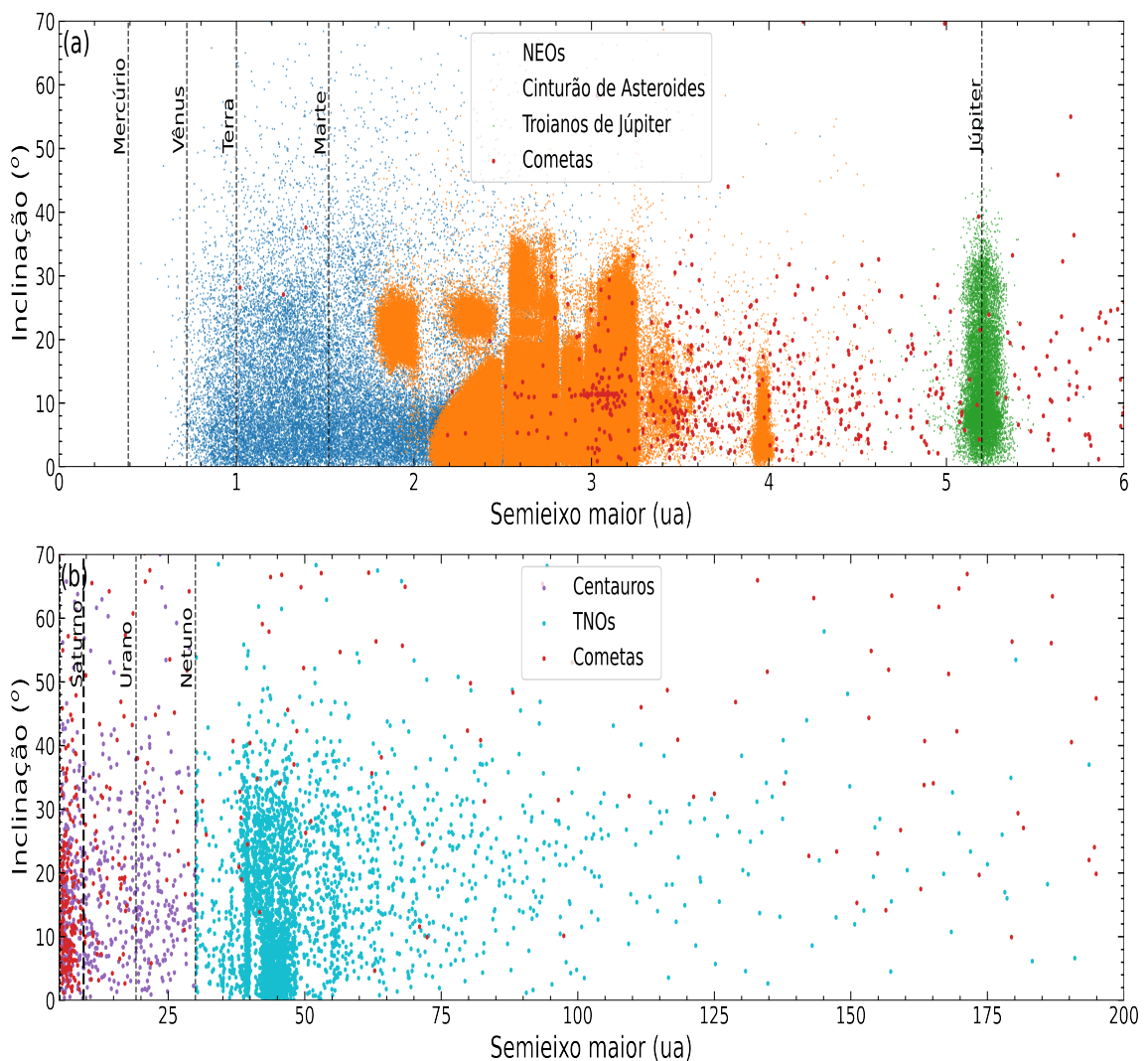


Figura 2.1: Semieixo maior em função da inclinação. Acesso em 25 de Outubro de 2022: https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html

- Near-Earth Objects:

Em termos de elementos orbitais, os Objetos Próximos à Terra, (NEOs do inglês *Near-Earth Objects*) são asteroides e cometas com periélio inferior a 1,3 unidades astronômicas que transicionaram para as vizinhanças da Terra movidos pela perturbação gravitacional dos planetas, em particular de Júpiter. A maioria dos NEOs são conhecidos como asteroides, dos quais são divididos em subgrupos menores (Atira, Atenas, Apolo e Amor) de acordo com suas distâncias de periélio, distâncias de afélio e seus semieixos maiores, embora alguns cometas de curto período também possam ser encontrados nesta região (Shoemaker et al. 1979; Binzel et al. 2019, 2002, 2015).

- O Cinturão Principal de Asteroides:

A seguir, o Cinturão Principal de Asteroides, é de longe, a maior concentração de asteroides conhecidos. Tais objetos estão localizados entre as órbitas de Marte e Júpiter, possuindo semieixos maiores entre 2,1 e 3,3 unidades astronômicas e inclinações tipicamente menores que 20° . É precisamente, a presença de Júpiter que molda a distribuição dos objetos no Cinturão Principal. Com um adendo para asteroides Hungaria que estão localizados mais próximos da borda interna do Cinturão Principal de Asteroides e do lado oposto os asteroides Hildas que estão localizados próximos de 4 unidades astronômicas (de León et al., 2018).

- Os Troianos de Júpiter:

Os troianos de Júpiter fazem parte da população de pequenos corpos, que estão presos em ressonância de movimento médio de 1:1 com o planeta Júpiter. Sua origem e composição são objeto de debate atual: Marzari and Scholl (1998) propuseram que se formaram em uma região próxima a Júpiter e detêm informações da parte central da nebulosa solar, enquanto Morbidelli et al. (2005) argumentou que eles foram capturados durante uma fase da migração planetária no início do Sistema Solar.

- Os Centauros:

Já os centauros podem ser considerados uma população intermediária dos pequenos corpos, estando em transição dinâmica da população de objetos de além da órbita de Netuno para os cometas da família de Júpiter. E embora existam várias definições para essa população, nós usaremos a de população, com periélio e semieixo maior entre as órbitas de Júpiter (5,2 unidades astronômicas) e Netuno (30 unidades astronômicas) e que não estão em ressonância de movimentos médios com planetas gigantes (Dones et al., 2015). Por se encontrarem na região dos planetas gigantes, os centauros têm vida dinamicamente curta em comparação com a idade do Sistema Solar. (Horner et al., 2004; Jewitt and Hsieh, 2022)

- **Objetos Transnetunianos:**

Os Objetos Transnetunianos (TNOs) compreendem a população de pequenos corpos localizados além a órbita de Netuno até algumas centenas de unidades astronômicas (Morbidelli and Brown, 2004). O primeiro pequeno corpo descoberto que foi inicialmente associado com o cinturão de TNOs foi 1992 QB1, descoberto por (Jewitt et al., 1992). Até esse ano a existência dessa população (que havia sido prevista por vários autores desde a década de 50) era apenas teórica.

- **Os Cometas:**

Os cometas são conglomerados de rochas e gelos de materiais voláteis (comumente chamados de "bola de gelo sujo"). Com órbitas de longo e curto período e moldados por suas interações com o campo de radiação solar e o vento solar Whipple 1950;Festou et al. 2004. Entre os objetos do Sistema Solar, os cometas sempre atraíram o fascínio da humanidade. Informações de pinturas ou desenhos de cometas puderam ser conhecidas por registros antigos cunhados em cavernas, roupas... Entretanto, estudos sistemáticos sobre as órbitas e natureza desses corpos só começaram a ser conhecidos a partir de trabalhos como o de Tycho Brahe. E a partir de então, os observadores tiveram uma visão mais séria do estudo de cometa e se começou a ter necessidade de fazer medidas de posição. Seguindo esse mesmo fascínio pelos estudos relacionados à observação dos cometas, é que a partir de agora, nós restringiremos nossa atenção a esse grupo dos pequenos corpos, e sempre que necessário compararemos com as outras populações de pequenos corpos.

2.2 Cometas hiperbólicos

Do ponto de vista orbital, os cometas podem ser classificados em três tipos, conforme mostrado na Figura 2.2: Cometas com Órbitas Eclípticas para os cometas periódicos cuja excentricidade é menor que 1, conforme pode visto no esquema da figura em azul; Cometas com Órbitas Parabólicas, para aqueles não periódicos cuja excentricidade é igual a 1, no esquema mostrado na Figura 2.2 é representado pela cor verde; Cometas em Órbitas Hiperbólicas, os cometas não periódicos com excentricidade maior que 1. Dentre esses tipos de cometas, nós focaremos no estudo e na caracterização dos cometas hiperbólicos.

Os pequenos corpos do sistema solar com órbitas hiperbólicas são potencialmente interessantes de se estudar, uma vez que podem ter origem interestelar, embora a maior quantidade dos objetos em tais órbitas sejam nativos do sistema solar. Portanto, precisamos entender, inicialmente, quais as possíveis origens dessas órbitas.

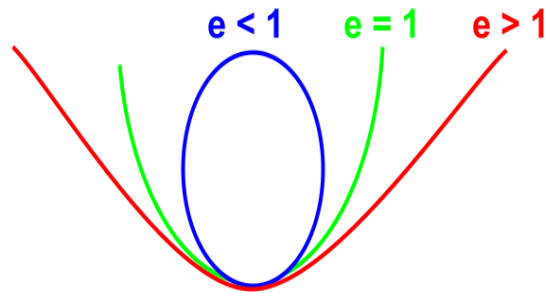


Figura 2.2: Esquema das órbitas cometárias: em azul, os cometas elíptico (excentricidade, $e < 1$); em verde, os cometas em órbitas parabólicas (excentricidade, $e = 1$) e em vermelho, os cometas hiperbólicos (excentricidade, $e > 1$).

No momento da escrita deste documento de tese já são conhecidos mais de 450 cometas em órbitas hiperbólicas (de acordo com suas órbitas atuais), representando aproximadamente 12% da população cometária na base de dados do JPL¹, conforme mostrado no Figura 2.3. Nessa figura pode ser vista a taxa de descoberta anual de cometas hiperbólicos. Entretanto, sobre essa quantidade de objetos descritos como cometas hiperbólicos faz-se necessário alguma consideração, em especial a de que essa definição considera as órbitas atuais e isso pode ser refinado com o aumento das observações e a inclusão de perturbações gravitacionais de outros corpos. Ademais, alguns mecanismos podem estar associados à origem de cometas hiperbólicos:

- O excesso de cometas hiperbólicos pode ser resultado de viés observacional causado por erros na determinação de órbitas causados por poucas observações.
- A órbita dos cometas pode ter evoluído para hiperbólica por encontros próximos com planetas ou o Sol.
- Perturbações seculares induzidas pelo disco galáctico ou impulsionados por estrelas passantes.
- Os cometas hiperbólicos podem ter origem interestelar.

Diversos autores ao longo dos anos têm dedicado interesse sobre os cometas hiperbólicos Sekanina 1967;Hughes (1991);Guliyev and Dadashov (2010);Królikowska

¹<https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdblookup.html#/>

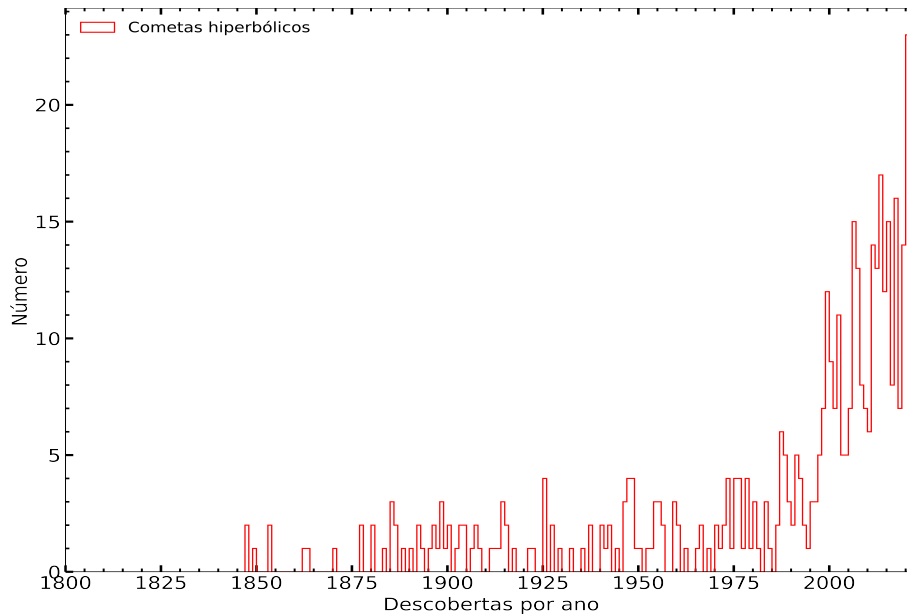


Figura 2.3: Razão de descobertas de cometas hiperbólicos (em vermelho) entre 1800 e 2022 (26 de março). O intervalo do histograma é 1 por ano.

(2001); de la Fuente Marcos et al. (2018); Higuchi and Kokubo (2020). Entretanto, esse interesse tem sido quase exclusivamente direcionado para a perspectiva dos mecanismos que podem gerar órbitas hiperbólicas. Uma vez que, para os corpos nativos do sistema solar, a evolução para órbitas hiperbólicas são frequentemente atribuídas a encontros próximos com os planetas ou o Sol. Enquanto na parte mais externa, processos como perturbações seculares induzidas pelo disco galáctico ou impulsioneados por estrelas passantes podem atuar rotineiramente na nuvem de Oort (Oort, 1950) fazendo com que os objetos desse reservatório sejam espalhados, inclusive, para o Sistema Solar interior.

2.2.1 Por que estudar cometas hiperbólicos:

É possível que a partir de uma perspectiva observacional não seja esperado uma distinção entre os cometas hiperbólicos e os cometas de longo período. Entretanto, as motivações para estudar cometas em órbitas hiperbólicas se dá pela possibilidade de busca por cometas interestelares e cometas do "tipo Manx" (ver seção 2.4), além de avançar na caracterização na população de objetos oriundos da Nuvem de Oort.

2.3 Taxonomia de Cometas

2.3.1 Definição Dinâmica

Historicamente, a taxonomia dos cometas foi baseada em seu período orbital, dividindo, conforme pode ser visto na Figura 2.4 em dois grandes grupos: Os Cometas de Curto Período (SPCs do inglês *Short-Period Comets*) os quais têm período orbital menor que 200 anos e com predominância de objetos com período orbital em torno de 20 anos (Cometas da Família de Júpiter). Enquanto os Cometas de Longo de Período (LPCs do inglês *Long-Period Comets* são aqueles com período orbital maior que 200 anos, dos quais ainda podem ser subdivididos em dois sub-grupos: os dinamicamente novos, ou seja, aqueles que estão adentrando o Sistema Solar e experimentando o aquecimento de sua superfície gelada pela primeira vez; e os cometas dinamicamente velhos, ou seja, aqueles que já passaram por múltiplas passagens periélicas.

Esses dois grandes grupos, os LPCs e SPCs, são comumente atribuídos como provenientes de dois grandes reservatórios, o Cinturão transnetuniano e a Nuvem de Oort, respectivamente. O Cinturão dos transnetunianos é uma região entre 30 e 55 unidades astronômicas composta de corpos de composição mista de rochas e gelos; A nuvem de Oort como hipotetizada por Jan Hendrik Oort em seu artigo clássico (Oort, 1950) é uma nuvem esférica de objetos que cercam o Sistema Solar e se estende a distâncias interestelares, chegando a 100,000 unidades astronômicas.

Entretanto, diversos autores realizaram estudos sobre os cometas e gradualmente foram surgindo algumas características que foram sendo usadas para distinguir de outras populações (asteroides) e em subgrupos. Além disso, com os avanços observacionais e tecnológicos nos últimos anos, sejam por caracterização individual ou com auxílio de grandes levantamentos de dados, possibilitou perceber algumas nuances que precisam ser consideradas.

Ainda assim, continuaremos com as definições clássicas. Para tanto, usaremos uma distinção dinâmica baseada no chamado parâmetro de Tisserand em relação ao planeta gasoso Júpiter. A expressão seguinte é chamada de Parâmetro de Tisserand, e pode ser descrita como:

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[(1 - e^2) \frac{a}{a_J} \right]^{1/2} \cos(i), \quad (2.1)$$

onde a , e e i são parâmetros orbitais de semieixo maior, excentricidade e inclinação, respectivamente, e $a_J = 5,2$ unidades astronômicas é o semieixo maior de Júpiter. O parâmetro de Tisserand é uma forma modificada da Integral de Jacobi, escrita no sistema de repouso das coordenadas. É, portanto, uma constante do problema circular restrito de três corpos. E a partir desse parâmetro são realizadas separações

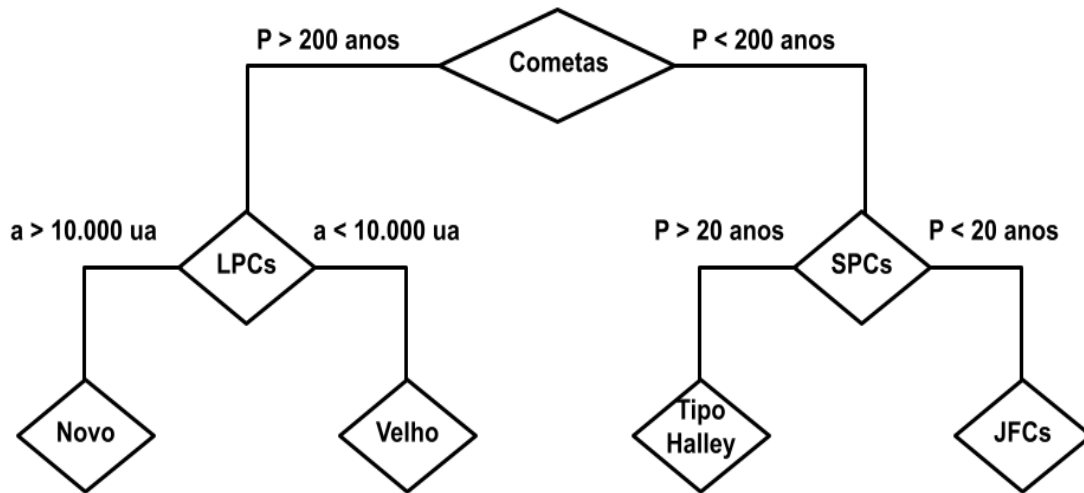


Figura 2.4: Classificação de cometas em duas populações. Os cometas de longo período (LPCs) e cometas de curto período (SPCs). Figura adaptada de Levison (1996).

clássicas, como, por exemplo: asteroides tem tipicamente $T_J > 3$ e cometas tem $T_J < 3$ (Vaghi, 1973).

Dentro dessa definição, Levison (1996), usou esse parâmetro para determinar uma classificação taxonômica, conforme pode ser visto no esquema mostrado na Figura 2.5. No esquema mostrado na figura, o autor separa em grupos de cometas em $T_J > 2$ para os cometas com órbitas eclípticas dos cometas com $T_J < 2$, designados como quase isotrópicos e associados como provenientes da Nuvem de Oort.

Portanto, os cometas com órbitas eclípticas, podem ser subdivididos em três grupos menores:

- Cometas da Família de Júpiter (JFCs, do inglês *Jupiter Family Comets*): Cometas que cruzam a órbita de Júpiter e possuem parâmetro de Tisserand em $2 < T_J < 3$.
- Cometas tipo Encke: Aqueles com $T_J > 3$ e $a < a_J$ e estão em órbitas internas a Júpiter.
- Cometas tipo Chiron (ou Centauro): Aqueles com $T_J > 3$ e $a > a_J$, e estão em órbita externa ao planeta Júpiter.

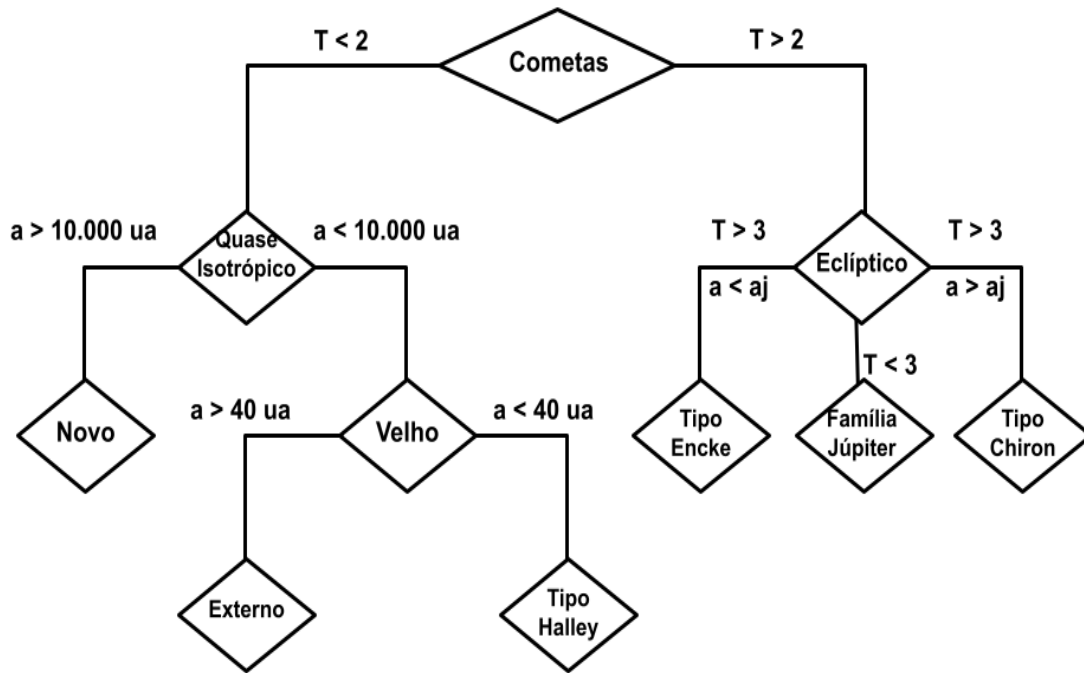


Figura 2.5: Classificação de cometas usando o Parâmetro de Tisserand em relação a Júpiter Levison (1996)

Em suma, conforme mostrado nos esquemas das Figuras 2.4 e 2.5 as diferentes propriedades orbitais podem sugerir diferentes reservatórios de origem. De modo que os estudos dinâmicos sobre cometas indicam ser a nuvem de Oort a principal fonte de cometas quase isotrópicos, incluindo cometas de longo período (LPCs) e cometas do tipo Halley. No que lhe concerne, os cometas da Família de Júpiter são atribuídos como proveniente da região dos transnetunianos. Os Cometas tipo Halley ainda são considerados de um reservatório ambíguo/indeterminado, pois tanto podem ter contribuição da Nuvem de Oort quanto de componentes dispersos do disco do Cinturão transnetuniano (Levison 1996; Duncan 2008; Jewitt and Hsieh 2022).

2.3.2 Definição Observacional

Até aqui, nós abordamos os cometas do ponto de vista dinâmico. Contudo, o foco deste trabalho é uma investigação observacional. E a faremos, sob a ótica da seguinte pergunta: Qual a distinção entre cometas e asteroides?

Do ponto de vista observacional, a distinção fundamental entre cometa e asteroides é identificação de coma em algum ponto da órbita. Todavia, a detecção ou não de coma depende criticamente da resolução e sensibilidade para identificar o brilho da coma. Sendo possível, portanto, que por limitações observacionais, co-

metas com baixa atividade sejam classificados como asteroides Jewitt (1996); Jewitt (2004); Jewitt and Hsieh (2022).

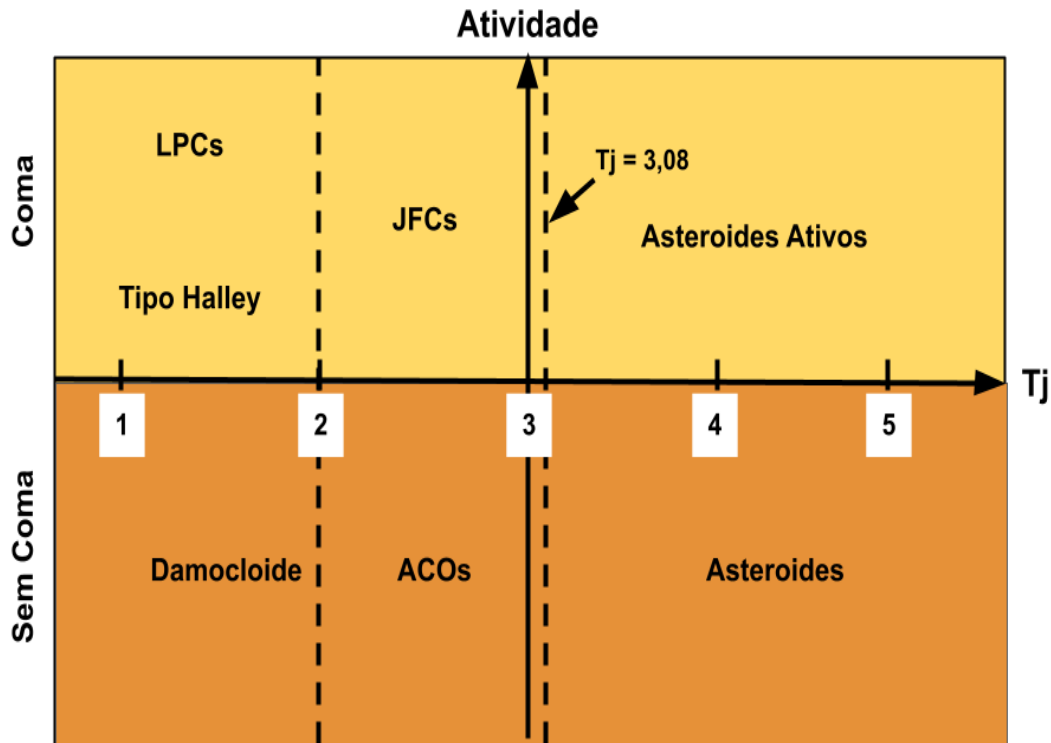


Figura 2.6: Parâmetro de Tisserand em relação a Júpiter (T_J) em função da atividade. A linha vertical marcada em $T_J = 3,08$ indica o limite inferior para asteroides ativos. Esquema extraído de Jewitt and Hsieh (2022).

Na Figura 2.6, há uma relação entre a classificação usando o Parâmetro de Tisserand com uma definição baseada na detecção ou não de coma, onde pode ser visto a separação dos diversos grupos de pequenos corpos distribuídos pelo parâmetro de Tisserand em função da atividade. Inicialmente os pequenos corpos estão divididos em corpos sem atividade (sem coma) e corpos com atividade (com coma) e segundo o parâmetro de Tisserand $T_J > 3,08$. Dos objetos sem coma estão os Damocloídes que são asteroides que tiveram seus voláteis superficiais exauridos e os Asteroides em Órbitas Cometárias (ACOS do inglês *Asteroids on Cometary Orbits*).

2.3.3 Definição Física

A definição observacional para cometas está associada com a definição física, uma vez que é a presença de volume de gelos (água e outros) que definem fisicamente um cometa. Do ponto de vista físico, vários mecanismos podem atuar na atividade cometária. E ao longo dos anos e a subsequente compreensão da atividade em distâncias crescentes, têm auxiliado na distinção de voláteis e supervoláteis e sua

dependência com a distância heliocêntrica, bem como o estudo de outros mecanismos que atuam na produção de atividade cometária Jewitt (1996); Meech and Svoren (2004); Jewitt (2004); Womack et al. (2017); Jewitt and Hsieh (2022).

O principal fator para a atividade dos cometas perto do Sol é a sublimação do gelo de água cristalina e a liberação de gases do interior. A temperatura na qual isso começa depende do calor latente de sublimação e da temperatura da superfície de equilíbrio do núcleo. Este último depende de fatores como a distância heliocêntrica, albedo, emissividade da superfície, taxa de rotação, direção do polo, bem como a difusividade térmica, que afeta o transporte de calor abaixo da superfície (Meech et al., 2009). Um ponto que também merece destaque é a transição do gelo de água amorfo para cristalino, pois quando esse gelo de água amorfo é aquecido, os gases aprisionados são liberados em níveis baixos entre 35 e 120 K em resposta à reestruturação dos gelos e isto também pode desencadear atividade (Meech and Svoren, 2004).

A sublimação, transição de material sólido para o gasoso em resposta ao aquecimento solar, é sem dúvida o mecanismo mais estudado. A superfície geladas dos cometas é muito sensível à temperatura, e quando o cometa experimenta a insolação solar (no sistema solar interior), faz com que aconteça uma considerável evolução superficial como resposta ao material volátil e supervolátil que é depletado.

Além da sublimação, eventos de colisões também acontecem em pequenos corpos, imagens de crateras observadas a partir de sondas espaciais mostraram que impactos podem ser mecanismos de perda de massa. E isso pode levar a erosões constantes por micrometeoroides.

Há muitas espécies moleculares já observadas como resultado da sublimação de voláteis em cometas, especialmente, as espécies criadas a partir da fotodissociação de moléculas precursoras. A Figura 2.7 mostra espécies moleculares depletadas obtidas a partir de uma campanha espectroscópica. Na figura são mostrados os números de cometas com as moléculas que foram encontradas. É possível observar o número de cometas e as abundâncias relativas às moléculas encontradas, notamos ainda que da população de cometas estudados na figura as moléculas de H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , CH_3OH , H_2CO , NH_3 , HNC , CH_3CN , H_2S estão entre mais abundantes da amostra.

2.4 Sobre a evolução dos corpos gelados

De modo resumido, o esquema mostrado na Figura 2.8 descreve a evolução dos corpos gelados. Note, ainda, que a disposição dos objetos no esquema segue a mesma tendência das taxonomias anteriormente descritas. Os cometas entram na parte interna do Sistema Solar após terem sido armazenados por um longo período em

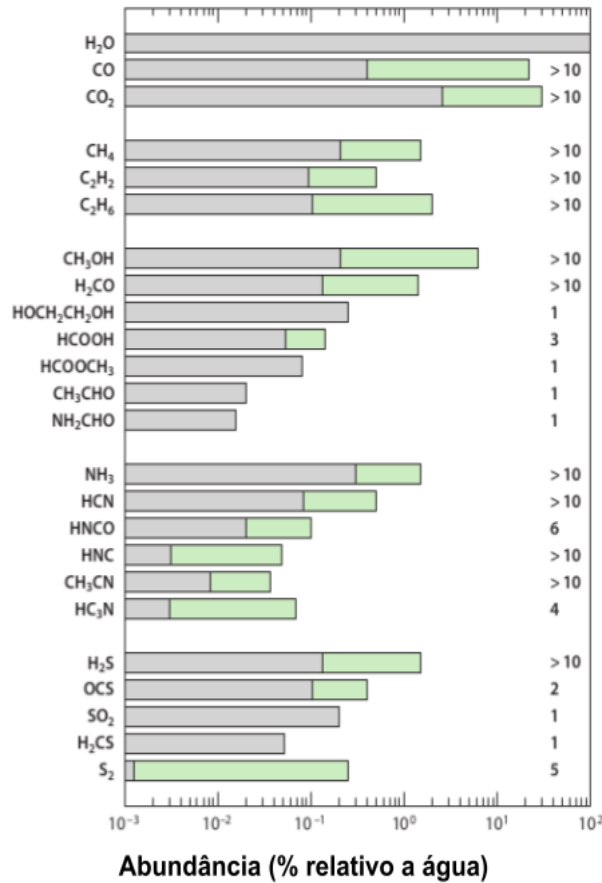


Figura 2.7: Abundâncias de várias espécies de voláteis relativos à água. Para cada espécie molecular, o número de cometas em que foi detectado é mostrado na margem direita, e o intervalo de valores encontrados entre essas detecções são mostrados na barra colorida (verde-claro) (Mumma and Charnley, 2011).

seus reservatórios. A região dos transnetunianos onde a temperatura de equilíbrio está aproximadamente entre 30 e 40K, e como escrito anteriormente, são reservatório dos Centauros, que no que lhe concerne pode ser uma população transiente para os Cometas da Família de Júpiter. Já a Nuvem de Oort onde a temperatura é de aproximadamente 10K é o reservatório de cometas de longo período (Jewitt, 2015). Á este grupo descreveremos mais detalhadamente.

Em suma, a nuvem de Oort como hipotetizada por Jan Hendrik Oort em seu clássico artigo (Oort, 1950) é uma nuvem esférica de objetos orbitando o Sol, e é, como já mencionado, o reservatório dos cometas de longo período. A nuvem de Oort provavelmente abriga uma população de cometas de natureza heterogênea. Embora a maioria dos cometas atribuídos como proveniente desse reservatório são descobertos quando estão em distâncias heliocêntricas relativamente pequenas e já possuem atividade evoluída. E isso pode induzir uma amostra tendenciosa, particularmente os cometas com distâncias de periélios bem além da órbita da Terra que

provavelmente estão sendo negligenciados.

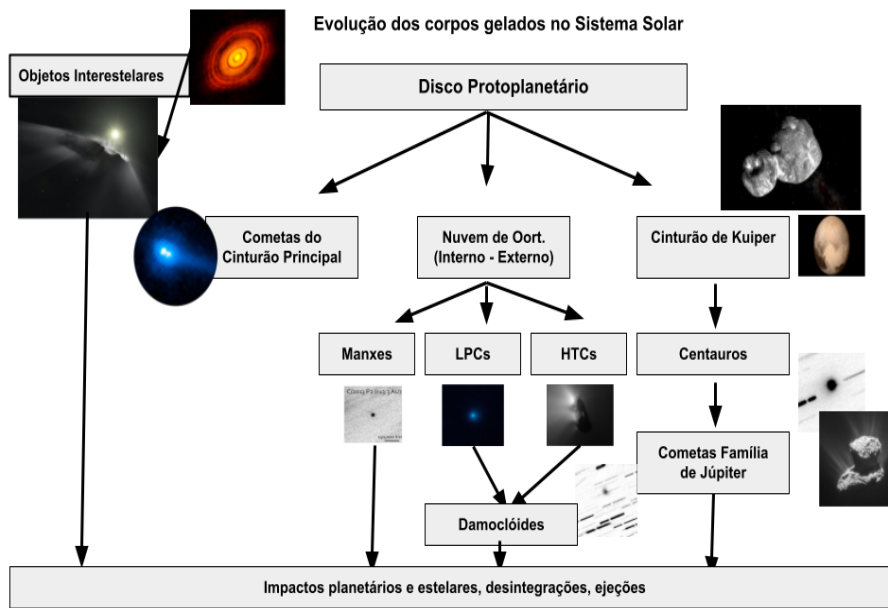


Figura 2.8: Relação dos primeiros planetesimais com os processos evolutivos dos corpos gelados no Sistema Solar (Meech et al., 2016).

Da população cometária proveniente da Nuvem de Oort, os clássicos cometas de longo período e os do tipo Halley, em consequência das múltiplas passagens pelo periélio, podem exaurir seus voláteis superficiais e se tornar prováveis núcleos inativos de cometas de longo período, os chamados Damoclóides. Do ponto de vista das propriedades espectrais (Licandro et al., 2018) mostraram que na região do visível a inclinação espectral média para os Damoclóides é de $12,2 \pm 2,4\%/1000\text{\AA}$ enquanto um grupo de asteroides em órbita cometária na região dos cometas da família de Júpiter tem inclinação espectral média $9,7 \pm 4,6\%/1000\text{\AA}$. O que também confirma e sustenta uma origem cometária para ambos os grupos e pode auxiliar na compreensão de sua natureza.

Na Figura 2.9 são mostradas as distribuições dos gradientes espectrais de diferentes populações de corpos primitivos. Os KBOs mostram desde gradientes mais neutros até muito avermelhados. E tem alguma similaridade com os Centauros, embora esta população possua alguns membros ativos. Os cometas mostram deficiência em material mais avermelhado, o que os autores sugerem como sendo resultado da sublimação em resposta ao aumento da temperatura.

Dos grupos de cometas oriundos da Nuvem de Oort, os Cometas Manxs podem ser uma população ainda pouco estudada, porém com destaque importante. O nome Manx foi inspirado em uma raça de gatos originário da Ilha de Man, com mutação natural que encurta a cauda e são popularmente conhecidos como gatos sem cauda. Assim, o termo Cometas Manxs é um termo informal que se refere a

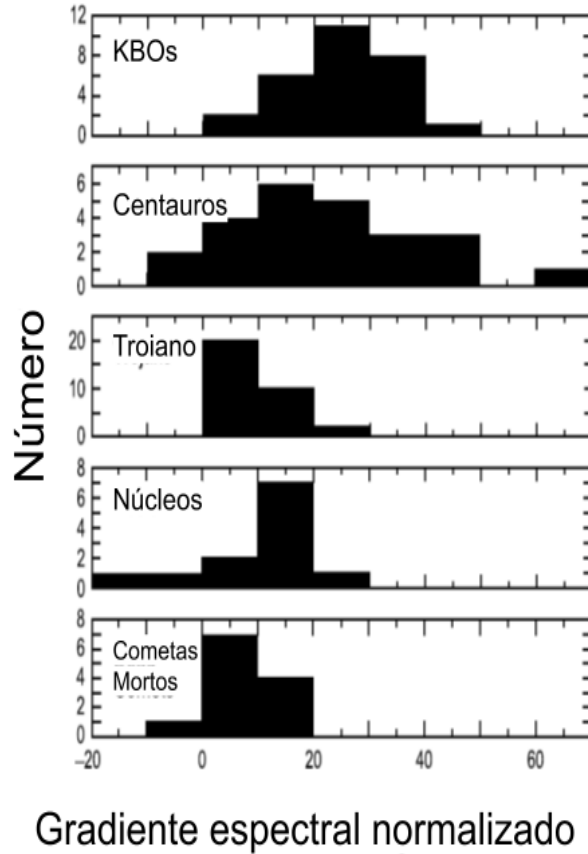


Figura 2.9: Histograma de gradiente de refletividade para a região espectral no intervalo do ótico (5500\AA a 6500\AA). São plotados KBOs, núcleos, cometas mortos, Centauros e Troianos de Júpiter. A matéria ultravermelha, com gradiente de espectral, $\geq 25\%/1000\text{\AA}$ está presente apenas no cinturão de Kuiper e nos centauros (Jewitt, 2004)

um novo grupo de Cometas de Longo Período com baixa ou nenhuma atividade, com uma superfície mineralógica que sugere que tenha se formado de material rochoso no Sistema Solar interior, podendo ter se formado perto da região da linha do gelo. (Meech et al., 2016) estudaram o cometa C/2014 S3 (PANSTARRS) e mostraram ser um objeto com órbita cometária com origem na Nuvem de Oort, porém com característica física similar a um asteroide rochoso do Tipo S do Cinturão Principal de Asteroides. O espectro desse objeto é mostrado na Figura 2.10 onde é possível comparar com espectro tipo S. Esse objeto e outros que possam ser observados podem ser um ponto-chave para mostrar o que é sugerido por alguns modelos dinâmicos, ao considerar que durante a migração planetária material rochoso pode ter sido expulso do Sistema Solar interior para a Nuvem de Oort. A aparência quase sem cauda foi sugerida como uma pequena fração de água oriunda do local onde o cometa se formou. Ainda seguindo descrição mostrada na Figura 2.8 vemos

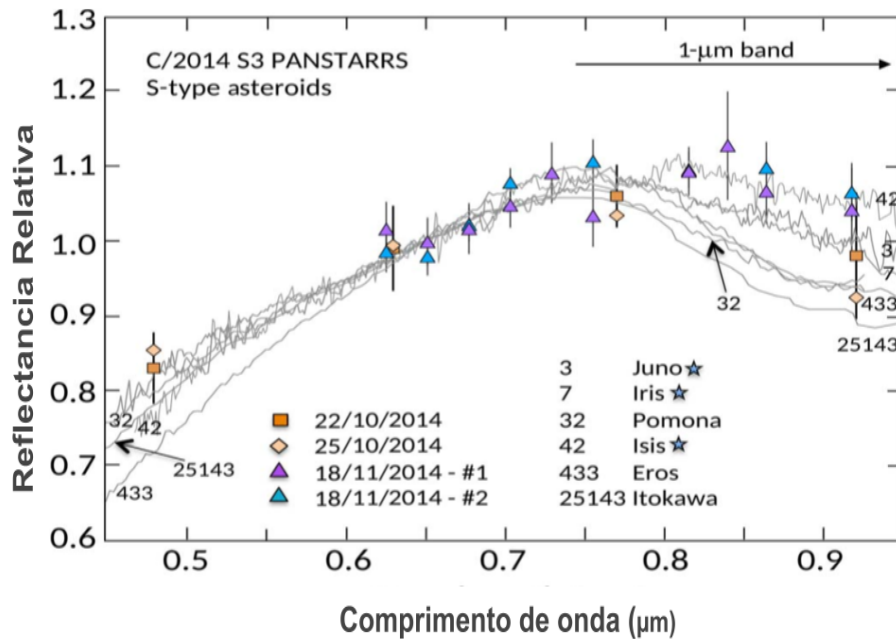


Figura 2.10: Comparação do espectro do C/2014 S3 (PANSTARRS) com asteroide tipo S, Meech et al. (2016)

que além dos objetos nativos do Sistema Solar, objetos oriundos de outros sistemas planetários também podem entrar no Sistema Solar interior ou povoar a Nuvem de Oort. Através desses objetos, nós temos a melhor oportunidade de acesso direto ao estudo dos discos circunstelares extra-solares em escalas macroscópicas. Um cometa comprovadamente de origem interestelar, o 2I/(2019 Q4) Borisov foi descoberto em 30 de agosto de 2019 pelo astrônomo amador Gennadiy Borisov da Universidade Estadual de Moscou e essa descoberta foi tornada pública em 11 de setembro. O cometa 2I/(2019 Q4) Borisov é, na verdade, o primeiro cometa interestelar e o segundo objeto interestelar conhecido (o primeiro foi 1I/(2017 U1)'Oumuamua). Um fato interessante é que os dois objetos parecem ter propriedades físicas bastante diferentes, enquanto 1I/(2017 U1)'Oumuamua foi observado inativo, o 2I/(2019 Q4) Borisov se mostrou ativado. Muito provavelmente a atividade observada do cometa 2I/(2019 Q4) Borisov foi decisiva para sua descoberta, pois seu pequeno tamanho teria passado despercebido por observações de pequenos telescópios (Jewitt and Luu 2019; Jewitt et al. 2020; Bolin et al. 2020).

Quanto ao fim dos cometas, vários estudos foram realizados para entender os processos que podem levar ao estado final dos cometas: as colisões com o Sol, com qualquer um dos planetas, asteroides ou pedregulhos interplanetários; fragmentação e desintegração por ruptura de maré (quando o cometa se aproxima do raio de Roche), erosão por sublimação, instabilidade rotacional (quando a desgaseificação

exerce um torque capaz de alterar o spin) (Oort 1950;Levison et al. 2002;Toth and Lisse 2006Brown et al. 2011;Fernández et al. 2016;Jewitt 2022

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo iremos descrever a metodologia usada no presente trabalho. Os dados apresentados aqui foram obtidos a partir de dois sítios de observação: O OASI, Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica e Telescópio SOAR de 4,1 metros. A seguir descreveremos sobre os sítios de observação, processos de redução e tratamentos dos dados e por fim as técnicas usadas em nossas análises, sejam esses dados obtidos com fotometria ou espectroscopia.

3.1 Da obtenção dos dados

3.1.1 OASI: Um observatório no sertão pernambucano

O Observatório do Sertão de Itaparica (OASI) integra o Projeto Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra do Observatório Nacional (IMPACTON). O observatório foi instalado no município de Itacuruba, na região do semiárido pernambucano, na região Nordeste do Brasil, e recebeu o código Y28 Nova Itacuruba junto ao MPC (*Minor Planet Center*) ((De Pra et al., 2013)). O observatório conta com um telescópio com um espelho primário de 1 metro de diâmetro, com montagem alto-azimutal, e CCDs (Charge Coupled Devices) com uma roda filtro que contém os filtros do sistema sloan: SDSS(u' , g' , r' , i' , e z') e um sistema de filtros Jonhon-Counsins (B, V, R e I). Os detalhes do observatório com as condições climáticas e de tempo da região onde o telescópio está instalado podem ser conferidos em Rondón et al. (2020).

Nossos dados observacionais foram obtidos preferencialmente nos filtros do sistema SDSS(g' , r' , i' , e z') e sem binagem. Durante nossas observações nós utilizamos duas CCDs, ambas com a mesma escala de placa 0,343 segundo de arco por píxel, essas informações são relevantes na caracterização dos cometas, conforme veremos adiante. Nós utilizamos ainda o movimento diferencial e optamos por fazer imageamento com *dithering*. O *dithering* foi empregado para suprimir os possíveis

efeitos sistemáticos da CCD e através do deslocamento de uma imagem para outra é possível criar uma máscara para correção dos efeitos de *fringe* (estruturas de franjas causadas pela difração, especialmente nas bandas i e z), e como o telescópio não dispõe de câmera de guiagem nós aplicamos um pequeno deslocamento de imagem por imagem e sem direção preferencial, geralmente de 20 a 25 píxeis de uma imagem para outra, porém é apenas um valor arbitrário, mas suficiente para que na imagem seguinte cada fonte não compartilhe fluxo com a posição da imagem anterior.

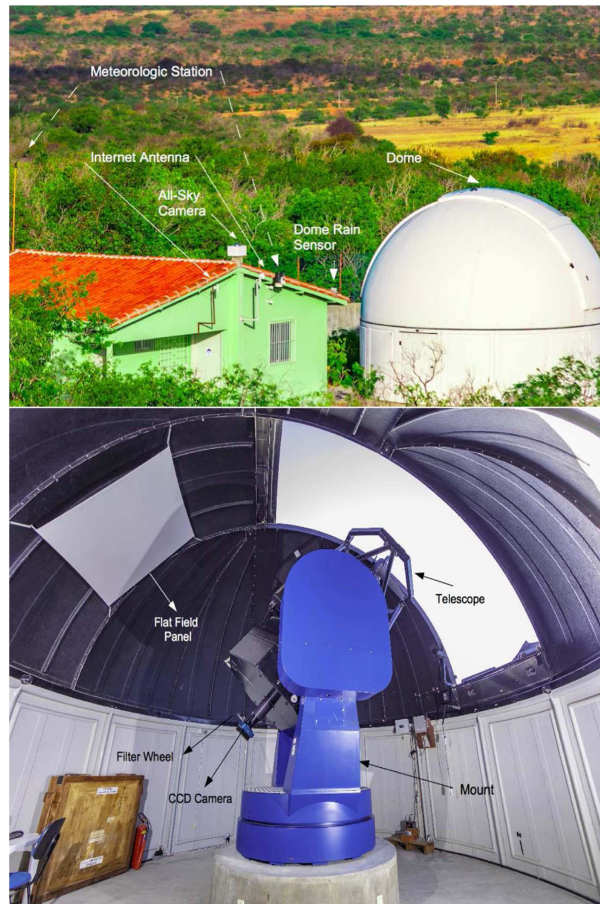


Figura 3.1: Sítio do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica(OASI) e telescópio de 1metro e estrutura interna da cúpula (Para maiores detalhes: <http://impacton.on.br/index.html>; (Rondón et al., 2020).

3.1.2 Telescópio SOAR

O *SO*uthern *AS*trophysical *R*esearch *T*elescope, ou comumente chamado telescópio SOAR, foi inaugurado em 17 de abril de 2014, sendo construído por um consórcio entre: Brasil, através do CNPq; e do National Optical Astronomy Observatory (NOAO), Universidade da Carolina do Norte (UNC) e Universidade Estadual de Michigan (MSU).

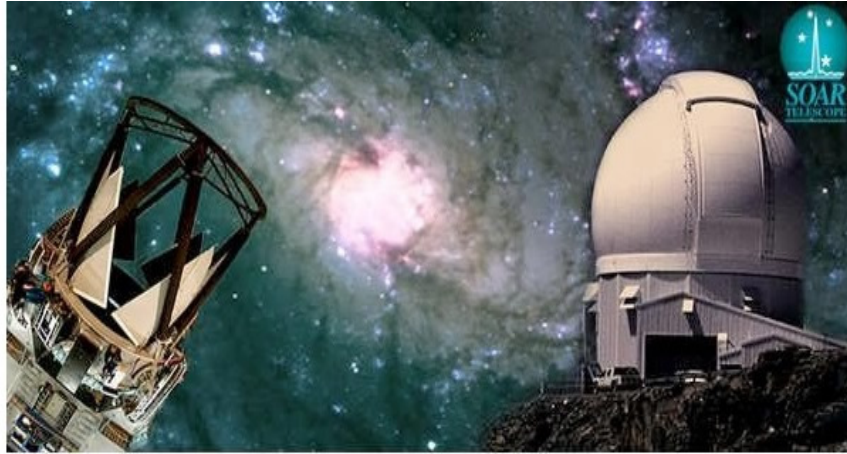


Figura 3.2: Imagem do sítio onde o telescópio SOAR está instalado (imagem obtida do LNA: <https://www.gov.br/lna/pt-br/composicao-1/coast/obs/soar/telescopio-soar>).

A Figura 3.2 mostra o telescópio SOAR que está situado em *Cerro Pachón*, uma montanha dos Andes Chileno a uma altitude de 2.700 metros acima do nível do mar. O telescópio foi projetado para produzir dados de melhor qualidade em sua categoria. Os pesquisadores brasileiros têm 31% do tempo total do telescópio, sendo o sócio majoritário.

Para o telescópio SOAR, nós submetemos projetos de observação para coleta de dados, os quais citamos brevemente na introdução. Para esta tese nós discutiremos os objetos obtidos nas propostas: *Investigating the nature of the hyperbolic asteroid A/2017 U7* (Proposta para 2018B); *Investigating the nature of the hyperbolic comet C/2017 U7* (Proposta para 2019B) e *Characterizing of the hyperbolic comet C/2018 U1 (Lemmon)* (Proposta para 2021B). Os dados obtidos foram a partir de imageamento e espectroscopia usando o instrumento Goodman High Throughput Spectrograph (GHTS). Em ambas as técnicas foi usado uma camera vermelha (Red Câmera). Para a fotometria usamos os filtros SDSS(g' , r' , i' , e z'), as imagens foram feitas sem binagem com uma câmera CCD com um campo de visão de 7,2 minutos de arco e uma escala de placa de 0,15 segundo de arco por píxel. Já para a espectroscopia obtivemos dados convergindo na região espectral variando de $0.5 - 0.9 \mu\text{m}$ com uma grade de 400 linhas por milímetro e uma fenda de $3,2''$. Essa configuração foi similar tanto para o cometa quanto para as estrelas análogas solares que foram utilizadas para retirar a influência solar.

3.1.3 Redução de dados

3.1.4 Fotometria

As observações dos objetos estudados nesta pesquisa foram obtidos a partir do Projeto IMPACTON, por observações fotométricas nos filtros g' , r' , i' e z do sistema Sloan no Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI); por projetos submetidos e aprovados ao telescópio SOAR de 4,1 metros em Cerro Pachón no Chile, com o *Goodman High Through-put Spectrograph (GHTS)* com a vermelha no modo de imageamento e espectroscopia.

As imagens obtidas foram reduzidas usando *Image Reduction and Analysis Facility (IRAF)* e as imagens obtidas a partir do Projeto IMPACTON são reduzidas parcialmente por um pipeline desenvolvido pelo Dr. Jorge Carvano. Para os dados obtidos a partir do OASI, inicialmente subtraímos as imagens de ciência pelo *Bias* ou *Dark* e a seguir dividimos pelo *Flat* normalizado. Como ainda não foi implementada a rotina para detecção de cometas no *pipeline*, nós descarregamos as imagens de ciências corrigidas por dark e flat e realizamos a fotometria com o Iraf.

Nós realizamos a fotometria de abertura dos cometas usando as tarefas DIGIPHOT/APPHOT incluídas no pacote (IRAF), variando aberturas a cada píxel. Para garantir que pegaríamos o máximo de fluxo do cometa, a fotometria foi realizada até o máximo de distância possível (sem coletar fluxo de outras fontes) e somente após obter a magnitude calibrada é que decidimos qual ou quais aberturas adotar nas investigações que propomos. Após obter as magnitudes instrumentais, nós usamos um conjunto de estrelas padrão da própria imagem que são, em seguida, comparadas com as magnitudes obtidas com catálogos fotométricos. Os catálogos adotados usam filtros similares aos usados nas observações e a escolha de um ou outro catálogo, em geral, depende do campo onde o objeto está e se tinha estrelas de calibração para cada campo. Ademais, nós usamos como critério de escolha, seguindo uma ordem decrescente: O *SkyMapper— Southern Sky Survey* (Keller et al., 2007) por ser um catálogo voltado para o hemisfério sul e o *SDSS— Sloan Digital Sky Survey* (Fukugita et al., 1996) que foi obtido para o hemisfério norte.

Nós realizamos alguns testes antes e durante a escolha das aberturas. Um primeiro teste apenas visual foi realizado através da ferramenta de exibição e visualização de imagens astronômicas SAOImageDS9 (Joye and Mandel, 2003) para ter ao menos uma ideia da abertura que conterà todo o fluxo da fonte (projetar círculos sobre a fonte). A seguir, nós calculamos a razão sinal ruído e as incertezas na magnitude, conforme mostrado na Figura 3.3. Em termos práticos, o maior relação sinal-ruído e a menor incerteza indicam a melhor abertura, ou seja, o fluxo total da fonte. Ainda assim, a influência da coma e cauda cometária deve ir além da abertura onde a relação sinal-ruído foi máxima e a incerteza na magnitude mínima,

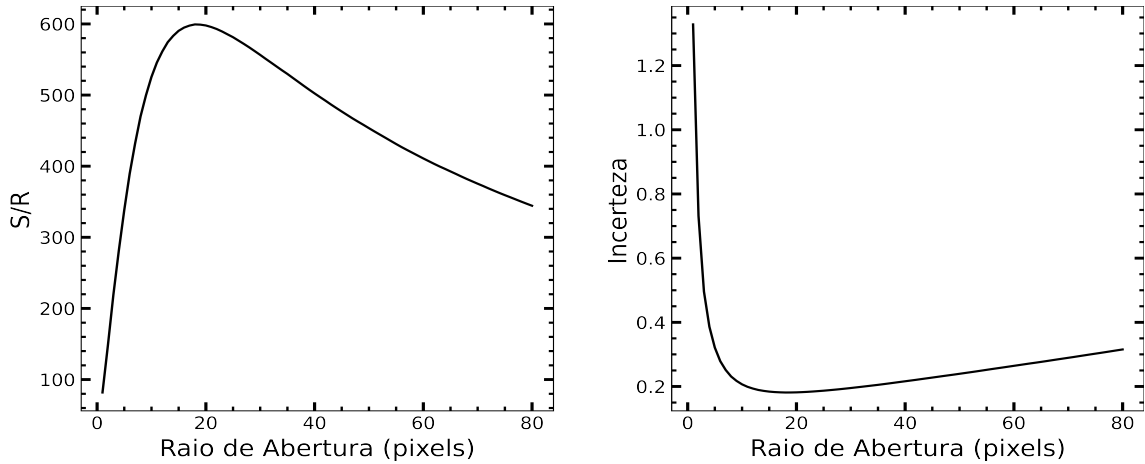


Figura 3.3: Estimativa da melhor abertura através do S/R e da incerteza da magnitude.

estendendo-se, inclusive, para além dos limites de detecção de nossos instrumentos. Outro possível problema em usar apenas teste visual e o ponto de estabilidade do fluxo/magnitude ou ainda o sinal ruído e incerteza para a escolha da melhor abertura, se dá pelo fato que, em geral, nós estamos interessados em investigar a variação da atividade cometária a medida que se aproxima ou se afasta do periélio. Quando isso é feito, as aberturas totais irão sendo alteradas significativamente com o aumento ou diminuição do grau de atividade e área da seção transversal também será outra. Para tanto, optar por tornar fixa a distância cometocêntrica se torna uma escolha razoável (Howell, 2006; Romanishin, 2006). Assim, nós usamos as aberturas obtidas a partir da fotometria e conhecendo as escalas de placa dos instrumentos e distância do cometa até a Terra no momento da observação e dispendo de uma operação matemática simples, nós calculamos a distância em quilômetros a partir do núcleo cometário e assim calculamos o raio da seção transversal.

Historicamente muitos autores que trabalham com cometas optam por considerar uma distância fixa de 10000 km, com o intuito de mitigar possíveis contaminações pela cauda. Entretanto, nós avaliamos os cometas caso a caso para definir quais aberturas considerar, ou ainda usar mais de uma abertura fixa e apresentar resultados fotométricos em mais aberturas. Com isto é possível investigar o quanto as cores podem variar a medida que os grãos de poeira se afastam do núcleo. Ademais, para estimar a magnitude calibrada dos cometas nós optamos por tornar aberturas fixas e assim compará-las com todo o período de observação.

3.1.5 Espectroscopia

Os dados de espectroscopia foram reduzidos usando IRAF. Inicialmente realizamos um corte de todas as imagens e preservando a área de interesse, no caso

específico a região contendo o espectro e a área correspondente nas imagens de calibração (este corte é comumente chamado de TRIM nas tarefas do IRAF). A seguir corrigimos por Bias e flat normalizado (em nossas observações nós optamos por realizar flat de Domo).

A seguir combinamos pela média os espectros individuais das estrelas análogas solares, mas os espectros do cometa foram tratados individualmente e somente ao fim foram combinados pela média. Na sequência é extraído o espectro das fontes (cometa e análoga solar) usando a tarefa APALL do IRAF, centrada no optocentro do cometa e das demais fontes. Para o cometa é necessário um cuidado extra ao extrair o céu, optando pela extração de uma região livre da influência da coma e poeira. O passo seguinte foi calibrar em comprimentos de ondas, e o fizemos a partir do espectro de lampada de HgArNe para os dados obtidos na janela espectral de $0,5 - 0,9\mu\text{m}$. Somente após a extração e calibração por comprimento de ondas foi que combinamos pela média os espectros dos cometas e dividimos por cada análoga solar e em seguida obtivemos a média desses resultados.

3.2 Tipo de Magnitudes:

No IRAF, existem várias tarefas para calcular a fotometria. Entretanto, a tarefa básica é chamada de PHOT, com uma série de possibilidades para a execução, em especial em como a influência do céu é medido, mas a mais simples é usando aberturas de medição circular e um anel concêntrico em que é medido um valor médio para a influência do céu. A tarefa PHOT mede, então, a contagem nas aberturas adotadas e subtrai pelo valor médio do céu. Gerando um arquivo de saída com parâmetros da redução, entre outras medidas, inclusive magnitudes instrumental e erro associado.

3.2.1 Magnitude instrumental

Em geral, a magnitude instrumental, é a magnitude medida com IRAF e com erros instrumentais. De modo tal que a magnitude instrumental de uma fonte é calculada pela diferença entre a contagem total em uma abertura específica e o valor do fundo do céu, estimada por um anel concêntrico. Esse anel é usado para calcular o valor médio do céu e deve ser afastado o suficiente para não conter fluxo do cometa (coma e cauda) que se deseja medir, porém, deve-se tomar cuidado para não pegar área contaminada com o fluxo dos objetos de fundo.

A magnitude instrumental do cometa, pode ser expressa pela equação:

$$m_{inst} = m_{cometa} + C, \quad (3.1)$$

onde: m_{inst} é a magnitude instrumental, m_{cometa} é a magnitude do cometa e C é um parâmetro que depende de uns conjuntos de fatores: influência da atmosfera terrestre, do telescópio e do detector usado na aquisição dos dados.

3.2.2 Magnitude calibrada

Definimos como magnitude calibrada, a magnitude corrigida pelos efeitos causados pela atmosfera e efeitos instrumentais. Em geral, são obtidos dados de uma estrela padrão em diferentes massas de ar para se obter o coeficiente de extinção atmosférica de cada noite, a partir do coeficiente angular da reta da magnitude instrumental da estrela de calibração em função da massa de ar. E a partir dessa relação é que é definido o ponto zero. Entretanto, os efeitos de microturbulências atmosféricas e nuvens podem incorporar erros na determinação dessa magnitude. Como alternativa, nós optamos por usar estrelas do campo (estrelas que aparecem na própria imagem). Essa escolha é útil por questões práticas de observação e redução, e é bastante aconselhável, uma vez que tanto a fonte a ser estudada (no nosso caso, o cometa) quanto as estrelas usadas para a calibração estão na mesma condição atmosférica e mesma massa de ar. Em geral, nós identificamos uma sequência de estrelas na imagem e estrelas catalogadas no mesmo sistema de filtros e subtraímos a magnitude instrumental da estrela pela magnitude catalogada no filtro correspondente, conforme a expressão a seguir:

$$C = m_{inst} - m_{cat}, \quad (3.2)$$

onde m_{inst} é a magnitude instrumental e m_{cat} é a magnitude do catálogo no filtro correspondente e C é parâmetro que inclui efeitos atmosféricos e instrumentais. Em geral, usando estrelas observadas pelo *SkyMapper— Southern Sky Survey* (Keller et al., 2007) ou o *SDSS— Sloan Digital Sky Survey* (Fukugita et al., 1996) como estrelas para calibração. Na prática, essa subtração corresponde aos efeitos atmosféricos e instrumentais.

A seguir calculamos a magnitude calibrada para o cometa, usando a expressão:

$$m_{cal} = m_{inst} - \bar{C}, \quad (3.3)$$

onde m_{cal} é a magnitude calibrada do cometa no comprimento de onda do filtro usado, m_{inst} é a magnitude instrumental obtida a partir do IRAF e \bar{C} é a mediana das subtrações obtidas com as estrelas do campo e magnitude correspondente do catálogo. Ao optar por usar estrelas do campo e escolher várias estrelas, o uso da mediana pode ser mais eficiente do que o uso da média (embora também possa ser usada) para retirar as estrelas variáveis ou medidas ruins.

3.3 Correção do Seeing

A tentativa de isolar a contribuição do brilho do núcleo do brilho da coma e variações pela área iluminada (análise do período), envolve realizar medições fotométricas com abertura pequena o suficiente para pegar o fluxo fechado no núcleo. Ademais, os efeitos causados pela turbulência atmosférica podem induzir variações, essas turbulências são comumente chamadas de "Efeito de Seeing" podem variar durante a noite, portanto, é necessário que este efeito seja considerado, especialmente para fotometria em pequenas aberturas. O "Efeito do seeing" afeta diretamente a forma da PSF (*PSF do inglês, Point Spread Function*). No nosso caso, pelo fato de derivarmos um espectro fotométrico a partir de filtros fotométricos obtidos não simultaneamente e de que possivelmente haja pequenas variações da atmosfera ao longo da obtenção dos filtros, essa correção pode se tornar necessária.

Este efeito foi bastante estudado por Licandro et al. (2000). A ideia básica que os autores propuseram foi produzir uma série de imagens artificiais com diferentes seeing e obter uma relação entre magnitude e seeing e assim garantir que todas as imagens estejam sob as mesmas condições, neste caso, levando todas as imagens para o pior seeing.

Inicialmente, usando a tarefa ARTDATA/MKOBJECTS do IRAF, criamos uma série de imagens sintéticas contendo uma estrela, um cometa (núcleo+coma) e coma sobre diferentes situações de seeing ao variar a PSF, como mostrando na Figura 3.4. Nela podemos notar a variação das aberturas pela largura meia altura da PSF, cada curva representa uma abertura, de baixo para cima com intervalos de 2 píxeis. É possível notar que a variação do Seeing é mais forte para aberturas pequenas. Nesta tarefa as imagens da estrela e núcleo tem mesma magnitude e o brilho é igual. Assim criamos uma amostra contendo 70 imagens, cuja única diferença entre elas é a variação do SEEING. Para tanto nós usando $1 \leq r \leq 4,4$ com intervalos entre 0,05 para a criação de uma imagem para outra e $\beta = 2,5$, onde: r é o raio de meia intensidade do eixo principal, dado em raio de seeing por escala de placa em píxel, e β é o parâmetro de modelo de uma função tipo *Moffat*.

Com a lista das imagens criadas e as respectivas posições dos objetos, utilizamos DIGIPHOT/APPHOT/FITPSF do IRAF para determinar o σ e assim calcular a PSF de cada fonte sintética e a seguir realizamos a fotometria de abertura. Em seguida, selecionamos algumas aberturas, conforme visto na Figura 3.4 e criamos uma relação para cada abertura adotada, capaz de corrigir os dados reais.

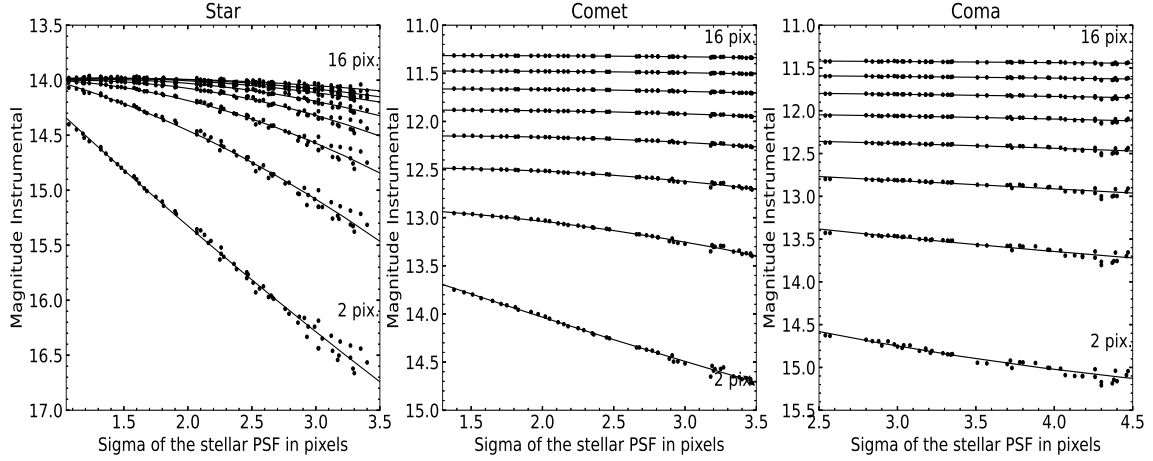


Figura 3.4: O gráfico das magnitudes para fontes sintéticas: estrela, cometa (núcleo+coma) e coma versus σ da PSF da imagem.

3.4 Cores

As cores por si só não fornecem tantas informações sobre as propriedades físicas dos núcleos cometários. Todavia, a distribuição das cores em comparação com os demais pequenos corpos do Sistema Solar e associada a outros parâmetros, tais como tamanho e as propriedades orbitais, conseguem inferir sobre a origem e os processos evolutivos e a ligação com seus reservatórios. Deste modo, correlações de cores e dinâmica podem, não apenas, inferir sobre composição, mas também dos processos dinâmicos que dispersaram o disco protoplanetário.

Antes, porém, de definirmos cores fotométricas e espectros fotométricos derivados dessas cores, vale ressaltar o papel fundamental da fotometria para inferir sobre as características superficiais não apenas dos cometas, mas do conjunto dos pequenos corpos do Sistema Solar. Através da fotometria, embora não seja, de fato, um estudo das características superficiais, como o que poderia ser feito através da espectroscopia, é possível realizar inferências quanto as características superficiais do corpo. Ademais, o custo benefício torna o estudo estatístico bastante eficiente.

Com a fotometria é possível obter a magnitude calibrada em diferentes filtros, e em diferentes regiões espectrais. Em geral, nós usamos as cores e com seus erros associados ($m_g - m_r$), ($m_r - m_i$) e ($m_i - m_z$).

Essas cores, são, a princípio, usadas para comparar com outras populações e traçar estudos estatísticos. Ademais, são usadas para derivar o espectro fotométrico. E para obter uma expressão para a reflectância normalizada, nós consideramos:

$$R_\lambda = \frac{10^{-0.4(m_c - m_\odot)}}{10^{-0.4(m_{ref} - m_\odot)}}, \quad (3.4)$$

onde o termo m_λ é a magnitude no filtro específico, m_{ref} é a magnitude no

filtro de referência que usamos para normalizar a reflectância, e m_{\odot} é a magnitude do Sol. No nosso caso usamos os filtros do Sistema SDSS, de modo que as cores solares são dadas por $m_{g_{\odot}} = 5,12 \pm 0,02$, $m_{r_{\odot}} = 4,68 \pm 0,03$, $m_{i_{\odot}} = 4,57 \pm 0,04$ e $m_{z_{\odot}} = 4,54 \pm 0,04$.

3.5 Gradiente espectral

Em termos gerais, o gradiente espectral é uma medida da cor do objeto. É, em primeira ordem, um parâmetro facilmente acessível quando se deseja comparar uma região espectral. Nós computamos a inclinação do espectro usando a definição por (Luu and Jewitt, 1990) como:

$$S' = \frac{dS}{d\lambda} \left(\frac{1}{S_{ref}} \right), \quad (3.5)$$

onde $dS/d\lambda$ é a taxa de variação da reflectância em uma faixa de comprimento de ondas (λ) e S_{ref} é a reflectância normalizada em um comprimento de onda de referência. Nós aplicamos um ajuste linear para computar a inclinação espectral.

3.6 Estimativa da produção de poeira ($Af\rho$)

O conceito de $Af\rho$ como medida da radiação solar refletida da poeira da coma cometária, foi inicialmente proposto por A'Hearn et al. (1984) quando estudaram a dinâmica das partículas da coma do cometa Bowell em sua primeira entrada no Sistema Solar interior. Os autores compararam medições sob diferentes circunstâncias geométricas, para ao fim, deduzir as medições contínuas para uma quantidade de $Af\rho$, sendo essa quantidade o produto do albedo A , do fator de preenchimento (f) dentro do campo de visão e o raio linear (ρ) do campo de visão do cometa. Esse albedo foi definido como o albedo de espalhamento simples das partículas, ou seja, a razão entre a luz total refletida pelas partículas e a luz total removida do fluxo solar pelas partículas cometárias

Entretanto, Fink and Rubin 2012 mostraram a partir de processos de espalhamento simples que o termo (A) descrito no artigo original deveria ser substituído pela eficiência de espalhamento de uma partícula multiplicado por sua função de fase. E apesar, desse problema na definição, nós seguiremos usando essa mesma notação A para representar essa quantidade de medida.

O conceito de $Af\rho$ é extremamente útil, mas apresenta algumas limitações. Requer simetria da coma, ou seja, é assumido não haver produção ou destruição de poeira depois que é ejetada do núcleo e que a poeira tem velocidade constante. A partir dessa consideração, o cálculo de $Af\rho$ torna-se falho na região próxima à

superfície do cometa, entre 1 e 20km ou mais, uma vez que a poeira ainda está acoplada ao gás e a poeira ainda não atingiu a velocidade terminal. Também falhará a distâncias muito grande, da ordem de 10^5 km, onde a energia de radiação empurra a poeira (conhecida como cauda cometária). Por fim, também não será representativa se houver jatos de material, o que tornaria a coma assimétrica. Ainda assim, o $Af\rho$ é bastante usado e fornece uma descrição das medidas de poeira no interior da coma, fornecendo uma estimativa da produção de poeira (essa produção de poeira está associada ao grau de atividade do cometa).

Para entendermos melhor essa estimativa do parâmetro de $Af\rho$, considere que um cometa tenha uma taxa de produção de poeira Q (partículas/tempo), ou seja, o Q indica a frequência de perda de grãos. Considere ainda grãos com raio a . Os grãos têm movimento radial a partir do núcleo com velocidade ν . De modo que a densidade dos grãos n em função da distância cometocêntrica r pode expressa como:

$$n(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 \nu}. \quad (3.6)$$

Para determinar a densidade de uma coluna de grãos N através da linha de visada, teremos uma integral de linha de n ao longo dessa linha de visada, integrando sobre a coordena l :

$$N = \int n(r) dl = \frac{Q}{4\pi\nu} \int \frac{dl}{r^2}, \quad (3.7)$$

onde $l = \sqrt{r^2 - \rho^2}$ e ρ é a distância cometocêntrica projetada. De modo que, resolvendo a integral teremos:

$$N(\rho) = \frac{Q}{4\nu\rho}. \quad (3.8)$$

Supondo que a fotometria de abertura foi realizada centrando no optocentro do cometa e considerando N número de grãos dentro da abertura adotada e ρ_0 e ρ os intervalos de distâncias inicial e final, teremos ainda que:

$$N(\rho_0) = \int N(\rho) 2\pi\rho d\rho. \quad (3.9)$$

Esta é apenas uma integral sobre a área da abertura. Então teremos:

$$N(\rho_0) = \frac{Q\pi\rho_0}{2\nu}. \quad (3.10)$$

Sabendo que N é adimensional. E é apenas um número de grãos.

Daí surge uma questão, relacionada enquanto ao fluxo proveniente desses grãos (N). Podemos, então, padronizar essa medida deixando o espectro solar a 1 unidade astronômica, ou seja $F_0(\lambda)$. Como o espectro solar é uma função do comprimento

de onda (λ), para distâncias heliocêntricas r_h quaisquer, o fluxo solar F pode ser escalonado:

$$F(\lambda) = \frac{F_0(\lambda)}{(r_h/1ua)^2}. \quad (3.11)$$

Na prática, as observações fotométricas são feitas usando filtros fotométricos, a alternativa é usar os comprimentos de onda central de cada de filtro para compará-lo com o fluxo solar no mesmo comprimento de onda. Para essa estimativa, o ideal é usar uma banda intermediária ou larga, pois é necessário garantir que a região adotada é estrita para estudar linhas específicas.

Considerando a fotometria de abertura, o fluxo solar atinge os grãos contidos na abertura, e a seção transversal total dos grãos pode ser expressa como: $N\pi a^2$. Deste modo, os grãos refletem um pouco dessa luz em direção ao observador (dependendo do Albedo). Como o observador está uma distância Δ do cometa, para o caso dos telescópios terrestres, então o fluxo F que será capturado pelos detectores dentro de cada abertura adotada é:

$$\mathcal{F} = \frac{FN\pi a^2 A}{4\pi\Delta^2}. \quad (3.12)$$

Simplificando a expressão podemos ter \mathcal{F} em termos de número de grãos ou da produção de grãos de poeira:

$$\mathcal{F} = F_0 \frac{1}{4} \frac{1}{\Delta^2} \frac{1}{(r_h/1ua)^2} ANa^2 = F_0 \frac{\pi}{8} \frac{1}{\Delta^2} \frac{1}{(r_h/1ua)^2} A \frac{Q\rho}{\nu} a^2. \quad (3.13)$$

3.6.1 Luz refletida em termos da perda massa

Até aqui nós temos uma relação entre a produção de poeira e o fluxo medido pelos detectores nas aberturas adotadas (Equação: 3.13). Como queremos ter uma taxa para a perda de massa, M , faremos o uso do fator:

$$M = Q \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_d, \quad (3.14)$$

onde ρ_d é o volume de densidade dos grãos.

Essencialmente, isso é apenas descobrir quanto de massa existe em um grão, e a seguir multiplicá-lo pelo número de grãos por segundo que são perdidos.

$$\mathcal{F} = F_0 \frac{3}{32} \frac{1}{\Delta^2} \frac{1}{(r_h/1ua)^2} A \frac{M\rho}{\nu\rho_d a}. \quad (3.15)$$

3.6.2 Fator de preenchimento

Das equações (3.13) e (3.15) temos o fluxo em termos de algumas outras quantidades desconhecidas. Isto motiva agruparmos algumas dessas quantidades em apenas um termo observável. Assim podemos ter um fator de preenchimento, f , como sendo a fração coberta dentro da abertura, então teremos que:

$$f = \frac{N\pi a^2}{\pi\rho^2} = \frac{Na^2}{\rho^2}. \quad (3.16)$$

De modo que, (com a equação 3.10)

$$f = \frac{Q\pi a^2}{2\nu\rho}. \quad (3.17)$$

Multiplicando ambos os termos por $A\rho$, teremos:

$$Af\rho = \frac{Q\pi a^2 A}{2\nu}. \quad (3.18)$$

Um ponto que merece destaque é que esta representação de $Af\rho$ é independente e incorpora medidas geralmente desconhecidas como a velocidade de grão, albedo de grão e taxa de produção de grãos de poeira.

Usando a equação da perda de massa (3.14), teremos a expressão do $Af\rho$ em termos da perda de massa.

$$Af\rho = \frac{3MA}{8a\rho_d\nu}. \quad (3.19)$$

3.6.3 Observando Fluxo e $Af\rho$

A partir das equações 3.13 e equação 3.18, tem-se que:

$$\mathcal{F} = \frac{F_0\rho}{4\Delta^2(r_h/(1ua))^2} Af\rho. \quad (3.20)$$

Esta expressão tem relação com o que é observado (\mathcal{F}), alguns fatores conhecidos e o $Af\rho$. É a expressão usual para o $Af\rho$:

$$Af\rho = \frac{\mathcal{F}}{F_0} \frac{4\Delta^2}{\rho} \left(\frac{r_h}{1ua} \right)^2. \quad (3.21)$$

3.6.4 Magnitude observada e $Af\rho$

Considere m_c , a magnitude do cometa que corresponde ao fluxo \mathcal{F} em uma abertura e filtro específico, temos que a magnitude é expressa por:

$$m_c = -2.5 \log \left(\frac{\mathcal{F}}{F_{zp}} \right), \quad (3.22)$$

onde F_{zp} é o ponto zero do sistema de magnitude usado. Essa mesma equação para a magnitude do cometa pode ser expressa para o Sol no mesmo sistema de magnitude, por:

$$m_{\odot} = -2.5 \log \left(\frac{F_0}{F_{zp}} \right). \quad (3.23)$$

Combinando essas duas equações, teremos que:

$$\frac{\mathcal{F}}{F_0} = 10^{-0.4(m_c - m_{\odot})}. \quad (3.24)$$

Combinando as equações 3.21 e 3.24, teremos que a expressão para $Af\rho$ pode ser escrita em termos da magnitude, como:

$$Af\rho = 10^{-0.4(m_c - m_{\odot})} \frac{4\Delta^2}{\rho} \frac{r_h}{(1ua)^2}. \quad (3.25)$$

Considerando ρ como $\rho = \theta_r \Delta$, Como ρ é uma medida angular, ρ é uma medida que é frequentemente obtido como uma medida angular, precisando realizar as transformações de unidades convenientes. Sabendo que $\rho = \theta_r \Delta$, com θ_r o raio de abertura (radiano). De modo que podemos reescrever a equação 3.25 como:

$$Af\rho = 10^{-0.4(m_c - m_{\odot})} \frac{4\Delta}{\theta_r} \frac{r_h}{(1ua)^2}. \quad (3.26)$$

Normalmente as medidas de $Af\rho$ são expressas em cm. Então, usando a definição adotada em 2012 na Assembleia Geral da *International Astronomical Union (IAU)*, temos a distância Terra-Sol $\Delta_{cm} = 1.495978707 * 10^{13}$ e transformando radiano para segundos de arco (medida geralmente adotada na fotometria por abertura), podemos chegar a uma expressão que pode ser facilmente usada quando queremos estimar a produção de poeira cometária.

$$Af\rho_{cm} = 10^{-0.4(m_c - m_{\odot})} \frac{\Delta_{ua}}{\theta_{sa}} \left(\frac{r_h}{(1ua)} \right)^2 1,2342710326 \times 10^{19}, \quad (3.27)$$

onde m_c é a magnitude do cometa. m_{\odot} é a magnitude visual do Sol, θ_{sa} é a abertura fotométrica em segundos de arco, Δ_{ua} é distância Terra-Cometa em unidades astronômicas, r_h é a distância Sol-Cometa.

Capítulo 4

Um estudo sobre as propriedades físicas do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS)

Neste capítulo, nós abordaremos e discutiremos alguns dos resultados obtidos a partir de dados fotométricos e espectroscópicos observados a partir do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI), do *Southern Astrophysical Research (SOAR)* e de dados disponibilizados a partir de campanhas de levantamento de dados como o *Dark Energy Survey (DES)*.

Nas linhas seguintes focaremos nossa atenção na caracterização do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS), bem como na comparação com população de cometas e com outras populações de pequenos corpos. Conforme dito anteriormente, os cometas, especialmente, àqueles que apresentam valores de excentricidade $e > 1$, ou seja, os cometas hiperbólicos, são substancialmente fascinantes tanto do ponto de vista dinâmico quanto do ponto de vista físico e químico. Tais objetos podem ter sofrido algum tipo de perturbação a ponto de tornar suas órbitas hiperbólicas, podem ter vindo de fora do sistema solar, ou ainda, em alguns casos, é possível que a sua cobertura observacional tenha sido insuficiente para a real integração da órbita. Ademais, a escolha desse objeto, em especial, deu-se primariamente por ser um potencial candidato a Cometa tipo Manx, uma vez que foi inicialmente classificado como asteroide hiperbólico. Por esse motivo foi proposto um projeto de observação a partir do SOAR para uma caracterização física e paralelamente um estudo dinâmico seria feito por nossos colaboradores.

4.1 Um estudo sobre as propriedades físicas do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS)

O cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) foi descoberto em outubro de 2017 através do levantamento de dados *Panoramic Survey Telescope at Haleakala* quando distava 7,8 unidades astronômicas do Sol e foi inicialmente observado com um formato asteroidal (sem coma detectada), por esse motivo o cometa foi inicialmente classificado como asteroide hiperbólico (com um prefixo A/, sucedido com o ano e quinzena da descoberta) (Bressi et al., 2018). Posteriormente foi detectada coma, e então, reclassificado como cometa hiperbólico e o prefixo A/ foi então substituído por C/ seguido do ano da descoberta mais a quinzena, número de ordem da descoberta na respectiva quinzena seguido do nome do descobridor, neste caso, C/2017 U7 (PANSTARRS).

Os dados doravante descritos para o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) foram obtidos através de dois projetos observacionais submetidos, aprovados e executados no telescópio SOAR de 4,1 metros, cujo título da proposta foi *Investigating the nature of the hyperbolic asteroid A/2017 U7* (PI: Mário De Prá) submetido para a proposta observacional no semestre 2018B para 5 horas de observação usando espectrógrafo Goodman no modo espectroscopia acoplado com uma câmera vermelha para obtenção de espectro de baixa resolução na região de $0.5 - 0.9\mu m$. Nesta primeira proposta, o objetivo principal foi a caracterização de um possível Cometa Manx. Durante as observações foi detectado atividade, e isto serviu de motivação para uma nova proposta com o intuito de estudar como essa atividade evoluiria. Por isso foi proposto a submissão da proposta *Investigating the nature of the hyperbolic comet C/2017 U7* (PI: Jorge Carvano) para o semestre 2019B, novamente usando o espectrógrafo Goodman, porém no modo imageamento e com a câmera vermelha com os filtros do Sistema SDSS nas bandas g, r, i, z . E foi a partir dessas duas propostas que iniciamos o intento deste estudo. Ademais, durante nossa investigação, nós usamos dados públicos do levantamento *Dark Energy Survey* Flaugher et al. (2015) para complementar a análise. Tais análises foram feitas e publicadas em Evangelista-Santana et al. (2022).

Além desse conjunto de dados, nós realizamos observações fotométricas a partir do OASI para, ao fim, agrupar com os dados anteriormente citados. Dispondo, assim, de uma cobertura observacional ao longo de 4 anos, e em observações em torno do periélio. Um resumo das circunstâncias observacionais são mostradas na Tabela 4.1.

Sítio	Data	Filtros/espectro	$\Delta_{(ua)}$	$r_{sol(ua)}$	$\alpha(^{\circ})$
DES	2017 – 10 – 30	i, z	7,274	7,857	6,1
DES	2017 – 11 – 10	g, r	7,355	7,817	6,0
DES	2018 – 09 – 15	r	6,094	6,862	5,7
SOAR	2018 – 08 – 13	espectro (0,5-0,9 μm)	6,162	6,943	5,6
SOAR	2019 – 09 – 18	g,r,i,z	5,887	6,417	8
OASI	2020 – 06 – 25	g,r,i,z	5,714	6,707	2
OASI	2020 – 10 – 21	g,r,i,z	7,401	6,977	7,2
OASI	2020 – 10 – 23	g,r,i	7,438	6,981	7,0

Tabela 4.1: Circunstâncias observacionais para o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS). Em que são apresentados inicialmente o *survey* ou observatório de onde foram realizadas as observações, seguidos das datas, dos filtros usados para a fotometria e a região espectral quando para o caso dos espectros, por fim $\Delta_{(ua)}$, $r_{sol(ua)}$, $\alpha(^{\circ})$, distâncias Terra-cometa, Sol-cometa e ângulo de fase observacional, respectivamente.

4.1.1 Sobre a dinâmica

O cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) possui órbita com excentricidade > 1 ($e = 1,00159$)¹, portanto classificado com um cometa em órbita hiperbólica. Além disso, tem uma distância de periélio, $q = 6,417$ ua e inclinação, $i = 142,6^{\circ}$, um resumo das propriedades orbitais são mostradas na Tabela 4.2. A distribuição das observações estão dispostas entre um período de pré e pós-periélio conforme são mostradas na Figura 4.1. Essa figura destaca, em um dos focos da elipse, um ponto amarelo representando o Sol, seguido das órbitas da Terra (em azul) e de Júpiter (em laranja) e na parte mais externa a órbita computada de agosto de 2017 a janeiro de 2021. Nos pontos em vermelho, sobre a órbita do cometa, estão os pontos das observações analisadas nesta seção.

Parâmetros Orbitais	Dist. Heliocêntrica	Dist. Baricêntrica
Distância de Perie., q (ua)	$= 6,417304 \pm 0,000008$	6,409861
Excentr., e	$= 1,000991 \pm 0,000009$	0,998413
Inclin., i ($^{\circ}$)	$= 142,63527 \pm 0,00002$	142,65424

Tabela 4.2: Parametros orbitais do cometa hiperbólico C/2021 O3 (PANSTARRS). Tempo de periélio em 21 de outubro de 2019.

Um estudo dinâmico sobre o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) realizado pelos colaboradores da Universidad Complutense de Madrid mostrou que quanto a órbita atual, o cometa está ligado ao Sistema Solar. Por outro lado, em 18 de maio de 2020 o cometa experimentou uma aproximação com o planeta Júpiter, a

¹Data:2022-10-10:<https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdblookup.html/?sstr=C%2F2017%20U7>

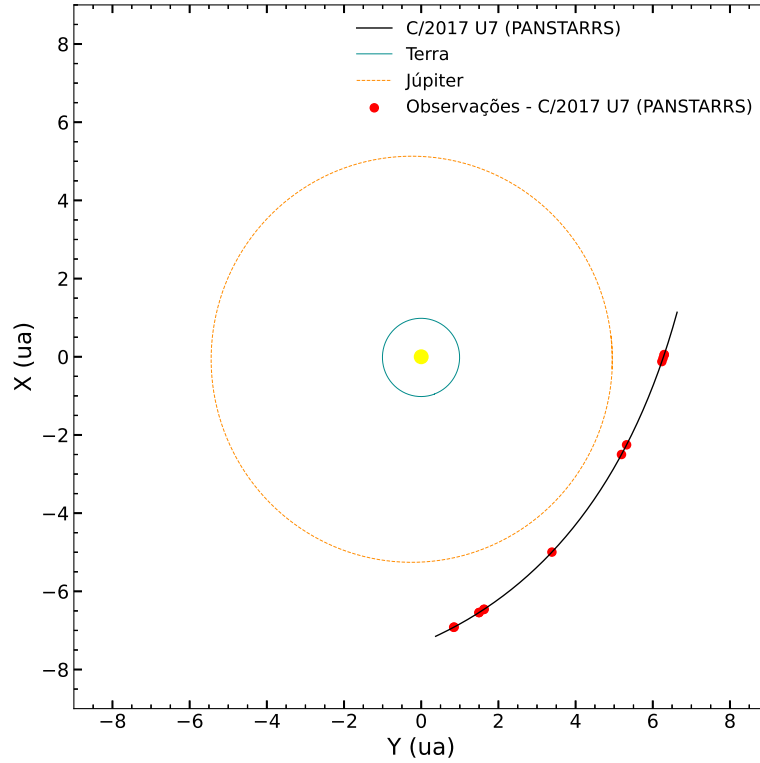


Figura 4.1: Órbita do C/2017 U7 (PANSTARRS) com destaque para as observações analisadas neste trabalho.

1,66 unidades astronômicas. Durante essa aproximação o cometa experimentou uma velocidade próxima de 28 km/s, e essa velocidade pode ter efeitos de longo prazo. Para a investigação do passado orbital, usando um intervalo entre -3 e +3 Milhões de anos, o cometa experimentou por uma evolução caótica e uma interpretação mais direta mostra que o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) é um objeto dinamicamente antigo, com uma provável origem no Sistema Solar. Essa conclusão também foi encontrada por (Hui, 2018), usando uma das primeiras determinações de órbita do cometa (4 de março de 2018). Já o futuro orbital, após a aproximação com Júpiter em 18 de maio de 2020, o cometa parece ter recebido um impulso suficiente para deixar o Sistema Solar durante os próximos 3 milhões de anos. As simulações realizadas por (Hui, 2018) com uma determinação de órbita baseada em 87 observações abrangendo um arco de dados de 176 dias, indicaram que este cometa tem 60% de chance de escapar do Sistema Solar durante os próximos 1,5 milhões de anos após sua passagem pelo periélio. Este resultado é consistente com o estudo realizado por nossos colaboradores baseado em uma melhor determinação da órbita.

4.1.2 Evolução da coma

Para estudar a evolução da coma ao longo das nossas observações, nós realizamos um estudo do perfil radial do cometa e comparamos com o perfil de um grupo de

estrelas das imagens. Com essa comparação é possível separar objetos pontuais (estrelas e com boa aproximação os asteroides) daquele em que a luz é difusa (cometas e galaxias). Nós comparamos diretamente os perfis de um grupo de estrelas com o cometa seguindo a metodologia descrita por Luu and Jewitt (1992) largamente adotada em diversos estudos como forma de diferenciar cometas de asteroides e estudar a evolução temporal da coma. Nós usamos a tarefa PRADPROF do IRAF para obter os perfis de um conjunto de estrelas (geralmente maior que sete estrelas, mas não é regra essa quantidade, e é importante destacar que a quantidade deve ser grande o suficiente para representar o perfil das estrelas do campo). O PRADPROF calcula o perfil radial em píxeis com um raio específico e em intervalo de azimute que pode ser ajustável, isso é útil no caso de cometa porque é possível estudar direções específicas da fonte. Os limites adotados em azimutes podem ser múltiplos de 360° incluindo valores negativos, ou seja, voltas completas. Os arquivos de saída dessa tarefa são normalizados e ajustados usando uma função *Moffat* implementada na biblioteca Astropy (Astropy Collaboration et al., 2013).

A Figura 4.2 mostra a evolução temporal da coma ao em 2017, usando os dados públicos do *DES*, no qual não detectamos atividade cometária, seguido do perfil obtido em agosto, também usando dados do *DES* para o perfil radial em 2018, este apresenta uma clara distinção entre o perfil estelar e o perfil cometário, enquanto o perfil mostrado para o ano de 2019, obtido através do telescópio SOAR, mostra uma coma altamente evoluída.

4.1.3 Estimativa do núcleo do cometa

Para estimar o diâmetro do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS), inicialmente calculamos a magnitude na banda V do sistema *Johnson*. Como nossos dados foram obtidos no sistema de filtros SDSS, nós usamos a relação $V_0 = r + 0.44(g - r) - 0.02$ descrita por Jurić et al. (2002) para transformar as magnitudes calibradas obtidas nos filtros g e r do sistema SDSS para o filtro V do sistema *Johnson* e a seguir calculamos a magnitude absoluta através da equação:

$$H = V(r, \Delta, \alpha) - 5 \log_{10}(r_h \Delta) - \beta \alpha, \quad (4.1)$$

onde r_h é a distância heliocêntrica, Δ é a distância geocêntrica, α é o ângulo de fase Sol-objeto-observador, e β é o coeficiente de fase. Como o cometa tem pequenas variações de ângulos de fase, nós assumimos $\beta = 0,11 \text{mag/grau}$, um valor típico para objetos transnetunianos, conforme descrito em Alvarez-Candal et al. (2016).

Com a magnitude absoluta é possível estimar o diâmetro através da equação:

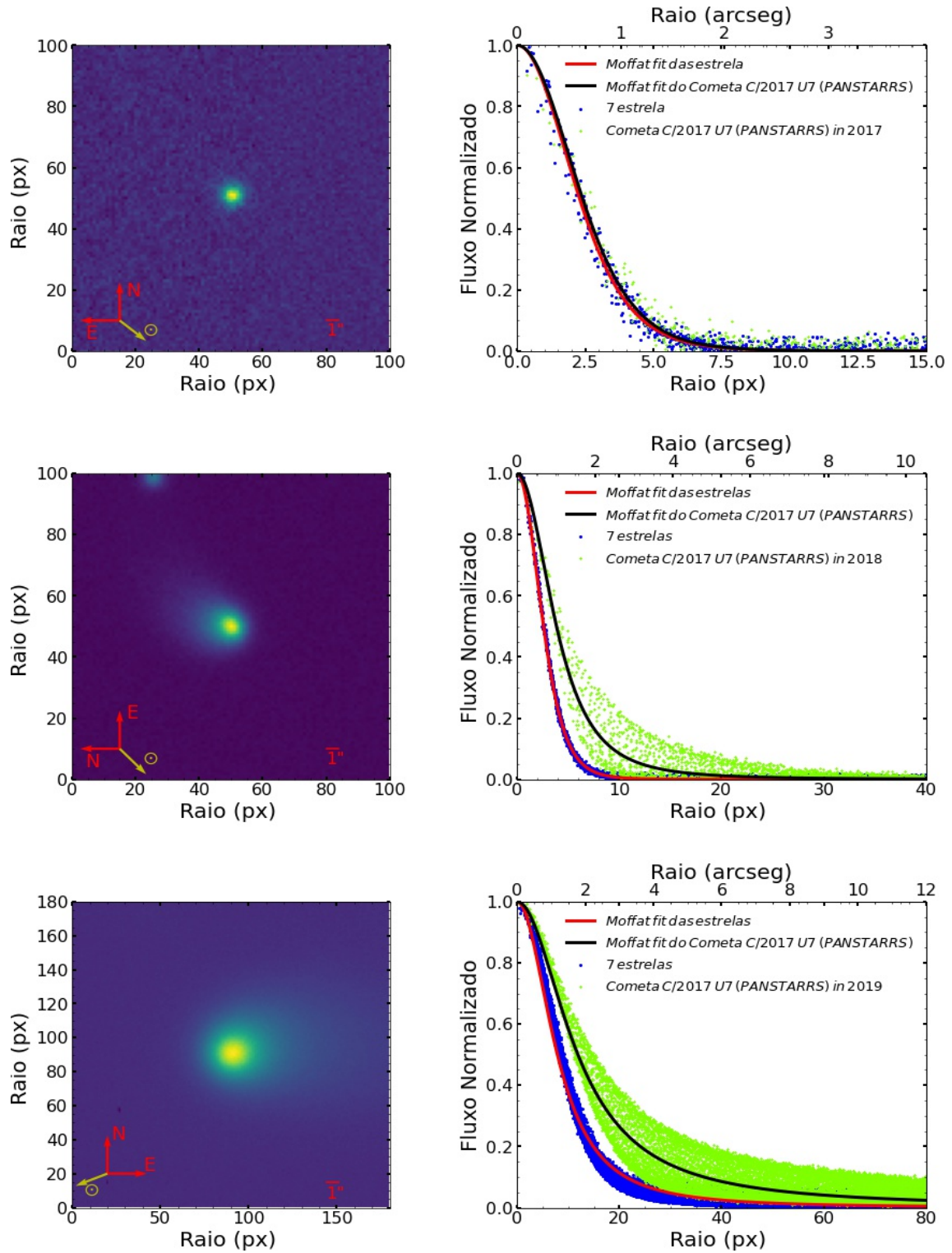


Figura 4.2: Perfil radial de um grupo de estrela comparando com o cometa

$$D[km] = \frac{1,342 \cdot 10^3}{\sqrt{pv}} 10^{-0,2(H)}, \quad (4.2)$$

onde: H é a magnitude absoluta do cometa; pv é o albedo geométrico. Por fins

práticos adotamos um albedo típico para cometas ($p_v=0,04$).

Consideramos os dados de pré-descoberta obtidos a partir do *DES* como sendo representativos do núcleo, uma vez que em tais observações o cometa ainda estava com formato asteroidal ou que não conseguimos detectar atividade, nós estimamos a magnitude do núcleo e um limite superior do cometa. Nós estimamos uma magnitude absoluta $H = 10.87 \pm 0.06$ mag e considerando o valor de albedo típico para cometas Fernández et al. (2013) nós estimamos um limite superior de aproximadamente 45 km de diâmetro.

4.1.4 Produção de poeira, $Af\rho$

Além da avaliação pelo perfil radial, que mostra a evolução temporal da coma cometária, o parâmetro $Af\rho$, embora com algumas restrições, em especial para regiões fechada no núcleo e para grandes distâncias, fornece informações importantes quanto a produção de poeira do cometa, ou seja, sua atividade. Esse parâmetro foi inicialmente proposto por A'Hearn et al. (1984) e nós descrevemos na Seção 3.6 deste trabalho. Esse parâmetro independe do tamanho da abertura, e mesmo não sendo exato é adotado uma coma estacionária.

Comumente, muitos autores adotam uma distância de 10000 km a partir do optocentro. Na Figura 4.3 e na Tabela 4.3 são mostradas a evolução da atividade através da produção de poeira ao longo dos anos de observação e nos diferentes filtros. Nossos resultados sugerem que a atividade pode ter começado um pouco antes das nossas observações de 2018 a partir do SOAR, quando o cometa estava a aproximadamente 6,93 unidades astronômicas do Sol. Nas observações seguintes o cometa passou por um significativo incremento na produção de poeira, $Af\rho = 1662\text{cm}$ a 6,827 unidades astronômicas a partir dos dados obtidos em 2018-09-15, e conforme visto na Tabela 4.3 o incremento da atividade é percebido mesmo depois da passagem do periélio.

Portanto, a atividade cometária antes do periélio e às taxas de produção de poeira aumentaram à medida que o cometa se aproximava de seu periélio. E o fato de a atividade ter começado próximo a 7 unidades astronômicas sugere que o principal mecanismo responsável pela produção de poeira é a transição de gelo de água amorfo a cristalino, e os valores medidos de $Af\rho$ são consistentes com os valores relatados para outros cometas que se tornaram ativos em grandes distâncias de periélio (Meech et al., 2009)

4.1.5 Cores e propriedades espectrais

A principal fonte de informação sobre a comportamento espectral do cometa é o espectro de baixa resolução obtido em 13 de agosto de 2018, onde o espectro

Data	Filtro	$r_{sol(ua)}$	$Af\rho$ (cm) ($\rho = 10^4$ km)	$Af\rho_{max}$	ρ_{max} (km)
2018-09-15	banda r	7,857	1607	1662	14320
2019-09-09	banda g	7,817	2509	2555	12815
2019-09-09	banda r	6,862	2398	2331	12174
2019-09-09	banda i	6,417	2716	2724	10893
2019-09-09	banda z	6,707	2686	2691	10893
2020-06-25	banda r	6,977	3037	3100	13503
2020-10-23	banda r	6,981	2085	2271	18503

Tabela 4.3: Valores do $Af\rho$ para o cometa C 2017 U7 (PANSTARRS), derivados a partir do filtro na banda r do sistema SDSS. .

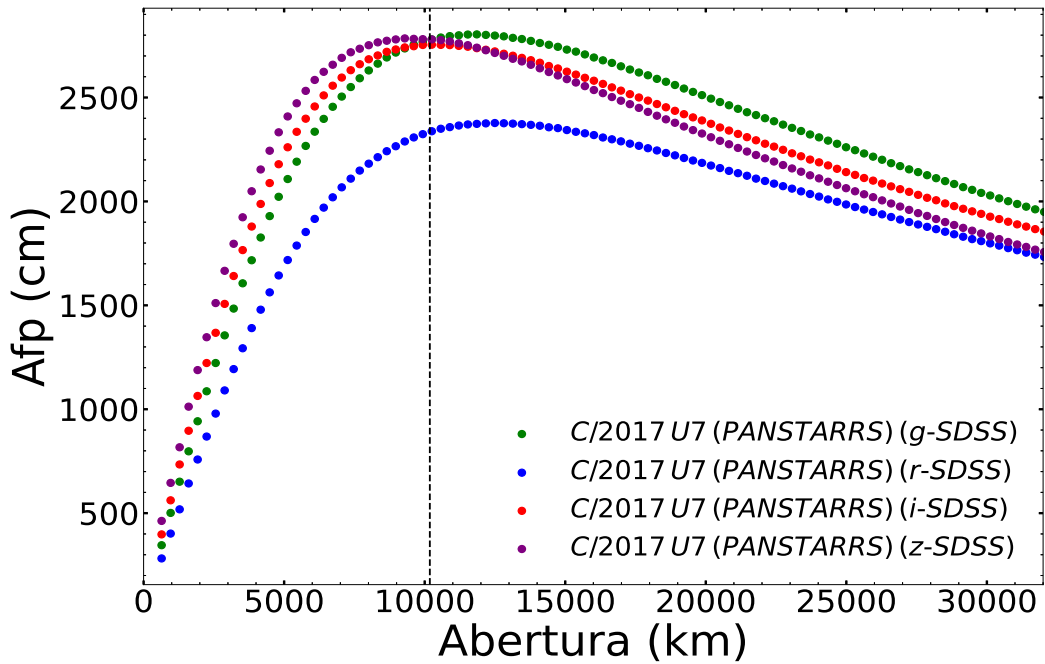


Figura 4.3: $Af\rho$ em relação à distância cometocêntrica para o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) nos filtros g , r , r e i do sistema SDSS para observações obtidas em setembro de 2019. A Figura mostra uma linha tracejada que representa o tamanho da HWMN.

apresentou uma forma atípica ao que é comumente esperado de cometas. Além do espectro, dados obtidos a partir da fotometria nas bandas g , r , i , z do sistema SDSS, foram usados para calcular as cores e a partir das cores foi derivado o espectro fotométrico, que assim como na espectroscopia, mostrou a forma peculiar. Vale ressaltar que o intervalo de observação entre um filtro e outro é da ordem de 5 minutos, portanto, não é severamente influenciado por variações temporais na coma. Ademais, nós realizamos a convolução das imagens para mitigar os efeitos de seeing, conforme definido na metodologia para a correção do seeing.

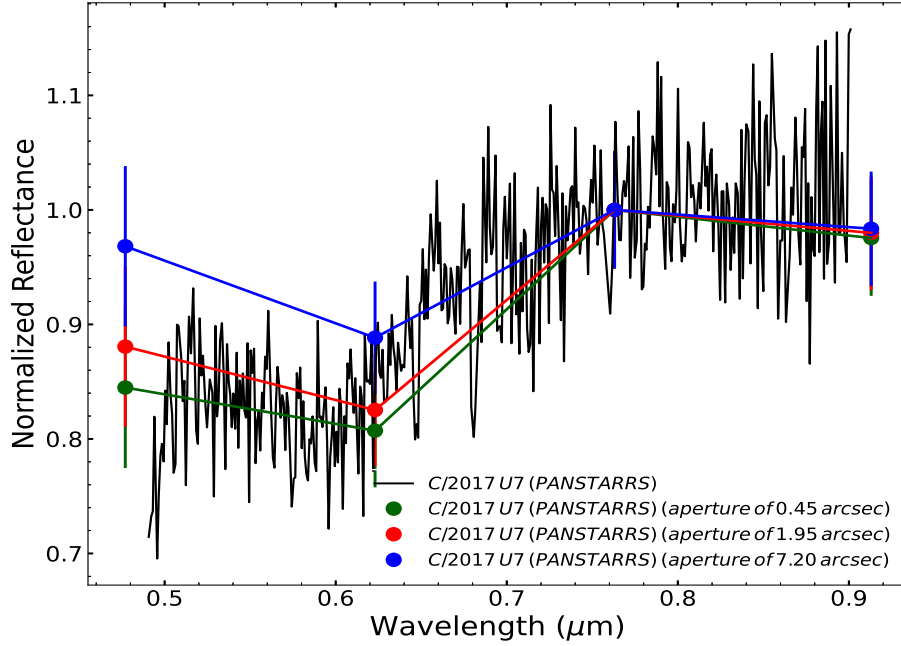


Figura 4.4: Espectro de baixa resolução do cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) e comparações com espectro fotométrico derivados a partir das cores obtidas com os filtros do sistema SDSS. Espectro foi obtido em 2018 e as cores foram obtidas em 2019, ambos a partir do SOAR.

A Figura 4.4 mostra o espectro de baixa resolução obtido em 2018 sobreposto com os espectros fotométricos derivados a partir de dados fotométricos nos filtros do sistema SDSS (g, r, i, z). Devido à presença dessa banda, nós optamos por normalizar os espectros para $0,748\mu\text{m}$, esse valor corresponde ao comprimento de onda central da banda *i* do filtro do sistema SDSS. Ademais nós usamos três aberturas distintas, a saber: 0,45, 1,95 e 7,2 segundos de arco. A análise do espectro mostrou uma característica peculiar, a presença de uma banda de absorção centrada em $\sim 0,596\mu\text{m}$ incomum nos espectros de cometas e asteroides. Nós utilizamos a ferramenta CANA (De Pra et al., 2018a) para caracterizar a banda atípica em torno de $\sim 0,596\mu\text{m}$ e sua profundidade de $7,7\% \pm 0,5\%$. Como visto, essa banda está presente tanto nos dados espectroscópicos obtidos em 2018, quanto no espectro fotométrico obtido em 2019, sendo que o espectro fotométrico que melhor reproduz a banda é o obtido com 1,95 segundos de arco.

A partir dessa característica atípica, nós usamos as magnitudes obtidas com a abertura de 1,95 segundos de arco do cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) e comparamos as cores com as de outras populações de pequenos corpos. Na Figura 4.5 são mostradas as comparações com cores de cometas ativos obtidos a partir da campa-

nha *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)* (Solontoi et al., 2012), com Centauros (Ofek, 2012; Peixinho et al., 2015) e Objetos trans-Netunianos ou TNOs (Terai et al., 2018). Entretanto, como as observações reportadas por Peixinho et al. (2015) foram obtidas com os filtros *BVRI* do sistema Johnson-Cousins, antes de serem plotadas na figura foi a transformação dos dados para o sistema SDSS. Como pode ser visto na figura, o cometa possui cores incomuns quando comparado com outros cometas e também com os Centauros, tendo alguma sobreposição apenas com alguns objetos pertencentes a população de TNOs e Centauros. A principal diferença entre este cometa e outros objetos é devido às suas cores $i - z$ e $g - r$ que também eram peculiares nas observações obtidas a partir da campanha DES em 30 de outubro de 2017 e 10 de novembro do 2017, quando não houve coma perceptível.

Nós usamos as cores dessas populações de pequenos corpos e derivamos os espectros fotométricos a partir da Equação 3.4 para verificar e comparar com os espectros fotométricos de cometas (Solontoi et al., 2012), conforme mostrado na Figura 4.6 e com alguns membros de TNOs e Centauros conforme mostrado na Figura 4.7. Novamente, alguma semelhança é vista apenas com alguns membros de TNOs e Centauros. Desde modo, nós notamos que o cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANS-TARRS) apresenta característica atípica quando comparado com maioria dos outros cometas em relação às cores $g - r$: as observações do núcleo têm valores de $g - r$ menores do que o observado para cometas e centauros, e o valor desta cor observado com a presença do coma é ainda menor. Em ambas as observações essas cores são compatíveis com alguns membros dos TNOs e Centauros. Isto é reafirmado no espectro de baixa resolução e a espectrofotometria no sistema SDSS, obtidos quando o cometa estava ativo, mostram a presença de uma grande característica espectral semelhante a uma banda de absorção centrada em torno de $0,595\mu\text{m}$, que novamente é apenas semelhante aos espectros obtidos das cores do SDSS de alguns TNOs. A cor $g - r$ do núcleo também é peculiar, sugere que esse banda é possivelmente relacionada com a composição do material da poeira, em vez do que um produto da distribuição de tamanho da poeira na coma, e os valores mais baixos de $Af\rho$ obtidos no filtro r podem estar relacionados ao albedo mais baixo da poeira na faixa espectral correspondente.

Os dados obtidos sugerem, ainda, que a banda atípica é característica do material do núcleo. Na tentativa de identificar materiais que pudesse reproduzir um espectro similar, nós usamos espectros da biblioteca RELAB (2019) (acesso em dezembro de 2019). Nós usamos um total de 8962 espectros cobrindo a região de pelo menos a faixa de $0,5$ e $0,8\mu\text{m}$ com o intuito de buscar alguma similaridade na região em torno de $0,595\mu\text{m}$.

Os espectros com característica centrada em torno de $0,595\mu\text{m}$ foram comparados visualmente com o espectro do cometa. Este exercício de correspondência

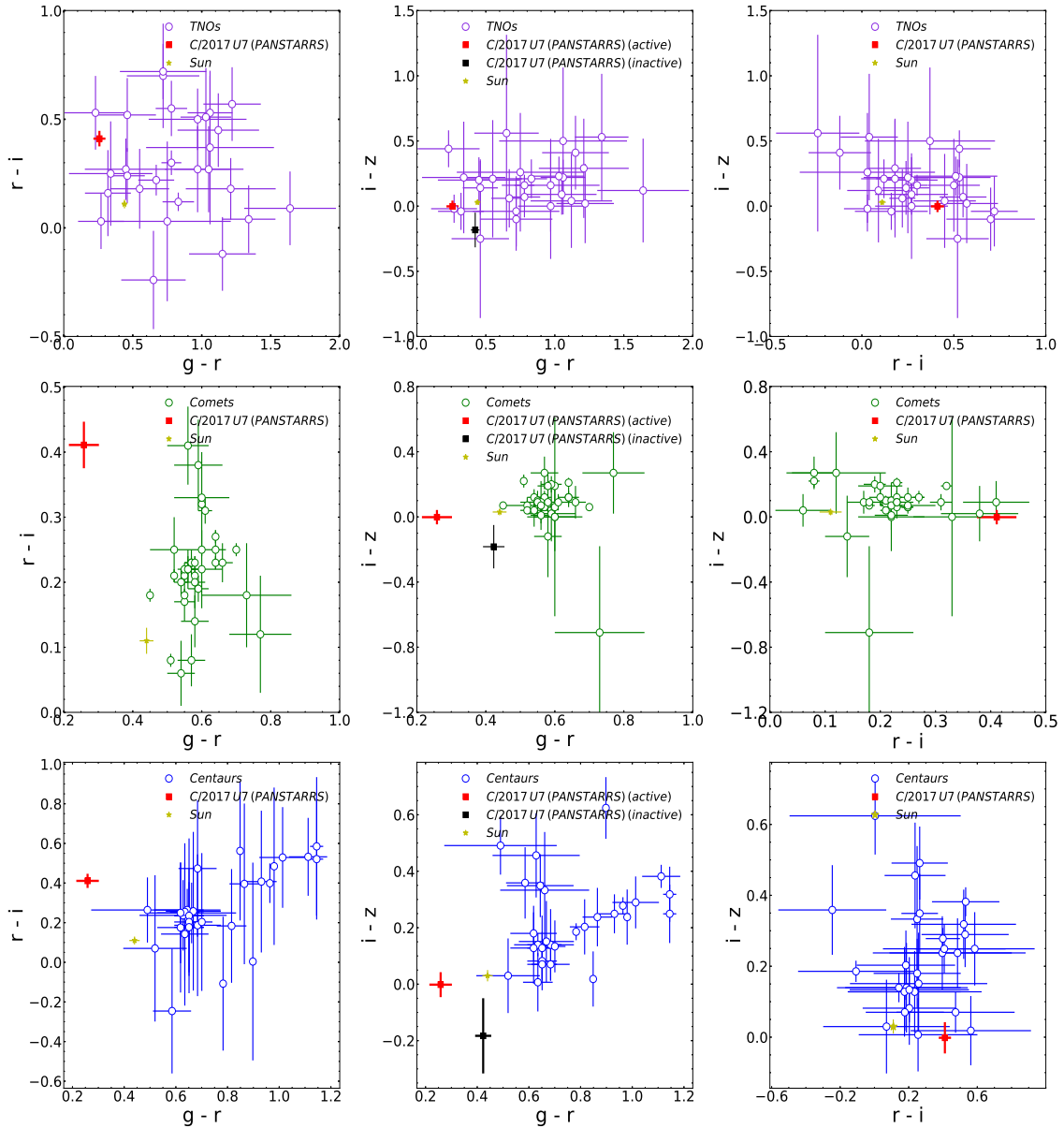


Figura 4.5: Diagramas cor-cor para as diferentes populações de corpos menores mostrando a cor do C/2017 U7 (PANSTARRS) inativo (obtido do DES) e ativo (obtido do SOAR). Os dados sobre a população de cometas são de (Solontoi et al., 2012), a população de Centauros (Ofek, 2012; Peixinho et al., 2015) e Objetos transnetunianos ou TNOs (Terai et al., 2018).

de curvas tem uma capacidade limitada como diagnóstico da composição, uma vez que os espectros medidos também são afetados pelo tamanho de grão, textura da amostra e geometria experimental. No entanto, permite identificar possíveis candidatos. Em geral, as bandas detectadas nos espectros RELAB, ou eram muito rasas, ou muito profundas em comparação com a característica observada no espectro do cometa, ou estavam presentes ao lado de outras características espectrais não vistas no espectro do cometa. A Figura 4.8 mostra as comparações do espectro do cometa

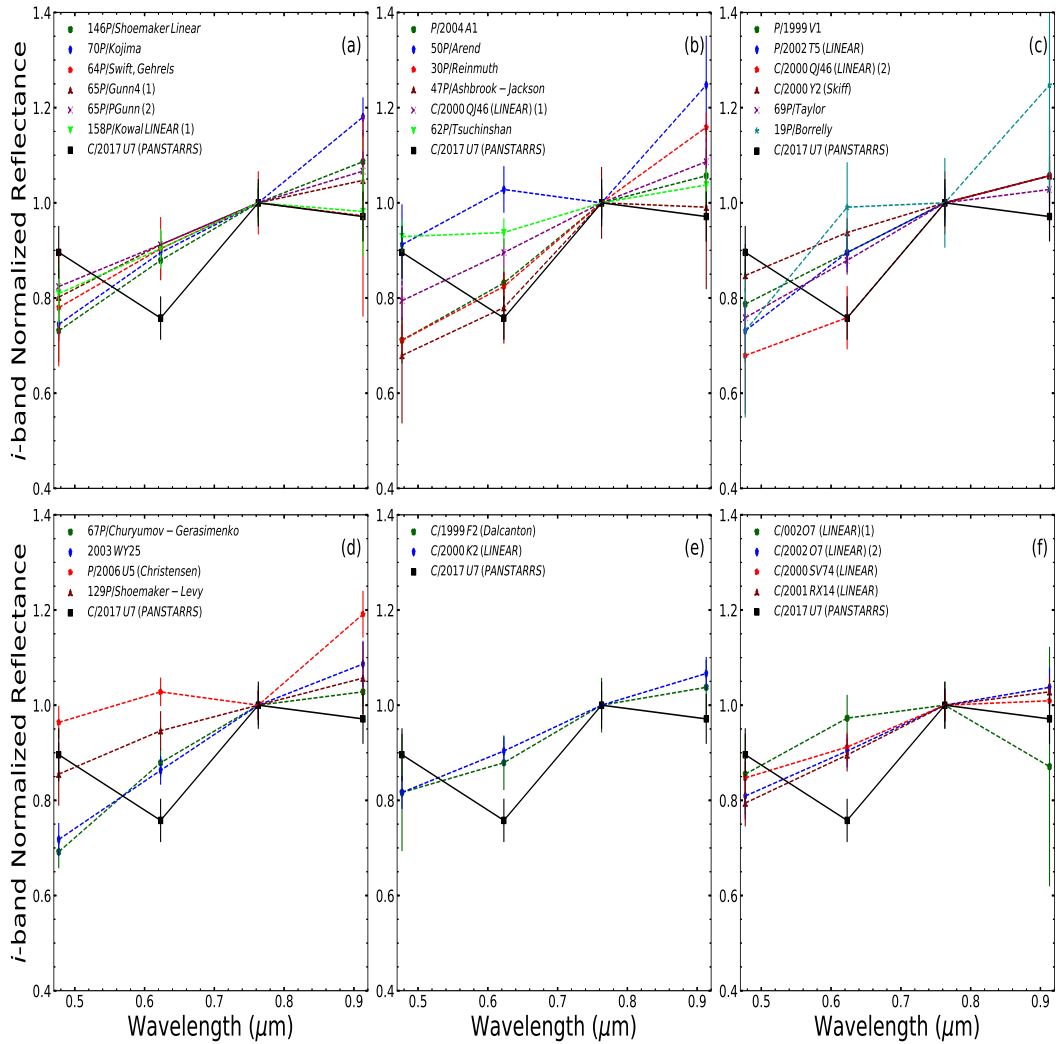


Figura 4.6: Espectro de baixa resolução do cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) e comparações com espectro fotométrico derivados a partir das cores obtidas com os filtros do sistema SDSS. Espectro foi obtido em 2018, as cores foram obtidas em 2019, ambos a partir do SOAR.

com alguns espectros selecionados do RELAB. Algumas características muito superficiais estavam presentes em vários espectros de meteoritos, mas nenhuma exibiu uma característica que corresponda à banda do cometa, mas o caso das amostras do CI Tagish Lake e do meteorito de ferro DRP78007, bem como de algumas amostras de minerais e rochas. Por outro lado, o espectro da Mesosiderite Barea coincide com a banda, mas mostra várias outras características que não são detectadas no espectro do cometa. A melhor combinação obtida foi com um espectro de querite, um material orgânico semelhante ao querogênio.

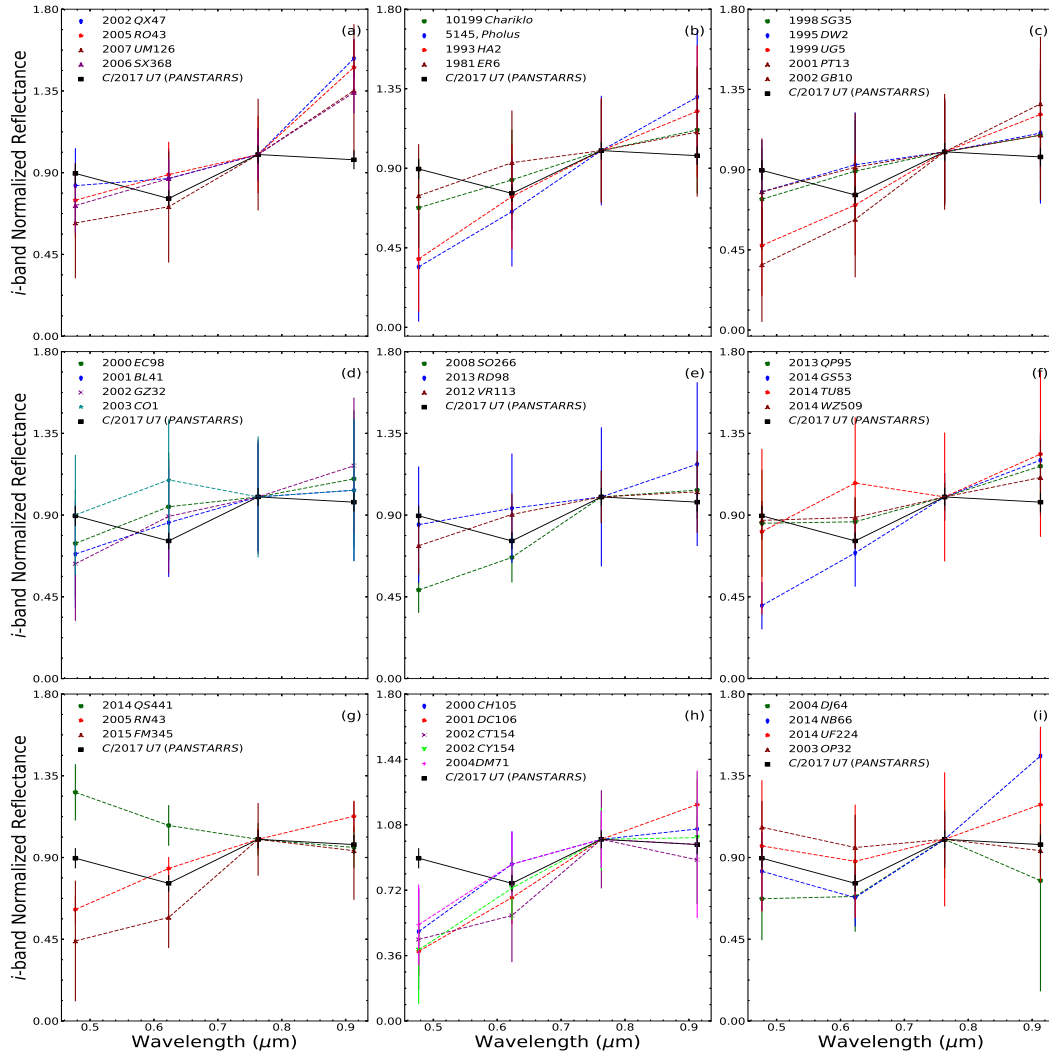


Figura 4.7: Espectro de baixa resolução do cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) e comparações com espectro fotométrico derivados a partir das cores obtidas com os filtros do sistema SDSS. Espectro foi obtido a partir das cores forem obtidas em 2019, ambos a partir do SOAR.

4.2 Conclusões

A partir dos dados de pré-descobertas obtidos a partir do projeto DES foi possível estimar a magnitude absoluta em 10,7 e com isso estimamos um núcleo $\sim 45\text{km}$ considerando um albedo típico de 0,04 e um coeficiente de fase $\beta = 0.11\text{mag.deg}^{-1}$.

O cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) apresentou característica peculiar quando comparado com as demais populações de cometas, Centauros e Objetos transnetunianos, embora tenha apresentado alguma similaridade dentro das incertezas com membros das populações de Centauros e TNOs. Todavia, é a presença de uma banda de absorção centrada em $0,595\mu\text{m}$ que é a principal característica deste objeto, e essa característica é notada durante todo o tempo de observação. O fato

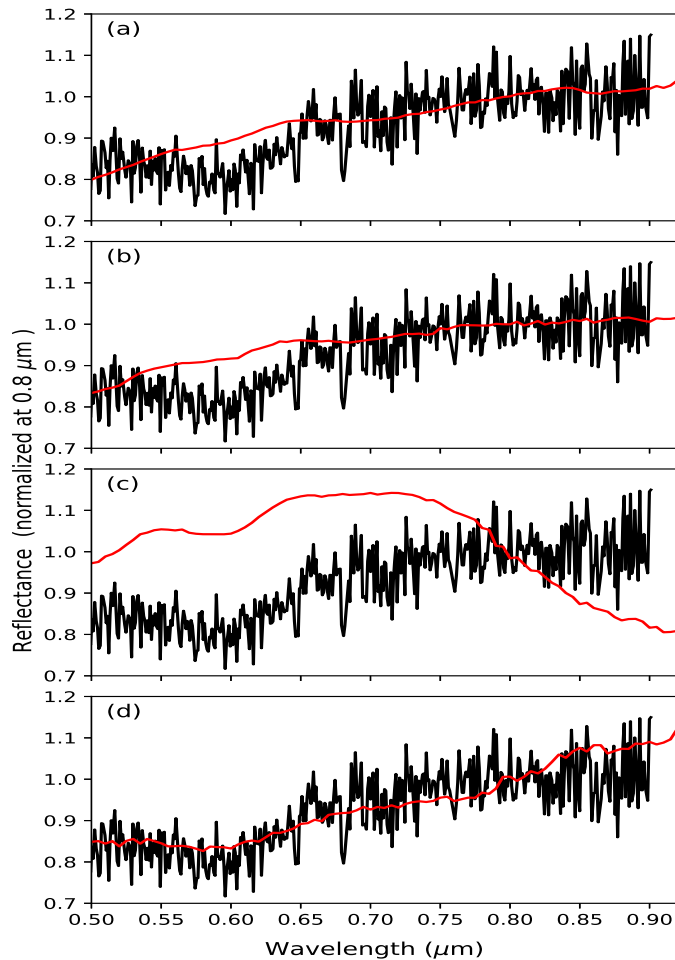


Figura 4.8: Comparação dos espectros de refletância do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) (em preto) com espectros selecionados do RELAB (em vermelho) e entre parênteses o nome do arquivo espectral: (a) CI Tagish Lake (C1MT237B); (b) Meteorito de Ferro DRP78007 (CFMB47); (c) Mesosiderite Barea (C1MB33); (d) Amostra de Querite #13 (CAMS22).

de a cor $g - r$) dos dados de pré-descoberta também ter essa característica, unindo ainda ao fato de os valores de $Af\rho$ terem valores mais baixos na região da banda r , indica que essa distinção pode está relacionada com a composição do material da poeira.

Numa busca por espectros análogos do banco de dados espectral RELAB, encontramos que existem semelhanças espectrais gerais que pode ser reproduzidas por alguns espectros de birrefletância do material orgânico querite. A presença de querite (com outros materiais tipo de quirogênio) na superfície de corpos menores foi proposta por (Moroz et al., 1992) como uma possível explicação para o avermelhamento nos espectros visíveis de asteroides do tipo P e D. Além disso, a querite tem

sido usada como um material substituto para hidrocarbonetos ricos em alifáticos para ajustar características na faixa de 2,6 a 3,6 μm nos espectros de corpos menores (De Sanctis et al., 2017) e hidrocarbonetos ricos em alifáticos foram detectados anteriormente em cometas (Raponi et al., 2020). Até onde sabemos, no entanto, a presença de uma característica espectral como a banda de 0,595 μm observada no cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) nunca foi usada para explicar a presença de hidrocarbonetos ricos em alifáticos em asteroides ou cometas. Portanto, mesmo que a presença de materiais semelhantes à querite seja uma explicação plausível para a característica observada de 0,595 μm , ainda não explica por que o espectro visível de C/2017 U7 (PANSTARRS) é peculiar quando comparado aos espectros de outros cometas. Esses, em geral, apresentam espectros vermelhos e inexpressivos no visível.

Quanto a parâmetro de $Af\rho$ nós notamos que os valores continuam aumentando até depois da passagem do periélio, o que indica que uma vez iniciada a atividade a coma continuou evoluindo até muito depois do periélio. Entretanto, em consequência da órbita do cometa, não houve alteração drástica nas distâncias heliocêntricas o suficiente para suprimir a atividade.

Outro ponto importante sobre este objeto, descrito em nosso artigo, se refere ao estudo dinâmico realizado por nossos colaboradores. O cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) é atribuído como um cometa dinamicamente velho pertencente a parte externa da Nuvem da Oort, embora a possibilidade de ter sido capturado do meio interestelar não possa ser descartada.

4.3 Trabalhos e Artigo apresentado

4.3.1 Congresso Nacional

- XLV Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira. Evento online, 2021.

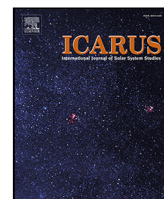
Evangelista, M. S.; Carvano, J.M.F; de Prá, M. Caracterização física do cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS). 2021. (Apresentação de Trabalho na XLV Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira)

4.3.2 Congresso Internacional

- X Taller de Ciências Planetárias.Punta del Este, Uruguay, 2020.
Evangelista, M. S.; Carvano, J.M.F; de Prá, M.; Lazzaro, D; Monteiro, F.; Medeiros H.; Souza-Feliciano, A.C; Schambeau, C.; Licandro, J.; De La Fuente Marco, R.; Rondón, E.; Arcoverde, P; Rodrigues, T.; Michimani, J.; Mesquita, W. Estudo comparativo dos índices de cores do cometa interestelar 2I/Borisov e cometa C/2017 U7. X Taller de Ciências Planetárias.Punta del Este, Uruguay, 2020.
- AAS/Division for Planetary Sciences Meeting: Ano: 2020
Santana, M. E., Carvano, J., de Prá, *et al.*. Physical characterization of hyperbolic comet C/2017 U7. In AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, volume 52 of AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 2020, page 319.04.

4.3.3 Artigo: Physical and dynamical characterization of hyperbolic comet C/2017 U7 (PANSTARRS)

- Evangelista-Santana et al. (2022)
Evangelista-Santana, M.; Carvano, J.M. ; De Prá, M. ; de La Fuente Marcos, R.; Schambeau, C. ; Licandro, J. ; de La Fuente Marcos, C. ; Souza-Feliciano, A.C. ; Pinilla-Alonso, N. . Physical and dynamical characterization of hyperbolic comet C/2017 U7 (PANSTARRS). ICARUS, v. 377, p. 114834, 2022.



Research Paper

Physical and dynamical characterization of hyperbolic comet C/2017 U7 (PANSTARRS)

M. Evangelista-Santana^{a,*}, J.M. Carvano^a, M. De Prá^b, R. de la Fuente Marcos^c, C. Schambeau^b, J. Licandro^{d,e}, C. de la Fuente Marcos^f, A.C. Souza-Feliciano^a, N. Pinilla-Alonso^b

^a Observatório Nacional, rua Gal. José Cristino 77, CEP 20921-400, Rio de Janeiro, Brazil

^b Florida Space Institute, University of Central Florida, Orlando, EUA, United States of America

^c AEGORA Research Group, Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Spain

^d Instituto de Astrofísica de Canarias, Tenerife, Spain

^e Universidad de La Laguna, La Laguna, Spain

^f Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Spain



ARTICLE INFO

Keywords:

Comets
Photometry
Spectroscopy
Dynamics

ABSTRACT

We present here a dynamical and observational study of the comet C/2017 U7 (PANSTARRS). This comet was discovered in 2017 and found to have a hyperbolic orbit. Our dynamical analysis shows that the object has probably originated in the Oort cloud, however an interstellar origin cannot be discarded. The observations were obtained in 2018 and 2019 using the Goodman High Throughput Spectrograph (GHTS) at the SOAR telescope. We obtained visible spectra covering the wavelength range of 0.5–0.9 μm and also images in the SDSS filters system. Both the low-resolution reflectance spectrum and the reflectance spectra derived from the SDSS filters show an atypical band at $\sim 0.595 \mu\text{m}$. We conducted a comparative study of the colors and reflectance spectra of different small body populations (e.g., comets, Centaurs, and trans-Neptunian objects or TNOs) from the literature and concluded that the spectra and the colors of this comet are atypical, showing only some overlap with those of some known members of the TNOs and Centaurs, within the large uncertainties of the measurements of those populations. It is found that the feature and overall spectral shape can be reproduced by laboratory spectra of kerite, a template for aliphatic-rich hydrocarbons that has been previously identified in NIR cometary spectra absorptions. It is tentatively proposed that the unusual spectral shape is the result of a particle size distribution of dust grains in the coma or on the surface that has arisen due to a low grain ejection velocity from the surface and large nucleus size.

1. Introduction

The small bodies of the solar system can be considered the most pristine objects in our planetary system. Specifically, comets are believed to hold volatile content and are capable of providing information about the protoplanetary disk formation and evolution (Bauer et al., 2017; Hui, 2018).

It is generally assumed that comets have sources in the trans-Neptunian belt (short-period comets) and the Oort cloud (long-period comets), see Jewitt (2015). Many of these comets can enter the inner solar system, but in some cases they show high perihelion distances, q . Some even follow weakly hyperbolic trajectories. Although the mechanism of activation is fairly well understood for the comets that have closer approaches to the Sun, there is a gap of knowledge regarding the objects with high perihelion distance ($q > 5 \text{ au}$). Activity in this region is most likely mainly driven by crystallization of amorphous ice and/or

sublimation of hyper volatile species (Everhart, 1982; Weissman, 1982; Fernández et al., 2004).

This scenario reflects a possible bias in the sample of observed comets, where most of the well-studied objects are Jupiter-Family comets (JFCs), originating at the trans-Neptunian belt, and few are long-period comets, originating at the Oort cloud. To overcome this bias and to more thoroughly understand the current structure of the solar system, and how it formed and evolved, it is critical to characterize the compositions, activity mechanisms and other physical properties among the different comet populations.

In particular, the Oort cloud is a spherically distributed reservoir of small icy bodies that, according to indirect observational evidence, surrounds the outskirts of the solar system and may have formed nearly 4.6 Gyr ago. Studies of objects that have a probable origin in this

* Corresponding author.

E-mail addresses: marcalsantana@on.br (M. Evangelista-Santana), carvano@on.br (J.M. Carvano), mariodepra@ucf.edu (M. De Prá).

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114834>

Received 20 July 2021; Received in revised form 23 November 2021; Accepted 30 November 2021

Available online 20 January 2022

0019-1035/© 2022 Elsevier Inc. All rights reserved.

region have revealed a heterogeneous nature (e.g., Oort, 1950; Stern and Weissman, 2001; Fernández et al., 2004; Meech et al., 2016) and suggest that part of the material in the Oort cloud could have an extrasolar origin, containing materials captured from the protoplanetary disks of other stars while still forming within its nascent star cluster (see for example Portegies Zwart et al. 2021). However, little is still known about the existence, extent and dominant physical properties of objects from this region.

In this context, A/2017 U7 was discovered on October 29, 2017, when it was at 7.8 au from the Sun and moving towards perihelion at 6.4 au, by the 1.8 m Pan-STARRS 1 Ritchey-Chretien telescope at Haleakala (Bressi et al., 2018) observing for the Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS, Kaiser 2004, Denneau et al. 2013). The object was initially regarded as asteroidal, A/2017 U7, therefore the initial prefix A/, but it was eventually confirmed to be a comet, C/2017 U7 (PANSTARRS) (Bressi et al., 2020).¹ Initial orbit determinations placed this object among the group of hyperbolic asteroids (orbital eccentricity, $e > 1$) and later among the hyperbolic comets. The solution available on March 4, 2018, when the discovery was announced, gave a value of the heliocentric eccentricity of 1.00176 ± 0.00012 . A recent orbit determination (see Table 1), gives 1.000991 ± 0.000009 that is a moderate value of e among those of known hyperbolic comets; the orbit determination in Table 1 is based on 816 observations for a data-arc of 1421 days. A/2017 U7 was first observed only 10 days after the discovery of 1I/2017 U1 ('Oumuamua), the first known interstellar object (see for example the review in Hainaut et al. 2018). When first announced, A/2017 U7 was regarded as a candidate for being an interstellar object, albeit with very low hyperbolic excess velocity with respect to the barycenter of the solar system. This was our initial motivation for studying C/2017 U7 (PANSTARRS).

We present here a study of the spectroscopic, photometric and dynamical properties of the hyperbolic comet C/2017 U7 (PANSTARRS). An exploration of the orbital evolution of the object is shown in Section 2. The observations and reduction techniques are described in Section 3, and the analysis of the observational data is presented in Section 4. Finally, we present a discussion of these results and draw our conclusions in Section 5.

2. Comet C/2017 U7 (PANSTARRS): past, present and future dynamical evolution

In order to study the dynamical evolution of C/2017 U7 (PANSTARRS), we use data – heliocentric and barycentric orbital elements and their uncertainties, common for both – provided by Jet Propulsion Laboratory's Solar System Dynamics Group Small-Body Database (JPL's SSDG SBDB, Giorgini 2015)² and based on JPL's Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441 (Park et al., 2021), and full N -body calculations carried out with software written by Aarseth (2003)³ that implements the Hermite integration scheme described by Makino (1991). These numerical simulations do not include non-gravitational forces; the physical model and additional details are described in de la Fuente Marcos and de la Fuente Marcos (2012). The effects of Galactic tides and stellar perturbations on the calculations as discussed by Królikowska and Dybczyński (2018) have been neglected as they appear to be relatively unimportant for short integrations like ours—compare the results for C/2017 K2 (PANSTARRS) in Królikowska and Dybczyński (2018) and de la Fuente Marcos and de la Fuente Marcos (2018). Such effects cannot be ignored when much longer integrations are attempted as the orbital period of the solar system around the center of the Galaxy is close to 250 Myr (our longest

Table 1

Heliocentric and barycentric orbital elements and 1σ uncertainties of C/2017 U7 (PANSTARRS). The orbit determination has been computed at epoch JD 2458777.5 that corresponds to 00:00:00.000 TDB, Barycentric Dynamical Time, on 2019 October 21, J2000.0 ecliptic and equinox.

Source: JPL's SSDG SBDB (solution date, 2021-Jul-26 23:12:24 PDT).

Orbital parameter	Heliocentric	Barycentric
Perihelion distance, q (au)	= 6.417304 ± 0.000008	6.409861
Eccentricity, e	= 1.000991 ± 0.000009	0.998413
Inclination, i ($^\circ$)	= 142.63527 ± 0.00002	142.65424
Longitude of the ascending node, Ω ($^\circ$)	= 276.23233 ± 0.00002	276.18950
Argument of perihelion, ω ($^\circ$)	= 326.04347 ± 0.00008	326.06799
Mean anomaly, M ($^\circ$)	= 0.000749 ± 0.0000010	0.0001483
Absolute magnitude, H (mag)	= 8.8 ± 0.9	

Table 2

Barycentric Cartesian state vector of C/2017 U7 (PANSTARRS): components and associated 1σ uncertainties. Epoch 2458777.5 TDB (2019-Oct-21.0).

Source: JPL's SBDB.

Component	value $\pm 1\sigma$ uncertainty
X (au)	= $3.177654393232998 \times 10^{+0} \pm 4.01804054 \times 10^{-6}$
Y (au)	= $-5.208536696177243 \times 10^{+0} \pm 6.01295174 \times 10^{-6}$
Z (au)	= $-1.9820921111114977 \times 10^{+0} \pm 2.86906024 \times 10^{-6}$
V_x (au d $^{-1}$)	= $-5.867065291363123 \times 10^{-3} \pm 9.28855347 \times 10^{-9}$
V_y (au d $^{-1}$)	= $-5.796459892690215 \times 10^{-3} \pm 1.00112837 \times 10^{-8}$
V_z (au d $^{-1}$)	= $4.927699142603646 \times 10^{-3} \pm 8.98470643 \times 10^{-9}$

integrations span just 6 Myr). Cartesian state vectors were obtained from JPL's HORIZONS⁴ (also based on DE440/DE441) or computed using the Monte Carlo Covariance Matrix (MCCM) method described by de la Fuente Marcos and de la Fuente Marcos (2015) with covariance matrices obtained from HORIZONS that is also the source of other input data necessary to carry out the calculations such as barycentric Cartesian state vectors for planets and other bodies. The approach applied here has been previously used in de la Fuente Marcos and de la Fuente Marcos (2018, 2019), Licandro et al. (2019), de la Fuente Marcos et al. (2019), and de León et al. (2020).

2.1. Current orbital status

Although the heliocentric orbit determination in Table 1 is hyperbolic at the 117σ level, the barycentric one is not hyperbolic at the 187σ level. Therefore, C/2017 U7 (PANSTARRS) is at the moment gravitationally bound to the solar system, even if weakly. On the other hand, on May 18, 2020, C/2017 U7 (PANSTARRS) experienced a close approach to Jupiter at about 1.66 au from its center. This flyby took place at a relative velocity close to 28 km s^{-1} , which is relatively slow so its long-term dynamical effects might not have been negligible. Long-term calculations (see below) may show the true effects of such an encounter. Fig. 1 shows that the evolution of representative control orbits with Cartesian vectors separated $\pm 3\sigma$ and $\pm 9\sigma$ from the nominal values in Table 2 is virtually identical in the neighborhood of the zero time instant. The figure reveals that the short-term evolution of C/2017 U7 (PANSTARRS) is very stable and any orbit determination compatible with the available data produces nearly the same results in the time interval $(-0.25, +0.25)$ Myr.

2.2. Past orbital evolution

In order to investigate the orbital evolution of C/2017 U7 (PANSTARRS) over the past few Myr, we have performed calculations in the time interval $(-3, +3)$ Myr. Our results are shown in Fig. 1 and they picture a rather chaotic orbital evolution into the past. Close encounters with Jupiter make the reconstruction of the dynamical past

¹ <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K20/K20F58.html>

² <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>

³ <http://www.ast.cam.ac.uk/~sverre/web/pages/nbody.htm>

⁴ <https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

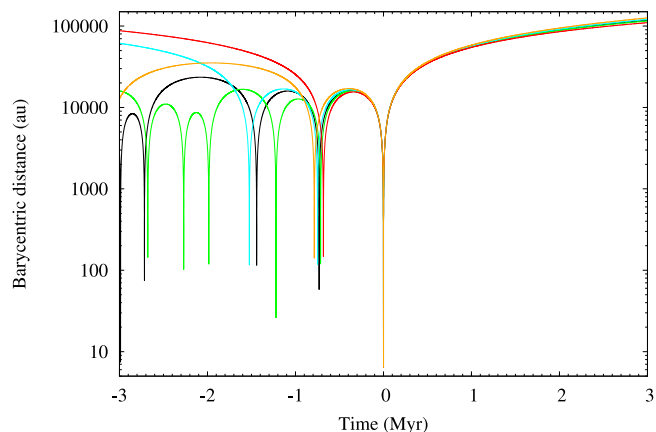


Fig. 1. Evolution of the barycentric distance to the comet C/2017 U7 (PANSTARRS) as computed from the orbit determination in Table 1 (nominal in black) and relevant control orbits with Cartesian vectors separated $+3\sigma$ (in green), -3σ (in cyan), $+9\sigma$ (in red), and -9σ (in orange) from the nominal values in Table 2. The output time-step size is 300 yr. The zero time instant corresponds to epoch JD 2458777.5 TDB.

of this comet difficult when considering times older than about 700 kyr and a probabilistic approach should be applied in order to arrive at reliable conclusions. At least two of the relevant orbits (-3σ , in cyan, and $+9\sigma$, in red) may lead to an ejection or, more properly, to a capture from interstellar space as we are considering an integration backwards in time. Such an evolution may be compatible with an origin in the Oort cloud as discussed by de la Fuente Marcos et al. (2018).

In order to understand better its possible origin, we have performed integrations backwards in time using MCCM to generate control orbits and find that the probability of this comet having been captured from interstellar space during the last 3 Myr is 0.11 ± 0.05 (average and standard deviation of 10^3 experiments). Fig. 2 shows results from these simulations. Most control orbits lead to barycentric distances with values below the aphelion distance (that defines the domain of dynamically old Oort cloud comets (see Królikowska and Dybczyński 2017) as seen in the left panel). The most straightforward interpretation of these results is that C/2017 U7 (PANSTARRS) almost certainly did not arrive from interstellar space: It is a dynamically old object instead, with a likely origin in the solar system. This conclusion was also found by Hui (2018), using one of the earliest orbit determinations of C/2017 U7 (PANSTARRS), the solution available on March 4, 2018 pointed out above.

2.3. Future orbital evolution

Although the likely past orbital evolution of C/2017 U7 (PANSTARRS) as characterized by Figs. 1 and 2 was rather chaotic, the future orbital evolution is far more predictable. After the flyby with Jupiter on May 18, 2020, the comet seems to have received just enough impulse to leave the solar system. All the control orbits appear to lead to the same outcome (see Fig. 1). Our integrations shown in Fig. 2, right panel, indicate that its probability of escaping the solar system during the next 3 Myr is 0.75 ± 0.05 and this value is likely to increase if we consider longer calculations. Numerical simulations carried out by Hui (2018) with an orbit determination based on 87 observations spanning a data-arc of 176 days, indicated that this comet has a 60% chance of escaping the solar system during the next 1.5 Myr after its perihelion passage. This result is consistent with our own findings based on an improved orbit determination.

Comets that eventually leave the solar system as a result of close encounters with Jupiter are not uncommon. Comet C/1980 E1 (Bowell), with a current value of the heliocentric orbital eccentricity of 1.057733 ± 0.000008 and a barycentric one of 1.047673, is currently

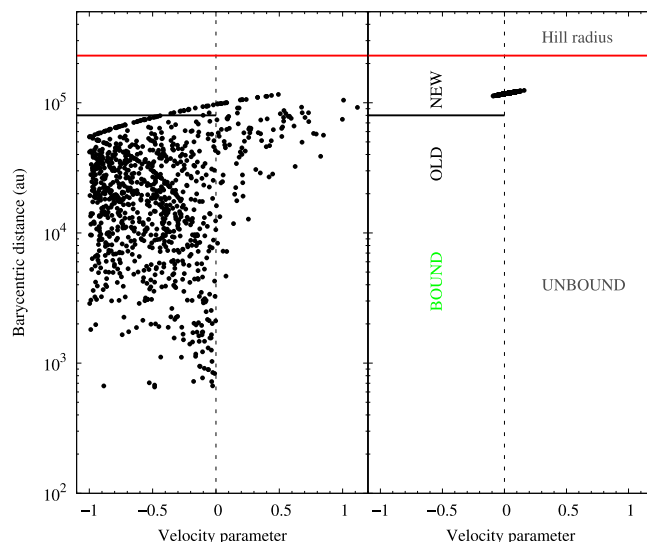


Fig. 2. Values of the barycentric distance as a function of the velocity parameter 3 Myr into the past (left panel) and future (right panel) for 1000 control orbits of C/2017 U7 (PANSTARRS) generated using the MCCM approach. The velocity parameter is the difference between the barycentric and escape velocities at the computed barycentric distance in units of the escape velocity. Positive values of the velocity parameter are associated with control orbits that could be the result of capture (left panel) or lead to escape (right panel). The thick black line corresponds to the aphelion distance $-a(1+e)$, limiting case $e=1$ – that defines the domain of dynamically old comets with $a^{-1} > 2.5 \times 10^{-5} \text{ au}^{-1}$ (see Królikowska and Dybczyński 2017); the thick red line signals the radius of the Hill sphere of the solar system (see for instance Chebotarev 1965).

listed as the fifth most hyperbolic object known – after 2I/Borisov with $e=3.3562$, ‘Oumuamua with 1.2011, C/1893 N1 (Rordame-Quenisset) with 1.0823, and C/1954 O1 (Vozarova) with 1.0737, although the last two have few observations spanning short arcs – and its current path was the result of a close encounter with Jupiter on December 9, 1980 (see for example Buffoni et al. 1982, Branham 2013).

3. Observations and data reduction

We used the 4.1 m SOAR telescope at Cerro Pachón (Chile) to observe C/2017 U7 (PANSTARRS) on two nights: August 13th, 2018 and September 18th, 2019. On the first night, we used the Goodman High Throughput Spectrograph (GHTS) to acquire the object’s visible spectrum and images. The spectrum was acquired using the GHTS Red Camera, with the grating of 400 l/mm (mode M2) and the 1.5" slit with no binning positioned along parallactic angle. This setup provided the visible spectra of the comet covering the wavelength range of 0.5–0.9 μm . The same setup was used to acquire the spectra of solar analog stars at an air mass similar to that of the object’s observation. On the second night, we used the GHTS Red camera in imaging mode with the g -, r -, i -, and z -band filters in the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) system. We used a 1×1 bin mode, the effective circular field of view was 7.2 arcmin (diameter) and the image scale was 0.15 arcsec pixel $^{-1}$. All observing circumstances surrounding the observations carried out with the SOAR telescope are shown in Tables 3 and 4 lists the solar analogs used in the reduction of the spectroscopic observations.

C/2017 U7 (PANSTARRS) was also serendipitously observed by the Dark Energy Survey (Flaugher et al., 2015) seven times on five nights between October 2017 and October 2018. These observations were made using the 4 m Victor M. Blanco at the Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO) and the Dark Energy Camera (DECam) that has a field of view of diameter 2.2° with filters in the SDSS system. The observing circumstances are shown in Table 5. These retrieved archive DES images had been previously corrected using bias and master dome flats.

Table 3

All observations obtained with SOAR of comet C/2017 U7 (PANSTARRS). Δ : geocentric distance, r : heliocentric distance, and α : phase angle.

UT time	Airmass	Data type	Filter/spectral range (μm)	Exp. time (s)	Δ (au)	r (au)	α
2018-08-13T02:57	1.67	Spectrum	0.5–0.9	3×600	6.162	6.943	5.6
2019-09-19T00:38	1.03	Image	g -band	4×300	5.888	6.417	8.0
2019-09-19T00:20	1.04	Image	r -band	4×150	5.888	6.417	8.0
2019-09-19T01:16	1.02	Image	i -band	4×150	5.888	6.417	8.0
2019-09-19T01:33	1.03	Image	z -band	4×150	5.888	6.417	8.0

Table 4

Solar analogs—Observing circumstances on 2018-08-13.

Star	UT time	Airmass	Exp. time (s)
Landolt 107-998	23:05:59	1.16	3×90
Landolt 107-998	01:19:22	1.44	3×90
Landolt 107-684	23:18:56	1.16	3×90
Landolt 110-361	23:37:57	1.44	3×120
Landolt 110-361	01:46:30	1.14	3×120

The spectroscopic and imaging data were reduced using the Image Reduction and Analysis Facility (IRAF)⁵. The GHTS spectral images were first corrected for bias and then divided by a normalized flat field image. In sequence, we extracted the 2D spectra of C/2017 U7 (PANSTARRS) and those of the solar analogs using the IRAF *APALL* task, centering the comet optocenter at the middle of the aperture. The background sky was measured (and subsequently subtracted) in a region close to the comet, free of coma, tail, and/or background stars. The final spectra was obtained by averaging the individual spectra of each target and calibrating the wavelength using HgArNe lamps. We divided the object's spectrum by each solar analogs spectra observed in the same night. This procedure allows for the investigation of possible systematic errors and also estimates of the uncertainty in the spectral slope. Finally, the spectra of C/2017 U7 (PANSTARRS) was produced by averaging all the object's spectra that had been divided the solar analog spectrum.

For all imaging data of C/2017 U7 (PANSTARRS), we applied an aperture photometry technique with radii varying between 1 and 50 pixels, using the task DIGIPHOT from the APPHOT package included in IRAF. However, in this particular case, specifically for active comets is necessary to consider the effects caused by seeing variations during each night, mainly for small apertures (Licandro et al., 2000). For each imaging sequence, the images were convolved with synthetic profiles in order to downgrade the seeing of each so as to match the worst seeing in each sequence (Licandro et al., 2000). Aperture photometry was then performed using radii between 1 and 50 pixels. Also, we used isolated stars for photometric calibrations that allowed for the use of larger apertures which minimized the effects of seeing variability. Photometric calibration for the SOAR observations on 2019-11-19 and for the DES observations were obtained by searching field stars with calibrated magnitudes listed in the SkyMapper Southern Sky Survey (Keller et al., 2007), using curve of growth (Howell, 1990) to determine the appropriate aperture.

4. Analysis and results

4.1. Evolution of the coma

In order to measure the evolution of the coma within the time range of the observations gathered in this work, we initially performed a direct comparison of the radial profile of the comet with the profiles

⁵ IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under cooperative agreement with the National Science Foundation.

of field stars (Luu and Jewitt, 1992; Martino et al., 2019; De Prá et al., 2020), using three image sets: the DES images on 2017-10-18 and 2017-10-19 (g filter), the DES image on 2018-09-15 (r filter) with scale of $0.263 \text{ arcsec pixel}^{-1}$ and the 4 SOAR images on 2019-09-19 (r filter) with scale of $0.15 \text{ arcsec pixel}^{-1}$. The radial profiles of the comet and those of the stars were obtained using the PRADPROF task of the IRAF package. The radial profiles displayed in Fig. 3 show the temporal evolution of the coma. The images that were obtained by DES in October 2017 show a radial profile with no detected coma, although our data are not conclusive about the non-existence of activities in this date. On the images obtained by DES in September 2018 and SOAR in September 2019, on the other hand, the distinction between the profile of the stars and that of the comet can be clearly seen. The DES observations in October 2017 could be used to characterize the nucleus if it is assumed that all flux received is from a bare nucleus. However, the non-detection of an extended profile at large heliocentric distances does not constitute an absolute proof of the absence of a coma.

In order to estimate the diameter of C/2017 U7's nucleus we first derived the absolute nuclear magnitude using the DES observations of 2017-11-10 in the g and r bands, assuming that there were no coma during that time. From these observations, we calculated the V band magnitude through the relations given by Jurić et al. (2002). We assumed a constant value for the linear phase coefficient $\beta = 0.11 \text{ mag deg}^{-1}$ (Alvarez-Candal et al., 2016), obtaining a value for the absolute magnitude of the nucleus of $H = 10.87 \pm 0.06 \text{ mag}$. Using albedos in the range 0.02–0.06, we obtained a diameter between 64 km and 37 km, and for an albedo of 0.04, typical of a comet nucleus, (Fernández et al., 2013) we obtained an upper limit for the diameter of $\sim 45 \text{ km}$.

The evolution of the dust production rate of the comet was estimated using the $Af\rho$ parameter. This parameter was initially defined by A'Hearn et al. (1984) on observations of the comet Bowell. As a general rule, it is assumed that larger $Af\rho$ values indicate higher dust production rates. Also, this parameter would be independent of the size of the aperture if the surface brightness profile falls with the inverse of the aperture, which would correspond to an isotropic emission and steady-state coma.

Fig. 4 shows the $Af\rho$ values as a function of the cometocentric distance calculated for the g , r , i and z bands for the SOAR observations of September 2019. For all filters, there is a steep increase of $Af\rho$ with aperture followed by a gentler decline. The steep increase of $Af\rho$ for smaller aperture radii is the result of the coma's flux being spread out due to the seeing of the observation, while the slow decrease at larger radii may be associated with a non-steady-state dust emission, the effects of solar radiation pressure, possible dust grain fragmentation, or combinations of such mechanisms. The behavior for the z and i bands are similar, but for the g and r band the peak value is shifted to larger apertures and presents a less steep decline. Also, the peak value for the r band reaches a smaller value than for the other filters.

The $Af\rho$ values for the comet C/2017 U7 (PANSTARRS) derived for filters in the SDSS system, are listed in Table 6, with the maximum and the relative aperture radius. Comparing the values obtained from the r -filter in the DES observations in September 2018 with the values from the SOAR data on September 2019, is possible to identify a clear increase in the dust production.

Table 5

All observations obtained of DES for comet C/2017 U7 (PANSTARRS). Δ : geocentric distance, r : heliocentric distance, and α : phase angle.

UT time	Airmass	Data type	Filter/spectral range (μm)	Exp. time (s)	$\Delta(\text{au})$	$r(\text{au})$	α
2017-10-18T05:25	1.06	Image	g-band	1×90	7.217	7.902	5.5
2017-10-19T05:35	1.08	Image	g-band	1×90	7.220	7.898	5.5
2017-10-30T04:11	1.04	Image	i-band	1×90	7.274	7.857	6.1
2017-10-30T04:13	1.05	Image	z-band	1×90	7.274	7.857	6.1
2017-11-10T02:11	1.01	Image	r-band	1×90	7.356	7.816	6.6
2017-11-10T02:13	1.01	Image	g-band	1×90	7.356	7.816	6.6
2018-09-15T06:02	1.10	Image	r-band	1×90	6.094	6.862	5.7

Table 6

$Af\rho$ values for comet C 2017 U7 (PANSTARRS), derived for SDSS filter system with reference optical aperture of $\rho = 10^4$ km and centered on the optocenter.

Date	Filter	$Af\rho$ (cm) ($\rho = 10^4$ km)	$Af\rho_{max}$	ρ_{max} (km)
2018-09-15	r-band	1607	1662	14320
2019-09-09	g-band	2509	2555	12815
2019-09-09	r-band	2398	2331	12174
2019-09-09	i-band	2716	2724	10893
2019-09-09	z-band	2686	2691	10893

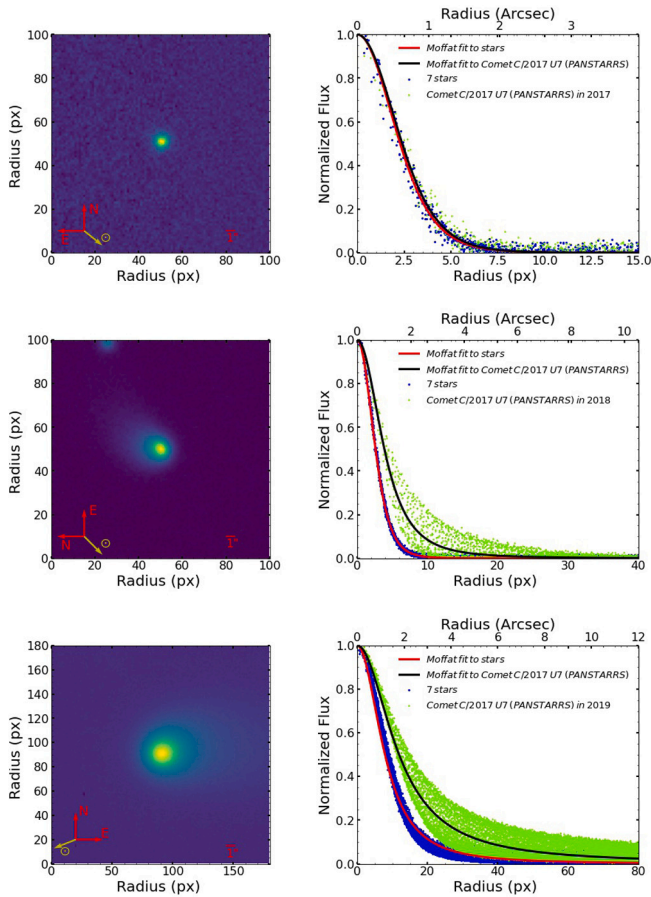


Fig. 3. Left: co-added images of C/2017 U7 (PANSTARRS) of October 2017, September 2018, September 2019; right: associated surface brightness profile, with values of the normalized intensity as a function of the distance from de centroid for stars and C/2017 U7 ((PANSTARRS), and Moffat adjustment for stars and C/2017 U7 ((PANSTARRS).

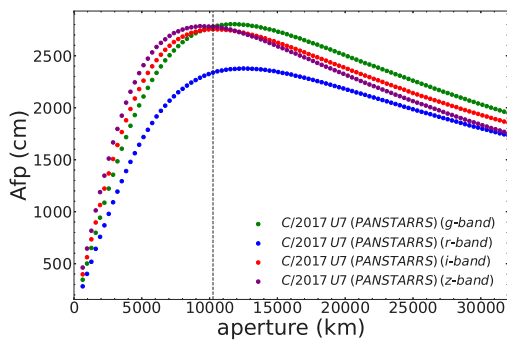


Fig. 4. $Af\rho$ trend versus cometocentric distance measured for comet C/2017 (PANSTARRS) in g -, r -, i -, z -band filters in SDSS system for observations of September 2019. The dashed line represents the size from HWHM.

4.2. Colors and spectral properties

The primary source of information about the spectral behavior of the comet is the low-resolution spectrum obtained on 2018-08-13 and the photometry on the g -, r -, i -, z -bands from the observations on 2019-09-19, which can be used to derive colors as well as a reflectance spectrum. The former set of observations was obtained within an interval of ~ 5 minutes and therefore is not severely affected by temporal variations in the coma. The latter set of $i-z$ and $g-r$ colors of the nucleus were obtained from the DES observations of the comet on 2017-10-30 and 2017-11-10.

Fig. 5 shows the low-resolution reflectance spectra of the comet along with reflectance spectra obtained from the SDSS magnitudes (Fukugita et al., 1996), using apertures 0.45, 1.95, and 7.2 arcsec. The low-resolution spectrum is peculiar because it presents an absorption band centered around $\sim 0.596 \mu\text{m}$, which is not commonly seen on spectra of comets or asteroids. We used the CANA tool (De Pra et al., 2018) to characterize the center of the band at $\sim 0.596 \mu\text{m}$ and its depth at $7.7 \pm 0.5\%$. The continuum was measured in the regions close to 0.52 and 0.65 μm . The feature is also present in the reflectance spectra obtained from the SDSS colors taken nearly a year after the spectrum when the comet was more active. Because of the presence of this band, we chose to normalize all reflectance spectra to 0.748 μm , which corresponds to the central wavelength of the SDSS i -band filter. Both the overall slope of the spectra and the contrast of the band vary with the aperture used to compute the magnitudes, and the low-resolution spectrum is better matched with an aperture of 1.95 arcsec. Fig. 6 presents the color gradient in $g-r$ and $r-i$ as a function of the aperture and clearly shows that there is a marked change in the $r-i$ color that is consistent with the brightness in the r -band changing more slowly with the aperture than that of the i -band. This behavior is also consistent with how the $Af\rho$ measurements vary with photometry aperture.

In order to compare C/2017 U7 (PANSTARRS) with other populations, we estimated the object's SDSS nucleus colors from the DES images (when the comet was not displaying a conspicuous coma) and the SDSS spectrophotometric data obtained during the 2019 run (when the object was closer to perihelion and displaying a dust coma) using an aperture of 1.95 arcseconds. In Fig. 7, the colors of the comet C/2017 U7 (PANSTARRS) are compared with the distribution of SDSS colors of active comets (Solonoi et al., 2012), Centaurs (Ofek, 2012; Peixinho et al., 2015) and trans-Neptunian objects or TNOs (Terai et al., 2018). It is of note that the colors obtained from (Peixinho et al., 2015) were taken using the BVR_I filters, and we transformed to $g-r$, $r-i$ and

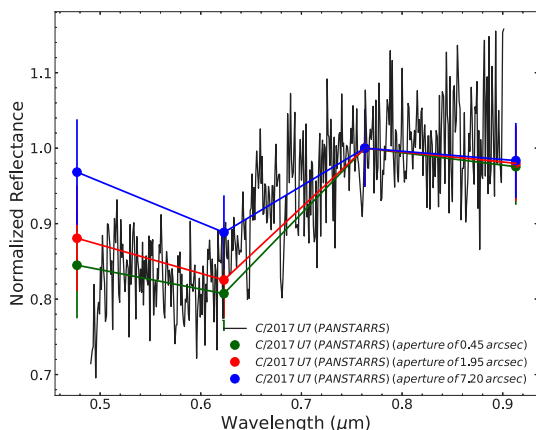


Fig. 5. Reflectance spectra of C/2017 U7 (PANSTARRS) from low-resolution spectroscopy and SDSS colors. All spectra were normalized at $0.748 \mu\text{m}$, the spectrum was obtained in August 2018 and the reflectance spectra derived from the SDSS filters were obtained in September 2019.

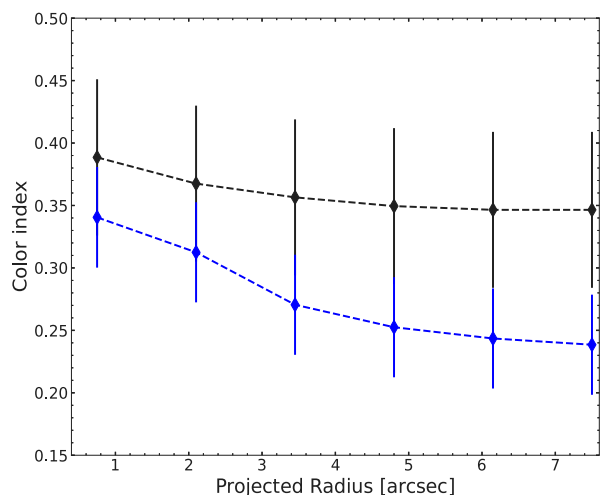


Fig. 6. The $g-r$ and $r-i$ color as a functions of projected aperture radius of comet C/2017 U7 (PANSTARRS) for observations of September 2019.

$i-z$. As seen in the figure, this comet has unusual colors when compared with other comets and also to Centaurs, having some overlap only with TNOs and Centaurs. The main difference between this comet and other objects is due to its $i-z$ and $g-r$ colors, which were also peculiar on the DES observations of 2017-10-30 and 2017-11-10, when there was no discernible coma. This color is the most affected by the presence of the $0.595 \mu\text{m}$ feature. Figs. 8 and 9 compare the SDSS reflectance spectrum of C/2017 U7 (PANSTARRS) with reflectance spectra of comets, TNOs and Centaurs. Again, some similarity is seen only with the spectra of some TNOs and Centaurs.

4.3. Search for spectral analogs

The observed spectrum of a comet in the presence of the coma can differ from the spectrum of the nucleus due to the size distribution of the dust (Rondón-Briceño et al., 2017). However, for the C/2017 U7 (PANSTARRS) the $g-r$ and $i-z$ colors obtained on two different nights shows the object has a blue slope and is similar to what was seen in the DES observations (Fig. 7) and this suggests that this band could be a characteristic of the material of the nucleus, but unfortunately, we do not have the $r-i$ color to confirm the observed absorption in the DES data.

In order to identify materials that could produce a similar feature, we conducted a search in the latest release (December 2019) of the

RELAB spectral library (RELAB, 2019). A total of 8962 VNIR spectra covering at least the $0.5-0.8 \mu\text{m}$ range were inspected for the presence of a feature around $0.595 \mu\text{m}$. This sample includes 28 spectra of organic samples, 1840 spectra of meteorite material, 2770 spectra of terrestrial rocks and 4324 spectra of Earth minerals.

The spectra with a feature centered around $0.595 \mu\text{m}$ were then visually compared with the comet spectrum. This exercise in curve-matching has a limited capacity as a diagnostic of the composition, since the measured spectra are also affected by grain size, sample texture and the experimental geometry. It does however allow one to pinpoint possible candidates. In general, the bands detected in the RELAB spectra were either too shallow or too deep compared with the feature observed in the comet's spectrum, or were present alongside other spectral features not seen in the spectrum of the comet. Fig. 10 shows comparisons of the comet's spectrum with some selected RELAB spectra. Some very shallow features were present in several meteorite spectra, but none display a feature that matches the comet's band. This is the case for the samples of the unusual CI Tagish Lake and of the Iron meteorite DRP78007, as well of some mineral and rock samples. On the other hand, the spectrum of the Mesosiderite Barea matches the band, but shows several other features that are not detected in the comet's spectrum. The overall best match is with a spectrum of kerite, an organic kerogen-like material.

5. Summary and discussion

Comet C/2017 U7 (PANSTARRS), as discussed in Section 2, is most likely a dynamically old object from the outer Oort cloud, although the possibility of it being captured from interstellar space cannot be excluded. The propagation of the comet's orbit into the past shows that it may have had at least one but perhaps several perihelion passages in the last 3 Myr, with the most recent happening around 700,000 years ago, with perihelion distances always close to the present one, $q = 6.417 \text{ au}$. Our integrations also indicate that this comet has a high probability of being ejected from the solar system after its most recent perihelion passage. Comet C/2017 U7 (PANSTARRS) became active shortly before our first run at SOAR on 2018-08-13, when its distance to the Sun was $r = 6.943 \text{ au}$, and its $Af\rho$ values increased from $Af\rho = 1662 \text{ cm}$ in 2018-09-15 (at $r = 6.827 \text{ au}$) to $Af\rho = 2398 \text{ cm}$ in 2019-09-19 (at $r = 6.417 \text{ au}$). Therefore, the activity started before perihelion and the dust production rates increased as the comet approached its perihelion. The fact that the activity started at $r \approx 7 \text{ au}$ suggests that the main mechanism responsible for the dust production is the transition from amorphous to crystalline water ice, and the measured values of $Af\rho$ are consistent with values reported for other comets that became active at large perihelion distances (Meech et al., 2009). If we assume that the derived absolute magnitude of $H = 10.87 \text{ mag}$ is representative of the nucleus, the comet C/2017 U7 (PANSTARRS) would be among the largest long-period comets observed so far (Fernández and Sosa, 2012).

C/2017 U7 (PANSTARRS) is also peculiar when compared to most other comets regarding its $g-r$ color: observations of the nucleus have values of $g-r$ smaller than what is observed for comets and centaurs, and the value of this color observed with the presence of the coma is even smaller. Both observations are only compatible with the $g-r$ colors of some TNOs and Centaurs. The low-resolution spectrum and the spectrophotometry in the SDSS system, obtained when the comet was active, show the presence of a large spectral feature similar to an absorption band centered around $0.595 \mu\text{m}$, which again is only similar to the spectra obtained from SDSS colors of some TNOs. The fact that the $g-r$ color of the nucleus is also peculiar suggests that this feature is possibly related to the composition of the material in the dust, rather than a product of the size distribution of the dust in the coma, and the lower values of $Af\rho$ obtained in the r filter could be related to the lower albedo of the dust in the corresponding spectral range.

A search for spectral analogs in the RELAB spectral database (RELAB, 2019) shows that a similar feature and overall spectral similarities

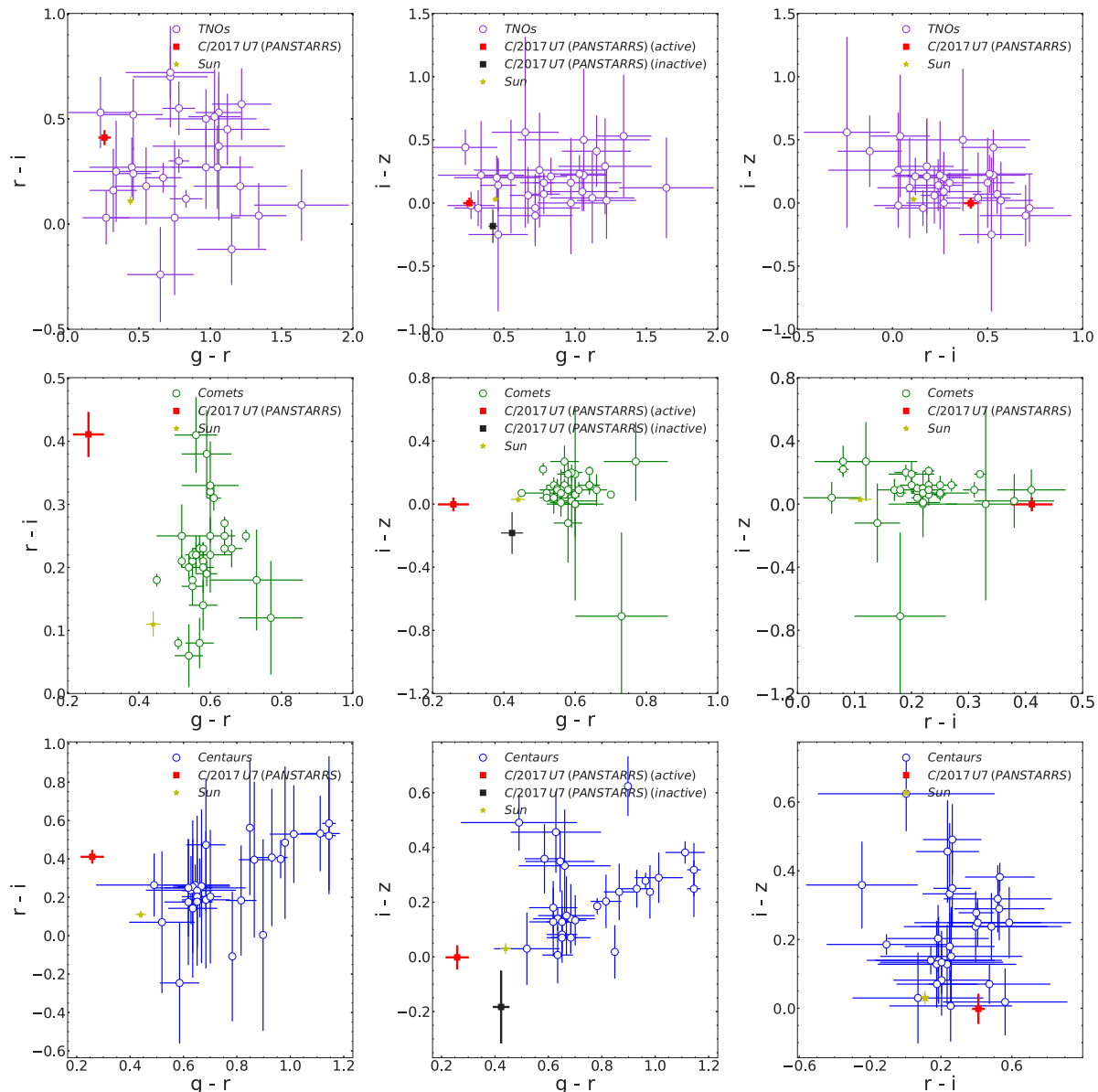


Fig. 7. Color-color diagrams of the colors for different minor bodies populations showing the color of C/2017 U7 (PANSTARRS) inactive (obtained from the DES) and active (obtained from the SOAR). The TNOs colors are from Terai et al. (2018); the comets colors are from Solonoi et al. (2012) and the Centaurs colors are from Ofek (2012), Peixinho et al. (2015).

in the visible can be reproduced by some bireflectance spectra of the organic material kerite. The presence of kerite-like (alongside other kerogen-like materials) on the surface of minor bodies was proposed by Moroz et al. (1992) as a possible explanation for the reddening in the visible spectra of P-, D-type asteroids. Also, kerite has been used as a proxy material for aliphatic-rich hydrocarbons to fit features in the 2.6 – 3.6 μm range in the spectra of minor bodies (De Sanctis et al., 2017), and aliphatic-rich hydrocarbons have been previously detected on comets (Raponi et al., 2020). To our knowledge, however, the presence of a spectral feature like the 0.595 μm band observed in C/2017 U7 (PANSTARRS) was never used as a proxy for the presence of aliphatic-rich hydrocarbons on asteroids or comets. Therefore, even if the presence of kerite-like materials is a plausible explanation for the observed 0.595 μm feature, it still fails to explain why the visible spectrum of C/2017 U7 (PANSTARRS) is peculiar when compared to the spectra of other comets, which in general present red, featureless spectra in the visible.

A tentative explanation for the unusual spectrum of C/2017 U7 (PANSTARRS) could be proposed considering three points: (1) the dependence of the spectral properties of kerogen-like material on grain

size; (2) the low ejection velocity of the assumed dust production mechanism, and (3) the unusually large size of the nucleus. Moroz et al. (1992) remark that the overall redness of the spectra of kerogen-like materials is strongly sensitive to particle size, showing as an example the fact that an asphaltite spectrum with particles in the range 100 – 200 μm is considerably less red than a spectrum of the same material with particles < 100 μm . The dependence of kerite spectra on particle size as judged by the spectra in the RELAB database is not so clear, however. Out of the nine related spectra in the database, the only one with particles in the range 100 – 200 μm does show both a clear band in the 0.595 μm and a neutral spectral inclination in the visible. However, the reddest spectra have particles < 200 μm , while an additional spectrum with this particle range presents an intermediate spectral inclination similar to the spectra obtained with particles < 100 μm , among which it is the best match spectrum shown in Fig. 10. This inconsistency however can be attributed to the processes involved in sample preparation, since while repeated sieving can in principle effectively limit particle sizes, the contribution of the smaller particles of samples without a defined lower limit depends on how each sample was ground. The available samples are consistent with the interpretation that the

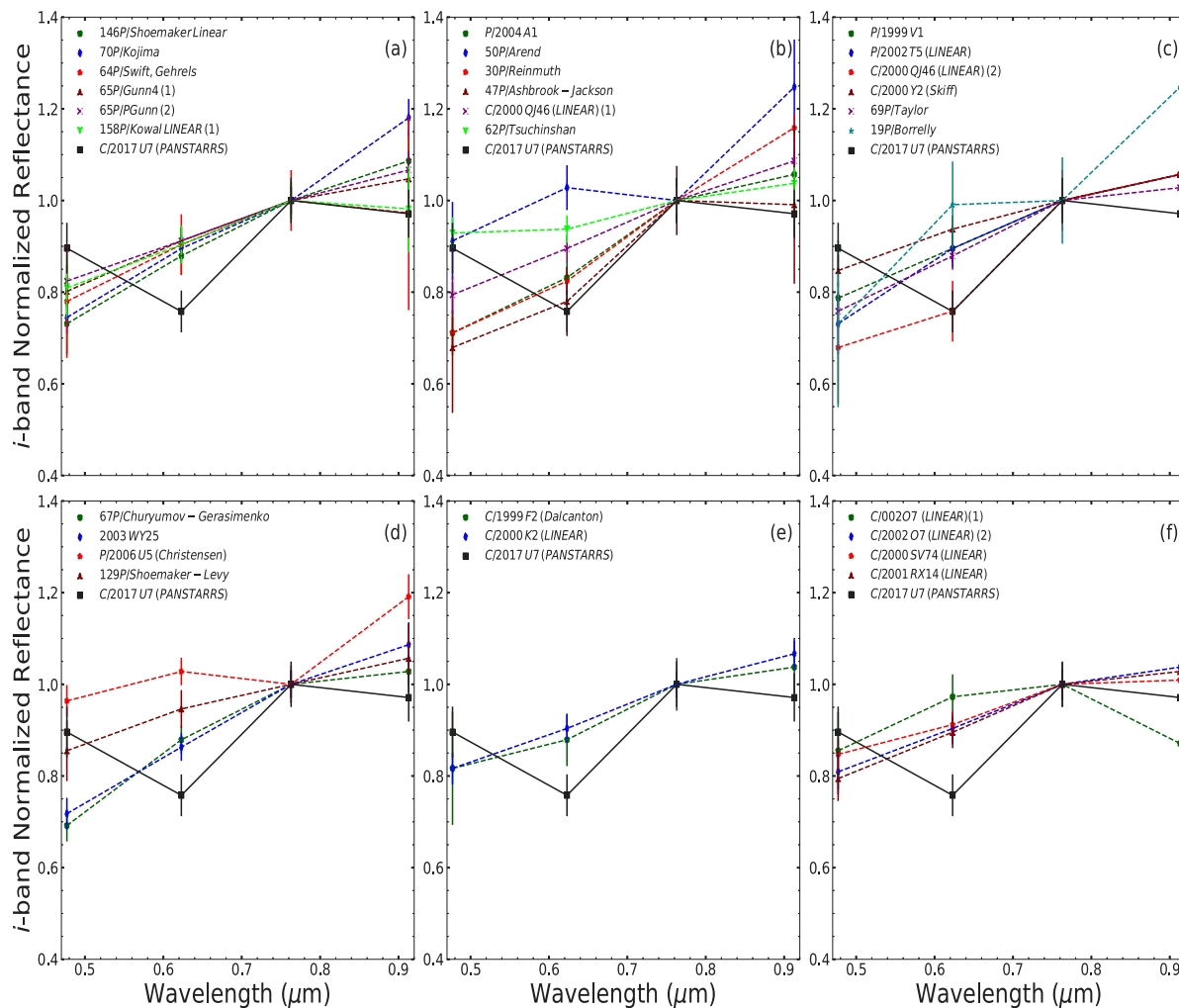


Fig. 8. Normalized reflectance spectra for comparing C/2017 (PANSTARRS) (aperture 1.95 arcsec) with different types of comets. In order to compare, we show: (a), (b), (c), (d) Jupiter Family Comets; (e) comets with no defined group and (f) hyperbolic comets. The Comets are from Solontoi et al. (2012).

reddening of the kerite spectra that masks the presence of the 0.595 μm band is caused by the predominance of particles $< 100 \mu\text{m}$. If that is so, the peculiar spectra and colors of C/2017 U7 (PANSTARRS) could be explained if we assume that both its surface and its coma have a higher contribution of larger organic-rich particles than most comets. This unusual particle size distribution may be a consequence of the fact that dust particles released due to the transition of amorphous to crystalline water ice tend to have low ejection velocities, with somewhat lower velocities for larger particles (Meech et al., 2009), and therefore the relatively larger escape velocity from the nucleus could produce a particle size segregation in the coma, with larger particles spreading at a slower pace and thus being more densely packed than smaller particles. Also, in this scenario the larger particles would be more likely to return to or to remain close to the surface, so this surface particle size segregation resulting from previous perihelion passages could also explain the unusual colors of the nucleus. At this point, however, we cannot rule out the possibility that the observed 0.595 μm feature could be due to other materials not contained in the comparison sample we used, or due to the combination of absorption bands of two or more materials, or just due to a peculiar distribution of particle sizes in the coma.

This hypothesis could be tested quantitatively with a model like the one presented by Rondón-Briceño et al. (2017), but for that it would be necessary to obtain a consistent set of optical constants for kerite, and a larger time coverage of the expansion of the coma would also be desirable. Work to this end is currently under way. If this

mechanism proves to be viable, it could also provide some insight on the spectral similarities observed with respect to the TNO population. It is worth noticing that C/2017 U7 (PANSTARRS) has a probable solar system origin, the unique spectral properties in addition to the non-null possibility of it being captured from interstellar space, might suggest that this latter scenario could also be plausible.

CRedit authorship contribution statement

M. Evangelista-Santana: Data reduction, Data analysis, Writing. **J.M. Carvano:** Co-ordination, Methodology, Data analysis, Writing. **M. De Prá:** Observing time proposal preparation, Observation, Data reduction, Data analysis, Writing. **R. de la Fuente Marcos:** Dynamical analysis. **C. Schambeau:** Cometary activity analysis, Observations, Writing. **J. Licandro:** Cometary activity analysis, Observations. **C. de la Fuente Marcos:** Dynamical analysis. **A.C. Souza-Feliciano:** Observations. **N. Pinilla-Alonso:** Observations.

Acknowledgments

M. Evangelista-Santana acknowledges funding through a CAPES PhD fellowship. J. M. Carvano acknowledges funding through a CNPq fellowship. M. De Prá acknowledges funding through the Preeminent Post-Doctoral Program (P3) at the University of Central Florida.

Based on observations obtained at the Southern Astrophysical Research (SOAR) telescope, which is a joint project of the Ministério da

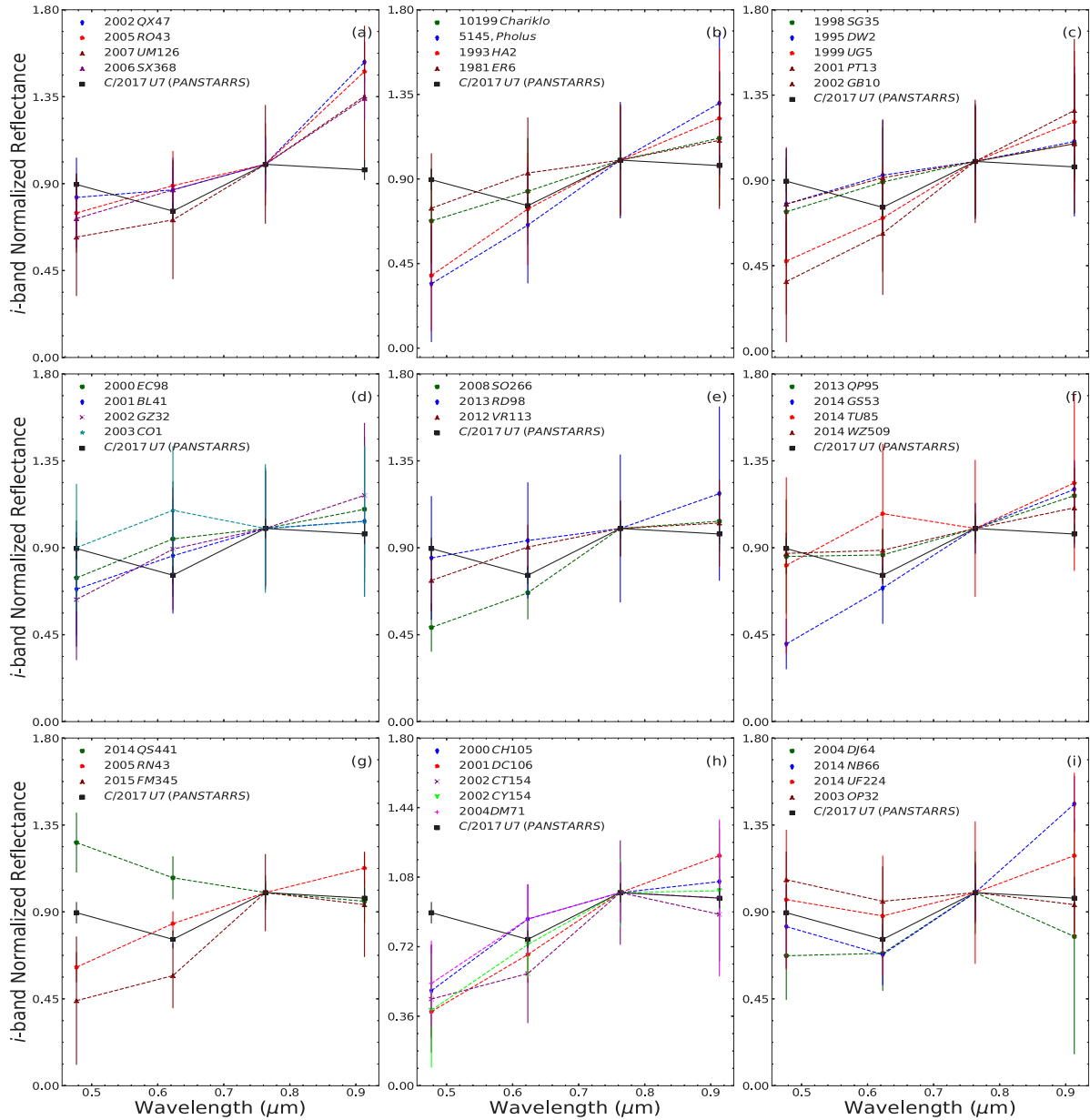


Fig. 9. Normalized reflectance spectra of Centaurs and TNOs populations in comparison with comet C/2017 (PANSTARRS). (a), (b), (c), (d) and (e) Centaurs ; (f), (g), (h) and (i) TNOs. The Centaurs are from Ofek (2012), Peixinho et al. (2015); the TNOs are from Terai et al. (2018).

Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI/LNA) do Brasil, the US National Science Foundation's NOIRLab, the University of North Carolina at Chapel Hill (UNC), and Michigan State University (MSU).

This project used public archival data from the Dark Energy Survey (DES). Funding for the DES Projects has been provided by the U.S. Department of Energy, the U.S. National Science Foundation, the Ministry of Science and Education of Spain, the Science and Technology Facilities Council of the United Kingdom, the Higher Education Funding Council for England, the National Center for Supercomputing Applications at the University of Illinois at Urbana-Champaign, the Kavli Institute of Cosmological Physics at the University of Chicago, the Center for Cosmology and Astro-Particle Physics at the Ohio State University, the Mitchell Institute for Fundamental Physics and Astronomy at Texas A&M University, Financiadora de Estudos e Projetos, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico and the Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, the Deutsche Forschungsgemeinschaft, and the Collaborating Institutions

in the Dark Energy Survey. The Collaborating Institutions are Argonne National Laboratory, the University of California at Santa Cruz, the University of Cambridge, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas-Madrid, the University of Chicago, University College London, the DES-Brazil Consortium, the University of Edinburgh, the Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Fermi National Accelerator Laboratory, the University of Illinois at Urbana-Champaign, the Institut de Ciències de l'Espai (IEEC/CSIC), the Institut de Física d'Altes Energies, Lawrence Berkeley National Laboratory, the Ludwig-Maximilians Universität München and the associated Excellence Cluster Universe, the University of Michigan, the National Optical Astronomy Observatory, the University of Nottingham, The Ohio State University, the OzDES Membership Consortium, the University of Pennsylvania, the University of Portsmouth, SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford University, the University of Sussex, and Texas A&M University. Based in part on observations at Cerro Tololo Inter-American Observatory, National Optical Astronomy Observatory, which is operated by the Association of Universities for

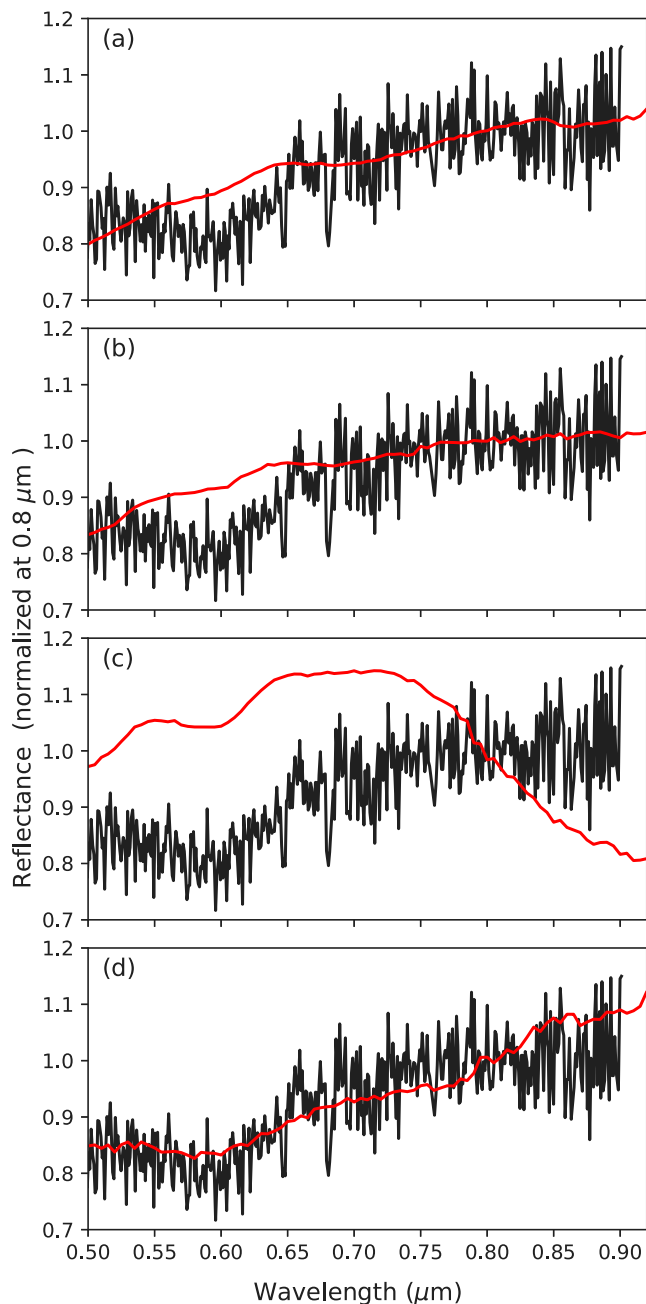


Fig. 10. Comparison of the reflectance spectra of C/2017 U7 (PANSTARRS) in black with selected RELAB spectra in red (spectral file name between parentheses): (a) unusual CI Tagish Lake (C1MT237B); (b) Iron Meteorite DRP78007 (CFMB47); (c) Mesosiderite Barea (C1MB33); (d) Kerite sample #13 (CAMS22).

Research in Astronomy (AURA) under a cooperative agreement with the National Science Foundation.

CdlFM and RdlFM thank S. J. Aarseth for providing one of the codes used in this research and A. I. Gómez de Castro for providing access to computing facilities. Part of the calculations and the data analysis were completed on the Brigit HPC server of the ‘Universidad Complutense de Madrid’ (UCM), and we thank S. Cano Alsúa for his help during this stage. This work was partially supported by the Spanish ‘Ministerio de Economía y Competitividad’ (MINECO) under grant ESP2017-87813-R.

References

Aarseth, S.J., 2003. *Gravitational N-Body Simulations*.

- A’Hearn, M.F., Schleicher, D.G., Millis, R.L., Feldman, P.D., Thompson, D.T., 1984. Comet Bowell 1980b. *Astron. J.* 89, 579–591. <http://dx.doi.org/10.1086/113552>.
- Alvarez-Candal, A., Pinilla-Alonso, N., Ortiz, J.L., Duffard, R., Morales, N., Santos-Sanz, P., Thirouin, A., Silva, J.S., 2016. Absolute magnitudes and phase coefficients of trans-neptunian objects. *Astron. Astrophys.* 586, A155. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201527161>, arXiv:1511.09401.
- Bauer, J.M., Grav, T., Fernández, Y.R., Mainzer, A.K., Kramer, E.A., Masiero, J.R., Spahr, T., Nugent, C.R., Stevenson, R.A., Meech, K.J., Cutri, R.M., Lisse, C.M., Walker, R., Dailey, J.W., Rosser, J., Krings, P., Ruecker, K., Wright, E.L., NEOWISE Team, 2017. Debiasing the NEOWISE cryogenic mission comet populations. *Astron. J.* 154 (2), 53. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aa72df>.
- Branham, J., 2013. New orbits for comets C/1960 M1 (humason), C/1980 E1 (bowell), and musings on extrasolar comets. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* 49, 111–116.
- Bressi, T.H., Camilleri, P., Oey, J., Gilmore, A.C., Kilmartin, P.M., Meech, K.J., Kleyna, J., Wipper, C., Micheli, M., Linder, T., Holmes, R., Miller, P., Gomez, E., Miles, R., Buzzi, L., Foglia, S., Bulger, J., Lowe, T., Schultz, A., Willman, M., Chambers, K., Chastel, S., Denneau, L., Flewelling, H., Huber, M., Lilly, E., Magnier, E., Wainscoat, R., Waters, C., Weryk, R., Abreu, D., Koschny, D., Knoefel, A., Busch, M., Schwab, E., Mattiazzo, M., Sato, H., Urbanik, M., Hale, A., Heinze, A., Weiland, H., Tonry, J., Fitzsimmons, A., Young, D., Stalder, B., Robinson, B., Erasmus, N., Armstrong, J.D., Teagarden, Z.N., Ryden, S.W., Moss, S.R., Kocsis, A., Nagy Melykúti, A., Sarneczky, K., Zalesak, T., 2020. COMET C/2017 U7 (PANSTARRS). *Minor Planet Electron. Circ.* 2020-F58.
- Bressi, T.H., Meech, K.J., Kleyna, J., Wipper, C., Micheli, M., Linder, T., Holmes, R., Miller, P., Gomez, E., Miles, R., Buzzi, L., Foglia, S., Bulger, J., Lowe, T., Schultz, A., Willman, M., Chambers, K., Chastel, S., Denneau, L., Flewelling, H., Huber, M., Lilly, E., Magnier, E., Wainscoat, R., Waters, C., Weryk, R., Abreu, D., Koschny, D., Knoefel, A., Busch, M., Schwab, E., Sato, H., Urbanik, M., Hale, A., Heinze, A., Weiland, H., Tonry, J., Fitzsimmons, A., Young, D., Stalder, B., Robinson, B., Erasmus, N., Ryden, S.W., Moss, S.R., Williams, G.V., 2018. A/2017 U7. *Minor Planet Electron. Circ.* 2018-E17.
- Buffoni, L., Scardia, M., Manara, A., 1982. The orbital evolution of comet Bowell (1980b). *Moon Planets* 26 (3), 311–315. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00928013>.
- Chebotaev, G.A., 1965. On the dynamical limites of the solar system. *Soviet Ast.* 8, 787.
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., 2012. On the dynamical evolution of 2002 VE₆₈. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 427 (1), 728–739. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21936.x>, arXiv:1208.4444.
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., 2015. Asteroid 2015 DB₂₁₆: a recurring co-orbital companion to uranus. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 453 (2), 1288–1296. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stv1725>, arXiv:1507.07449.
- de la Fuente Marcos, R., de la Fuente Marcos, C., 2018. Comet C/2017 K2 (PANSTARRS): Dynamically old or new? *Res. Notes Am. Astron. Soc.* 2 (2), 10. <http://dx.doi.org/10.3847/2515-5172/aabf8f>, arXiv:1804.07292.
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., 2019. Comet C/2018 V1 (Machholz-Fujikawa-Iwamoto): dislodged from the Oort Cloud or coming from interstellar space? *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 489 (1), 951–961. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stz2229>, arXiv:1908.02666.
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., Aarseth, S.J., 2018. Where the Solar system meets the solar neighbourhood: patterns in the distribution of radiants of observed hyperbolic minor bodies. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 476 (1), L1–L5. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/sly019>, arXiv:1802.00778.
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., Licandro, J., Serra-Ricart, M., Cabrera-Lavers, A., 2019. Ordinary Oort cloud Comets: An update on the past and future orbital evolution of C/2018 F4 (PANSTARRS). *Res. Notes Am. Astron. Soc.* 3 (10), 143. <http://dx.doi.org/10.3847/2515-5172/ab4888>.
- de León, J., Licandro, J., de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., Lara, L.M., Moreno, F., Pinilla-Alonso, N., Serra-Ricart, M., De Prá, M., Tozzi, G.P., Souza-Feliciano, A.C., Popescu, M., Scarpa, R., Font Serra, J., Geier, S., Lorenzi, V., Harutyunyan, A., Cabrera-Lavers, A., 2020. Visible and near-infrared observations of interstellar comet 2I/Borisov with the 10.4-m GTC and the 3.6-m TNG telescopes. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 495 (2), 2053–2062. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/staa1190>, arXiv:2005.00786.
- De Pra, M.N., Carvano, J., Morate, D., Pinilla-Alonso, N., Licandro, J., 2018. CANA: A Python package for the analysis of hydration in asteroid spectroscopic and spectrophotometric data. In: *AAS/Division For Planetary Sciences Meeting Abstracts #50*. In: *AAS/Division For Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 315.02.
- De Prá, M.N., Licandro, J., Pinilla-Alonso, N., Lorenzi, V., Rondón, E., Carvano, J., Morate, D., De León, J., 2020. The spectroscopic properties of the Lixiaohua family, cradle of main Belt Comets. *Icarus* 338, 113473. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113473>.
- De Sanctis, M.C., Ammannito, E., McSween, H.Y., Raponi, A., Marchi, S., Capaccioni, F., Capria, M.T., Carozzo, F.G., Ciarniello, M., Fonte, S., Formisano, M., Frigeri, A., Giardino, M., Longobardo, A., Magni, G., McFadden, L.A., Palomba, E., Pieters, C.M., Tosi, F., Zambon, F., Raymond, C.A., Russell, C.T., 2017. Localized aliphatic organic material on the surface of Ceres. *Science* 355 (6326), 719–722. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aaj2305>.
- Denneau, L., Jedicke, R., Grav, T., Granvik, M., Kubica, J., Milani, A., Vereš, P., Wainscoat, R., Chang, D., Pierfederici, F., Kaiser, N., Chambers, K.C., Heasley, J.N., Magnier, E.A., Price, P.A., Myers, J., Kleyna, J., Hsieh, H., Farnocchia, D.,

- Waters, C., Sweeney, W.H., Green, D., Bolin, B., Burgett, W.S., Morgan, J.S., Toney, J.L., Hodapp, K.W., Chastel, S., Chesley, S., Fitzsimmons, A., Holman, M., Spahr, T., Tholen, D., Williams, G.V., Abe, S., Armstrong, J.D., Bressi, T.H., Holmes, R., Lister, T., McMillan, R.S., Micheli, M., Ryan, E.V., Ryan, W.H., Scotti, J.V., 2013. The pan-STARRS moving object processing system. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 125 (926), 357. <http://dx.doi.org/10.1086/670337>, arXiv:1302.7281.
- Everhart, E., 1982. Evolution of long- and short-period orbits. In: Wilkening, L.L. (Ed.), *IAU Colloq. 61: Comet Discoveries, Statistics, And Observational Selection*. pp. 659–664.
- Fernández, J.A., Gallardo, T., Brunini, A., 2004. The scattered disk population as a source of oort cloud comets: evaluation of its current and past role in populating the Oort cloud. *Icarus* 172 (2), 372–381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2004.07.023>.
- Fernández, Y.R., Kelley, M.S., Lamy, P.L., Toth, I., Groussin, O., Lisse, C.M., A'Hearn, M.F., Bauer, J.M., Campins, H., Fitzsimmons, A., Licandro, J., Lowry, S.C., Meech, K.J., Pittichová, J., Reach, W.T., Snodgrass, C., Weaver, H.A., 2013. Thermal properties, sizes, and size distribution of Jupiter-family cometary nuclei. *Icarus* 226 (1), 1138–1170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2013.07.021>, arXiv:1307.6191.
- Fernández, J.A., Sosa, A., 2012. Magnitude and size distribution of long-period comets in earth-crossing or approaching orbits. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 423 (2), 1674–1690. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20989.x>, arXiv:1204.2285.
- Flaugher, B., Diehl, H.T., Honscheid, K., Abbott, T.M.C., Alvarez, O., Angstadt, R., Annis, J.T., Antonik, M., Ballester, O., Beaufore, L., Bernstein, G.M., Bernstein, R.A., Bigelow, B., Bonati, M., Boprie, D., Brooks, D., Buckley-Geer, E.J., Campa, J., Cardiel-Sas, L., Castand er, F.J., Castilla, J., Cease, H., Cela-Ruiz, J.M., Chappa, S., Chi, E., Cooper, C., da Costa, L.N., Dede, E., Derylo, G., DePoy, D.L., de Vicente, J., Doel, P., Drlica-Wagner, A., Eiting, J., Elliott, A.E., Emes, J., Estrada, J., Fausti Neto, A., Finley, D.A., Flores, R., Frieman, J., Gerdes, D., Gladders, M.D., Gregory, B., Gutierrez, G.R., Hao, J., Holland, S.E., Holm, S., Huffman, D., Jackson, C., James, D.J., Jonas, M., Karcher, A., Karliner, I., Kent, S., Kessler, R., Kozlovsky, M., Kron, R.G., Kubik, D., Kuehn, K., Kuhlmann, S., Kuk, K., Lahav, O., Lathrop, A., Lee, J., Levi, M.E., Lewis, P., Li, T.S., Mand richenko, I., Marshall, J.L., Martinez, G., Merritt, K.W., Miquel, R., Mu noz, F., Neilsen, E.H., Nichol, R.C., Nord, B., Ogando, R., Olsen, J., Palaio, N., Patton, K., Peoples, J., Plazas, A.A., Rauch, J., Reil, K., Rheault, J.P., Roe, N.A., Rogers, H., Roodman, A., Sanchez, E., Scarpine, V., Schindler, R.H., Schmidt, R., Schmitt, R., Schubnell, M., Schultz, K., Schurter, P., Scott, L., Serrano, S., Shaw, T.M., Smith, R.C., Soares-Santos, M., Stefanik, A., Stuermer, W., Suchyta, E., Sypniewski, A., Tarle, G., Thaler, J., Tighe, R., Tran, C., Tucker, D., Walker, A.R., Wang, G., Watson, M., Weaverdyck, C., Wester, W., Woods, R., Yanny, B., DES Collaboration, 2015. The dark energy camera. *Astron. J.* 150 (5), 150. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/150/5/150>, arXiv:1504.02900.
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J.E., Doi, M., Shimasaku, K., Schneider, D.P., 1996. The sloan digital sky survey photometric system. *Astron. J.* 111, 1748. <http://dx.doi.org/10.1086/117915>.
- Giorgini, J.D., 2015. Status of the JPL horizons ephemeris system. In: *IAU General Assembly*. 29, 2256293.
- Hainaut, O.R., Meech, K.J., Micheli, M., Belton, M.S.J., 2018. Rendezvous with 'oumuamua. *Messenger* 173, 13–16. <http://dx.doi.org/10.18727/0722-6691/5092>.
- Howell, S.B., 1990. CCD Growth curves: application to faint and crowded point sources. In: *Jacoby, G.H. (Ed.), CCDs In Astronomy*. In: *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 8, pp. 312–318.
- Hui, M.-T., 2018. Two hyperbolic baldheads in the solar system: 2017 U7 and 2018 C2. *Astron. J.* 156 (2), 73. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/aacd3>, arXiv:1806.06904.
- Jewitt, D., 2015. Color systematics of comets and related bodies. *Astron. J.* 150 (6), 201. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/150/6/201>, arXiv:1510.07069.
- Jurić, M., Ivezić, Ž., Lupton, R.H., Quinn, T., Tabachnik, S., Fan, X., Gunn, J.E., Hennessy, G.S., Knapp, G.R., Munn, J.A., Pier, J.R., Rockosi, C.M., Schneider, D.P., Brinkmann, J., Csabai, I., Fukugita, M., 2002. Comparison of positions and magnitudes of Asteroids observed in the sloan digital sky survey with those predicted for known Asteroids. *Astron. J.* 124 (3), 1776–1787. <http://dx.doi.org/10.1086/341950>, arXiv:astro-ph/0202468.
- Kaiser, N., 2004. Pan-STARRS: a wide-field optical survey telescope array. In: *Oschmann, J. (Ed.), Ground-Based Telescopes*. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 5489, pp. 11–22. <http://dx.doi.org/10.1117/12.552472>.
- Keller, S.C., Schmidt, B.P., Bessell, M.S., Conroy, P.G., Francis, P., Granlund, A., Kowald, E., Oates, A.P., Martin-Jones, T., Preston, T., Tisserand, P., Vaccarella, A., Waterson, M.F., 2007. The SkyMapper telescope and the southern sky survey. *Publ. Astron. Soc. Aust.* 24 (1), 1–12. <http://dx.doi.org/10.1071/AS07001>, arXiv:astro-ph/0702511.
- Królikowska, M., Dybczyński, P.A., 2017. Oort spike comets with large perihelion distances. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 472 (4), 4634–4658. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stx2157>, arXiv:1708.09248.
- Królikowska, M., Dybczyński, P.A., 2018. Dynamical evolution of C/2017 K2 PANSTARRS. *Astron. Astrophys.* 615, A170. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201832917>, arXiv:1802.10380.
- Licandro, J., de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., de León, J., Serracart, M., Cabrera-Lavers, A., 2019. Spectroscopic and dynamical properties of comet C/2018 F4, likely a true average former member of the Oort cloud. *Astron. Astrophys.* 625, A133. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201834902>, arXiv:1903.10838.
- Licandro, J., Serracart, M., Oscoz, A., Casas, R., Osip, D., 2000. The effect of seeing variations in time-series CCD inner coma photometry of Comets: A new correction method. *Astron. J.* 119 (6), 3133–3144. <http://dx.doi.org/10.1086/301406>.
- Luu, J.X., Jewitt, D.C., 1992. High resolution surface brightness profiles of near-earth Asteroids. *Icarus* 97 (2), 276–287. [http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(92\)90134-S](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(92)90134-S).
- Makino, J., 1991. Optimal order and time-step criterion for Aarseth-type N-body integrators. *Astrophys. J.* 369, 200. <http://dx.doi.org/10.1086/169751>.
- Martino, S., Tancredi, G., Monteiro, F., Lazzaro, D., Rodrigues, T., 2019. Monitoring of asteroids in cometary orbits and active asteroids. *Planet. Space Sci.* 166, 135–148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2018.09.001>.
- Meech, K.J., Pittichová, J., Bar-Nun, A., Natesco, G., Laufer, D., Hainaut, O.R., Lowry, S.C., Yeomans, D.K., Pitts, M., 2009. Activity of comets at large heliocentric distances pre-perihelion. *Icarus* 201 (2), 719–739. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2008.12.045>.
- Meech, K.J., Yang, B., Kleyna, J., Hainaut, O.R., Berdyugina, S., Keane, J.V., Micheli, M., Morbidelli, A., Wainscoat, R.J., 2016. Inner solar system material discovered in the oort cloud. *Sci. Adv.* 2, e1600038. <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1600038>.
- Moroz, L.V., Pieters, C.M., Akhmanova, M.V., 1992. Why the surfaces of outer belt Asteroids are dark and red? In: *Lunar And Planetary Science Conference*. In: *Lunar and Planetary Science Conference*, vol. 23, p. 931.
- Ofek, E.O., 2012. Sloan digital sky survey observations of kuiper belt objects: Colors and variability. *Astrophys. J.* 749 (1), 10. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/749/1/10>, arXiv:1202.1538.
- Oort, J.H., 1950. The structure of the cloud of comets surrounding the solar system and a hypothesis concerning its origin. *Bull. Astron. Inst. Netherlands* 11, 91–110.
- Park, R.S., Folkner, W.M., Williams, J.G., Boggs, D.H., 2021. The JPL planetary and lunar ephemerides DE440 and DE441. *Astron. J.* 161 (3), 105. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/abd414>.
- Peixinho, N., Delsanti, A., Doressoundiram, A., 2015. Reanalyzing the visible colors of centaurs and KBOS: what is there and what we might be missing. *Astron. Astrophys.* 577, A35. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201425436>, arXiv:1502.04145.
- Portegies Zwart, S., Torres, S., Cai, M.X., Brown, A.G.A., 2021. Oort cloud ecology. II. the chronology of the formation of the oort cloud. *Astron. Astrophys.* 652, A144. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/202040096>, arXiv:2105.12816.
- Raponi, A., Ciarniello, M., Capaccioni, F., Mennella, V., Filacchione, G., Vinogradoff, V., Poch, O., Beck, P., Quirico, E., De Sanctis, M.C., Moroz, L., Kappel, D., Erard, S., Bockelée-Morvan, D., Longobardo, A., Tosi, F., Palomba, E., Combe, J.P., Rousseau, B., Arnold, G., Carlson, R.W., Pommerol, A., Pilorget, C., Fornasier, S., Bellucci, G., Barucci, A., Mancaella, F., Formisan, M., Rinaldi, G., Istiqomah, I., Leyrat, C., 2020. Infrared detection of aliphatic organics on a cometary nucleus. *arXiv e-prints*, arXiv:2009.14476.
- RELAB, 2019. RELAB spectral database. http://www.planetary.brown.edu/relabdocs/relab_disclaimer.htm, Version: 2019-12-31.
- Rondón-Briceño, E., Carvano, J.M., Lorenz-Martins, S., 2017. A study of the effects of faint dust comae on the spectra of asteroids. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 468 (2), 1556–1566. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stx536>.
- Solonto, M., Ivezić, Ž., Jurić, M., Becker, A.C., Jones, L., West, A.A., Kent, S., Lupton, R.H., Claire, M., Knapp, G.R., Quinn, T., Gunn, J.E., Schneider, D.P., 2012. Ensemble properties of comets in the sloan digital sky survey. *Icarus* 218 (1), 571–584. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2011.10.008>, arXiv:1202.3999.
- Stern, S.A., Weissman, P.R., 2001. Rapid collisional evolution of comets during the formation of the Oort cloud. *Nature* 409 (6820), 589–591.
- Terai, T., Yoshida, F., Ohtsuki, K., Lykawka, P.S., Takato, N., Higuchi, A., Ito, T., Komiyama, Y., Miyazaki, S., Wang, S.-Y., 2018. Multi-band photometry of transneptunian objects in the Subaru Hyper Suprime-Cam survey. *Publ. Astron. Soc. Japan* 70, S40. <http://dx.doi.org/10.1093/pasj/psx105>, arXiv:1704.05941.
- Weissman, P.R., 1982. Dynamical history of the oort cloud. In: *Wilkening, L.L. (Ed.), IAU Colloq. 61: Comet Discoveries, Statistics, And Observational Selection*. pp. 637–658.

Capítulo 5

Um estudo sobre o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS)

Apresentaremos a seguir um estudo sobre a caracterização do cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) e a diminuição da atividade ao se aproximar do periélio.

5.1 O cometa C/2021 O3 (PANSTARRS)

Nesta seção apresentaremos o estudo sobre o cometa hiperbólico C/2021 O (PANSTARRS) durante sua passagem pelo Sistema Solar interior, na Tabela 5.1 estão resumidas as características orbitais do cometa. As observações foram realizadas a partir do SOAR e do OASI entre outubro de 2021 e janeiro de 2022. Conforme será detalhado adiante, nossas observações mostraram um cometa de baixa atividade quando comparado com cometas de longo período, com um decréscimo no brilho a medida que o cometa se aproximava de seu periélio, e isto poderia sugerir que o cometa esteja em uma transição para um objeto com característica asteroidal.

O cometa foi descoberto em 26 de julho de 2021 pelo *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System* (Kaiser, 2004) quando distava 4,3 ua do Sol, movendo-se em direção ao periélio a 0,287 ua (22 de abril de 2022). O objeto tem excentricidade $> 1,0$, portanto de acordo com sua órbita atual é classificado como um objeto hiperbólico. Durante a descoberta, o cometa foi descrito como um objeto com coma "tênue", sugerindo a existência de coma sem cauda. Por limitações da geometria de observações houveram poucas observações nas datas próximas ao periélio, entretanto, observações realizadas pelo Lowell (LDT) de abril de 2022 não detectaram o objeto, e partir dessa não detecção do cometa foi reportado que o cometa teria passado por um evento de fragmentação (Zhang et al., 2022). Todavia, observações suplementares e descrições de astrônomos amadores revelaram que o cometa sobreviveu à passagem do periélio.

Param. Orbitais	Antes da desintegração		Depois da desintegração	
	Heliocêntrica	Baricentro	Heliocêntrico	Baricentro
Excetri., e	= 1,000137±0,000002	0,999570	1,000077±0,000009	1,004408
Dist. P, q (au)	= 0,287305±0,000002	0,284271	0,287362±0,000003	0,297149
Incl., $i(^{\circ})$	= 56,7598±0,0004	56,6510	56,7937±0,0003	56,7254
Temp P, T_a (JD)	= 2459690,5409±0,0007	2459689,7972	2459690,5455±0,0002	2459690,3077

Tabela 5.1: Parâmetros orbitais do cometa hiperbólico C/2021 O3 (PANTARRS) antes e depois da desintegração.

5.1.1 Sobre a dinâmica

Foi realizado um estudo dinâmico pelos colaboradores dinamicistas da Universidad Complutense de Madrid. Na Tabela 5.1 são mostradas as órbitas antes e depois da passagem pelo periélio. Esse encontro relativamente próximo com o Sol desempenhou um papel importante na evolução orbital do objeto, sendo assim realizado um estudo considerando os parâmetros antes do evento da possível desintegração e como ele evoluirá depois disso. A interpretação mais direta desses resultados é que o C/2021 O3 (PANSTARRS) considerando os dados de antes dessa suposta desintegração parcial, mostrou ser um cometa dinamicamente antigo, com uma provável origem no sistema solar. Na ausência da desintegração parcial, o cometa seria certamente ejetado do Sistema Solar, mas, uma vez que a aproximação com o Sol, era suficientemente pequena para fornecer aceleração suficiente para alcançar o espaço interestelar se não for totalmente interrompido em passagens subsequentes do periélio.

5.1.2 O estudo observacional

Nós realizamos observações espectroscópicas na região do visível abrangendo a região entre $0,5 - 0,9\mu\text{m}$ e imageamento na banda r do sistema SDSS em 14 de outubro de 2021 a partir do telescópio SOAR. Essas medidas foram feitas em uma janela observacional do projeto: **SO2021B-002 Characterizing of the hyperbolic comet C/2018 U1(Lemmon)**. As observações feitas entre novembro de 2021 e janeiro de 2022 foram realizadas a partir do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) nas bandas g , r , i , z do sistema SDSS. A Tabela 5.2 mostra o resumo e geometria das observações, enquanto a Figura 5.1 a distribuição das observações ao longo da órbita do cometa. Os dados obtidos a partir do telescópio SOAR, tanto no modo espectroscópico quanto fotométrico, foram reduzidos usando *Image Reduction and Analysis Facility (IRAF)* sendo subtraídos por bias e divididos por flat normalizado, este último obtido no modo flat de domo. Já as correções dos dados científicos obtidos a partir do OASI foram feitas subtraindo dark e dividindo por flat normalizado usando um conjunto de rotinas agrupados no pipeline desenvolvido pelo Dr. J.M Carvano para o Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica

(OASI). A proposta do pipeline é realizar todo o processo de redução fotométrica, entretanto como ainda não foi implementado uma rotina para detecção de cometas e como a ciência que propomos exige algumas tarefas específicas, nós realizamos os demais passos da redução com o IRAF. As sequências de imagens com mesmo filtro e mesmo tempo de exposição, tanto as obtidas a partir do OASI quanto do SOAR, foram alinhadas e combinadas usando médias com a finalidade de aumentar a relação sinal-ruído, para a seguir, com a tarefa DIGIPHOT do pacote APPHOT do IRAF aplicar a fotometria de abertura. Todas as calibrações foram feitas usando um conjunto de estrelas do campo, considerando as mais isoladas e com abertura grande o suficiente para minimizar efeitos da variabilidade do seeing. Os dados das estrelas do campo foram calibrados usando estrelas obtidas a partir de magnitudes listadas do SDSS (Fukugita et al., 1996). Para os dados espectroscópicos, depois das correções por bias e flat, nós extraímos o espectro 2D do cometa e das estrelas análogas solares usando a tarefa APALL do IRAF, centrando no optocentro do cometa. Quanto a escolha da abertura para extração do espectro do cometa, nós fizemos o teste com várias aberturas, e por fins de comparação com os dados fotométricos nós extraímos o espectro do cometa usando a mesma abertura que adotamos nas análises fotométricas, 10.000 km de raio a partir do optocentro). A seguir extraímos o fundo do céu em uma região livre da influência da fonte, em especial para o cometa, a fim de garantir que a região do céu foi estimada fora da influência da coma. Na sequência, os espectros obtidos do cometa e os espectros das estrelas foram calibrados em comprimento de onda usando a lampada HgArNe e somente depois é que combinamos os espectros para aumentar a relação sinal-ruído. Finalmente, o espectro do cometa pode ser dividido por cada análoga solar e combinado para produzir o espectro médio usando todas as divisões anteriores (cometa por cada análoga solar).

Sítio	Data	Filtros/espectro	$\Delta_{(ua)}$	$r_{sol(ua)}$	$\alpha(^{\circ})$
SOAR	2021 – 10 – 14	(0.5 – 0.9)	2,587	3,348	12,5
SOAR	2021 – 10 – 14	<i>r</i> -band	2,587	3,348	12,5
OASI	2021 – 11 – 02	<i>g</i> -, <i>r</i> -, <i>i</i> -band	2,563	3,104	17,0
OASI	2021 – 11 – 03	<i>g</i> -, <i>r</i> -band	2,563	3,090	17,2
OASI	2021 – 11 – 05	<i>g</i> -, <i>r</i> -, <i>i</i> -, <i>z</i> -band	2,565	3,064	17,4
OASI	2021 – 12 – 06	<i>g</i> -, <i>r</i> -, <i>i</i> -band	2,627	2,640	21,0
OASI	2021 – 12 – 07	<i>r</i> -band	2,629	2,626	21,6
OASI	2021 – 12 – 09	<i>g</i> -, <i>r</i> -band	2,633	2,598	21,7
OASI	2022 – 01 – 04	<i>g</i> -, <i>r</i> -band	2,645	2,261	21,3

Tabela 5.2: Observações realizadas para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS). Δ : distancia geocêntrica, *r*: distancia heliocêntrica, e α : ângulo de fase.

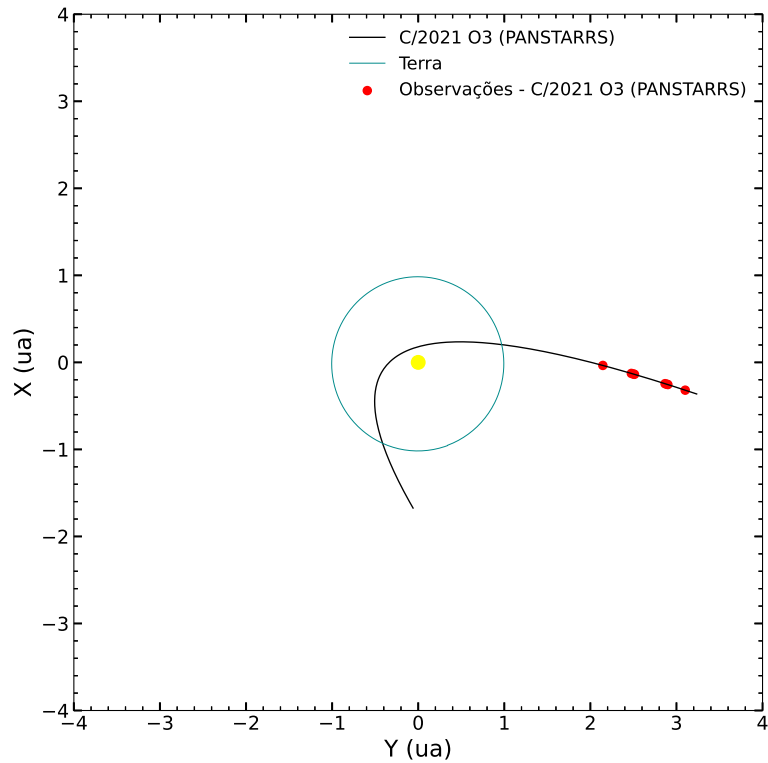


Figura 5.1: Órbita do C/2021 O3 (PANSTARRS) com destaque para as observações analisadas neste trabalho.

5.1.3 Evolução da coma

A primeira classificação quanto a atividade do cometa foi feita comparando o perfil radial deste com um grupo de estrelas do campo, para avaliar o grau de atividade. Essa comparação é mostrada na Figura 5.2 onde pode ser observada uma coma compacta sem estrutura de cauda detectada.

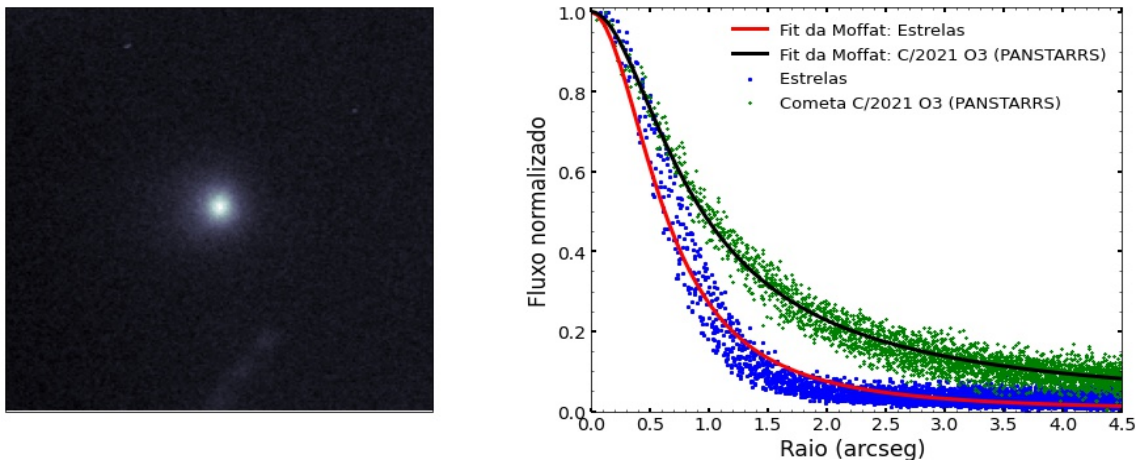


Figura 5.2: Perfil radial de um grupo de estrela comparando com o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS)

5.1.4 Magnitude e produção de poeira

A magnitude aparente do cometa, usando a equação 3.3 foi adotada usando uma abertura fixa de 10.000 km, centrada no optocentro. A seguir, nós adotamos as magnitudes calibradas obtidas na banda r do sistema SDSS, e as corrigimos pelas distâncias geocêntrica e heliocêntrica. Para isso, usando a equação

$$H(1, 1, \alpha) = m_{cal} - 5\log_{10}(r_h\Delta), \quad (5.1)$$

onde m_{cal} é a magnitude calibrada, r_h é a distância heliocêntrica, Δ é a distância geocêntrica. Quando comparamos as magnitudes corrigidas pelas distâncias geocêntrica e heliocêntrica obtidas em 14 de outubro de 2021, data da primeira observação, com as obtidas em 4 de janeiro de 2022 notamos um incremento de $0,44 \pm 0,06$ na magnitude, e isto se dá ao passo que a distância heliocêntrica decresce de 3,348 para 2,361 ua.

Diante dessa característica, nós avaliamos a produção de poeira, através do parâmetro do $Af\rho$ como descrito na Seção 3.6 deste trabalho. Este parâmetro não depende do tamanho da abertura adotada, e assume-se que a coma é esféricamente simétrica e em estado estacionário. A função da produção de poeira geralmente cai com o aumento da distância heliocêntrica. No entanto, para alguns objetos tem sido observado que pequenas ejeções de material podem causar aumentos esporádicos no aumento do $Af\rho$ seguidos de decréscimo.

Tabela 5.3: Valores $Af\rho$ para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS), derivados a partir dos filtros do sistema SDSS, com referência para a abertura de $\rho = 10^4$ km e centrada no optocentro do cometa.

Data	Filtro	Magnitude (1,1, α) ($\rho = 10^4$ km)	$Af\rho$ (cm) ($\rho = 10^4$ km)	$Af\rho_{max}$	ρ_{max} (km)
2021-10-14	banda r	13,04 \pm 0,03	82,64 \pm 2,31	119,23 \pm 2,80	3494,60
2021-11-02	banda r	13,32 \pm 0,05	64,43 \pm 3,10	81,80 \pm 2,90	4819,60
2021-11-03	banda r	13,36 \pm 0,02	62,15 \pm 3,00	75,00 \pm 3,00	5783,50
2021-11-05	banda r	13,21 \pm 0,04	71,00 \pm 1,65	94,00 \pm 1,72	4501,80
2021-12-06	banda r	13,46 \pm 0,04	57,24 \pm 2,41	70,60 \pm 1,60	4939,93
2021-12-07	banda r	13,49 \pm 0,03	57,64 \pm 3,30	64,21 \pm 3,13	6921,17
2021-12-09	banda r	13,45 \pm 0,06	57,11 \pm 3,40	72,80 \pm 3,10	4621,13
2022-01-04	banda r	13,48 \pm 0,05	55,80 \pm 3,10	63,10 \pm 3,00	6290,60

Para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS), conforme mostrado na Figura 5.3 é possível observar um decréscimo da atividade do cometa a medida que os dias passam, conseqüentemente, o tempo de periélio se aproxima. Ademais, ao longo dos dias de observação foi possível observar pequenas variações na distribuição espacial da poeira, especialmente as observações do dia 5 de outubro de 2021, se compararmos com os demais dias, possivelmente causadas por pequenas ejeções que fizeram com

que mais material fosse lançado para a coma. A produção de poeira, portanto, a distribuição das partículas na coma, é típica de cometas da família de Júpiter (Borysenko et al., 2020, 2019, 2022; Ivanova, 2020)

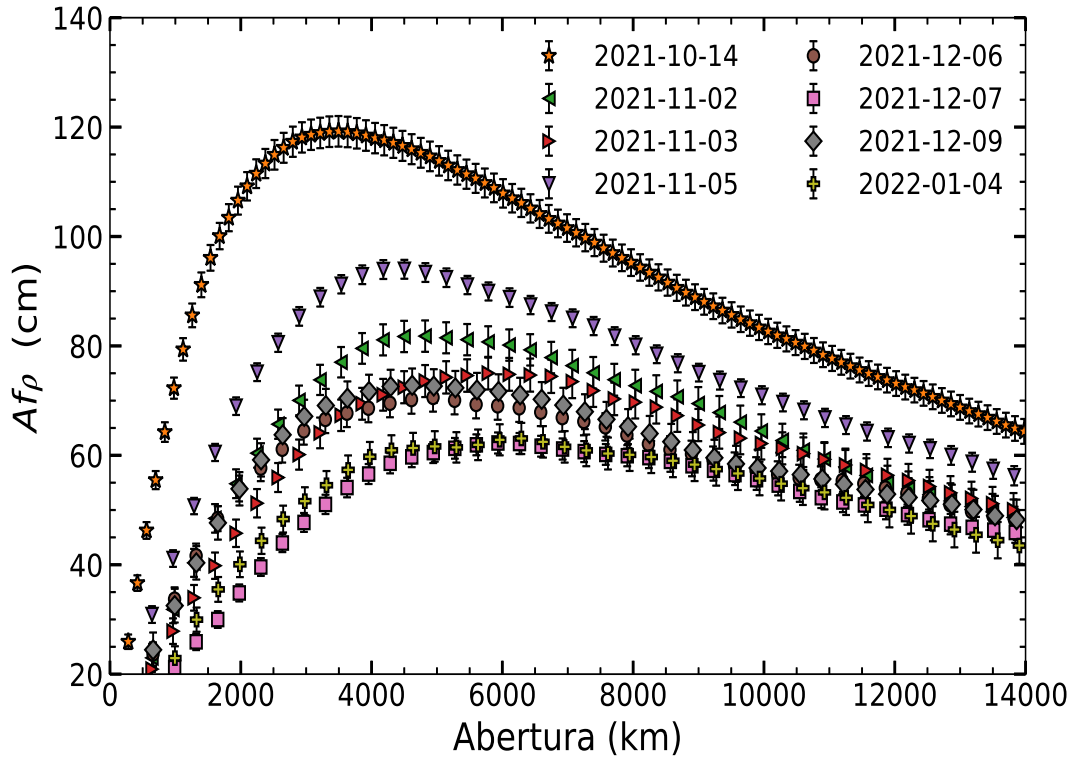


Figura 5.3: Variação da produção de poeira, $Af\rho$ para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) ao longo dos meses de observação.

Na Figura 5.4 são mostrados três gráficos do $Af\rho$ considerando um $\rho = 10.000\text{km}$ em função da distância heliocêntrica (todas essas distâncias correspondem a medidas obtidas antes do periélio), os gráficos (a), (b) e (c) são os valores de $Af\rho$ nas bandas fotométricas g, r e i do sistema SDSS, respectivamente. Esses valores da produção de poeira mostram que a atividade do cometa decresce durante todo o período de observações (14 de outubro de 2021 a 4 de janeiro de 2022), a medida que a distância heliocêntrica diminui gradualmente de 3,348 ua para 2,261 ua e continua movendo-se em direção ao periélio.

5.1.5 Propriedades Espectrais

Nós usamos o pacote CANA (De Pra et al., 2018b) para caracterizar as propriedades espectrais do cometa C/2021 O3 (PANSTARRS). Para isto é usado a inclinação espectral S' como proposto por A'Hearn et al. (1984) e como descrito na Seção 3.5 e Equação 3.5. Para o espectro obtido a partir do SOAR em 14 de outubro de 2021, nós calculamos um gradiente espectral de $S' = 9,90 \pm 0,35$ ($\%por10^3$) a

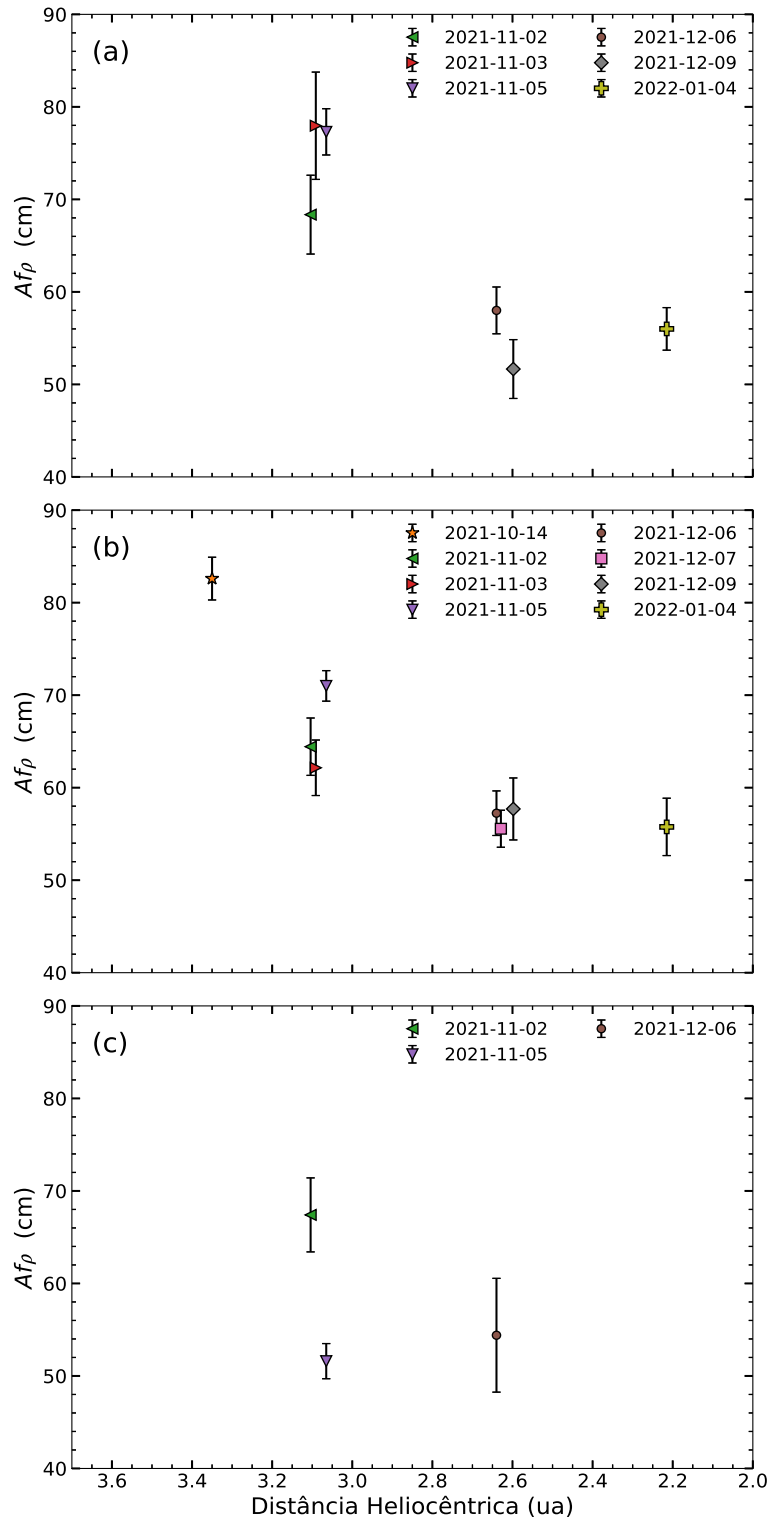


Figura 5.4: Produção de poeira $Af\rho$, considerando $\rho = 10.000$ km, em função da distância heliocêntrica. No gráfico (a) são mostrados os valores de $Af\rho$ considerando a banda g do sistema SDSS; no gráfico (b) são mostrados os valores de $Af\rho$ para a banda r do sistema SDSS e no gráfico (c) são mostrados o $Af\rho$ para a banda i do sistema SDSS.

partir do espectro normalizado em $0,62\mu\text{m}$ e considerando a região $0,47 - 0,62\mu\text{m}$. Vale salientar que na literatura é mais comum a normalização em $0,55\mu\text{m}$, entretanto a fim de comparar a inclinação do espectro obtido no SOAR com as inclinações espectrais obtidas a partir da fotometria do OASI, nós optamos por normalizar na mesma região do comprimento de onda central do filtro na banda r do sistema SDSS. Numa outra análise, também realizada usando o pacote CANA, nós classificamos taxonomicamente o cometa como sendo similar aos asteroides tipo D, que, está dentro do que é esperado para corpos primitivos.

Para completar nossa análise espectral e comparar nossos dados fotométricos obtidos a partir do OASI, nós também calculamos o gradiente espectral a partir das cores fotométricas, considerando a região espectral coberta nos filtros nas bandas g e r do sistema SDSS. Para isso consideramos $\lambda_g = 0,477$ e $\lambda_r = 0,6231$ como sendo os comprimentos de onda centrais, $(m_g - m_r)$ as cores do cometa e $(m_g - m_r)_\odot$ são as cores do Sol¹ nas bandas fotométricas g e r, respectivamente. Os valores obtidos são similares aos cometas e asteroides em órbitas cometárias, exceto, a inclinação obtida no dia 5 de novembro. Por fins de comparação dessas inclinações espectrais com o grau de atividade, a distribuição de partículas na coma, nós mostramos a inclinação espectral em função da produção de poeira, $Af\rho$. Na Figura 5.5 são mostrados como o gradiente espectral vai variando em função da produção de poeira do cometa, e embora, tenhamos poucos pontos, notamos que as maiores inclinações estão associadas aos pontos de menor atividade cometária e possivelmente à distribuição de tamanho das partículas.

Na figura 5.6 temos a comparação do espectro de baixa resolução obtido a partir do SOAR em 14 de outubro e o espectro fotométrico derivado a partir das cores fotométrica, conforme descrito na Seção 3.4 e seguindo a Equação 3.4. Comparando os resultados descritos anteriormente, onde o brilho cometário e o $Af\rho$ decrescem a medida que a distância heliocêntrica diminui, a inclinação espectral aumenta conforme pode ser notado tanto pela Figura 5.5 quanto pela Figura 5.6, exceto para os dados obtidos em 5 de novembro de 2021, que apresentam uma característica pouco usual quando comparado com os demais. Possivelmente essa tendência de decréscimo seja dominada pelo espalhamento da luz do sol pelas partículas de poeira da coma, enquanto o espectro pouco usual pode ter sido causado por uma ejeção extra de poeira.

5.1.6 Comparação com outros grupos de cometas

Nós comparamos na Figura 5.7 o $\log(Af\rho)$ de populações de cometas de longo período, cometas de curto período e Asteroides ativos com as medidas do cometa

¹<http://classic.sdss.org/dr5/algorithms/sdssUBVRITransform.html>

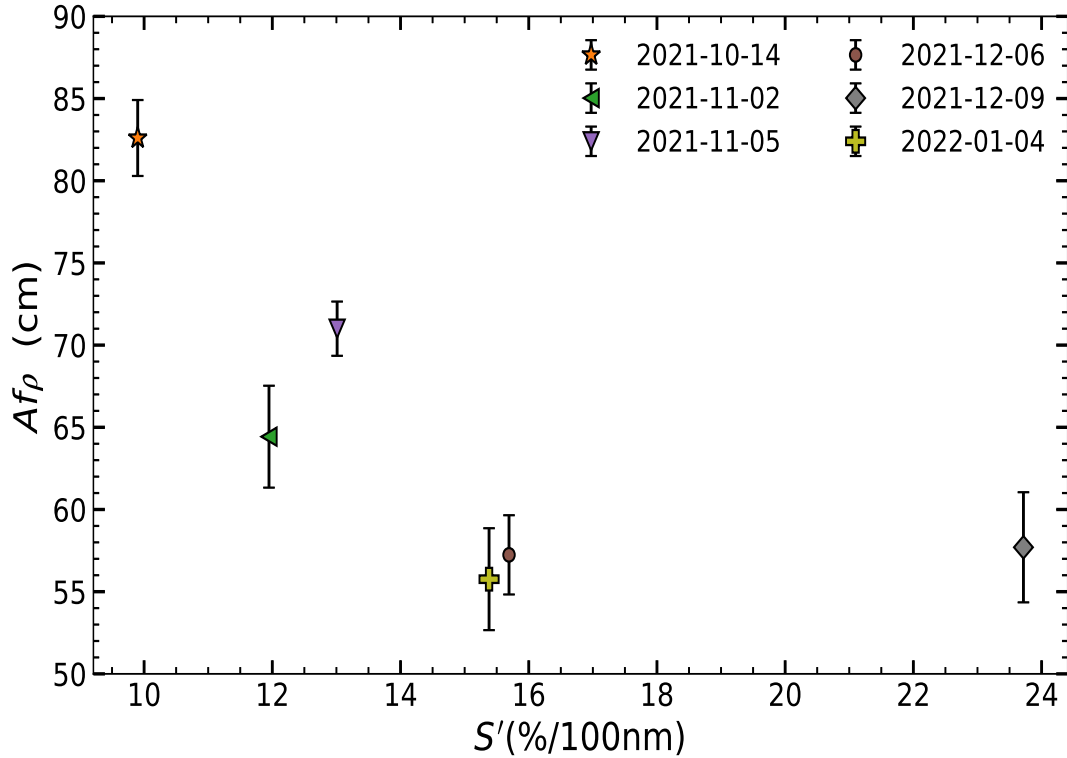


Figura 5.5: Variação da inclinação espectral em função da produção de poeira, $Af\rho$ para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) ao longo dos meses de observação.

C/2021 O3 (PANSTARRS). Este parâmetro mostra ser significativamente maior para a grande maioria dos cometas de longo período em comparação aos cometas de curto período, incluído a população dos cometas da família de Júpiter. E isto é compreensível de imaginar, uma vez que os cometas de curto período já passaram por múltiplos periélios e seus voláteis superficiais diminuem a cada passagem, outro caso dessa diferença entre os cometas de longo e curto período pode ser causado pelo tamanho das partículas da coma, uma vez que o parâmetro de $Af\rho$ é dominado pela distribuição de tamanho das partículas. Para o caso do cometa C/2021 O3 (PANSTARRS), nós podemos observar um comportamento fora do que é esperado para cometas de longo período, uma possível explicação pode ser respondida com um estudo dinâmico (Evangelista-Santana **in prep**)

5.2 Conclusão

Neste capítulo, apresentamos um estudo sobre as propriedades físicas do cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) obtido com OASI e SOAR que serviram para derivar a classe espectral e o espectro visível, bem como caracterizar seu nível de atividade. Nossas conclusões podem ser resumidas da seguinte forma:

O cometa foi classificado como um cometa dinamicamente velho. Ademais dados

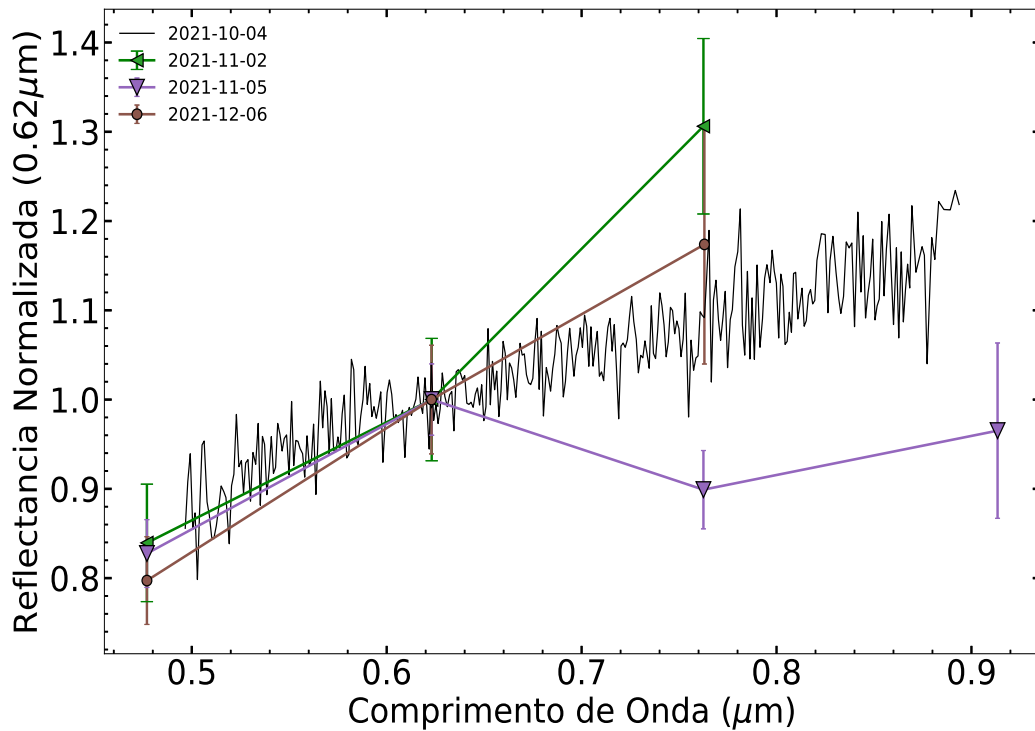


Figura 5.6: Reflectância espectral normalizado em $0.62\mu\text{m}$ do cometa C/2021 O3 (PANSTARRS).

observacionais publicados por Zhang et al. (2022) mostraram que o cometa não sobreviveu, embora dados posteriores reportados por astrônomos amadores mostraram que o cometa pode ter sobrevivido à passagem pelo periélio.

Quanto às análises observacionais, nosso estudo mostrou um cometa com baixa atividade e essa atividade diminuiu a medida que o cometa se aproximava do periélio. Tais medidas foram coletadas entre os meses de outubro de 2021 e janeiro de 2022 e durante esse período o cometa variou de 3,348 unidades astronômicas para 2,261 unidades astronômicas do Sol. Considerando uma abertura fixa em 10^4 km, nós obtivemos $Af\rho = 82,04 \pm 2,31\text{cm}$ para a primeira data de observação e $Af\rho = 55,80 \pm 3,10\text{cm}$ para a última data. Mas ao longo dos dias de observação nós observamos que houve variações, possivelmente causadas por ejeções que fizeram com que mais material fosse lançado à coma.

As análises espectrais mostraram um cometa taxonomicamente similar aos asteroides tipo D. Um ponto que é interessante é que a inclinação espectral tende a aumentar quando o $Af\rho$ diminui. E quando comparamos o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) com outras medidas de cometas, nós podemos notar que quanto ao parâmetro da produção de poeira o cometa é similar aos cometas de curto período. Ademais, o decréscimo da atividade a medida que o cometa se aproximou do periélio e a classificação como cometa dinamicamente velho pode sugerir a possibilidade de

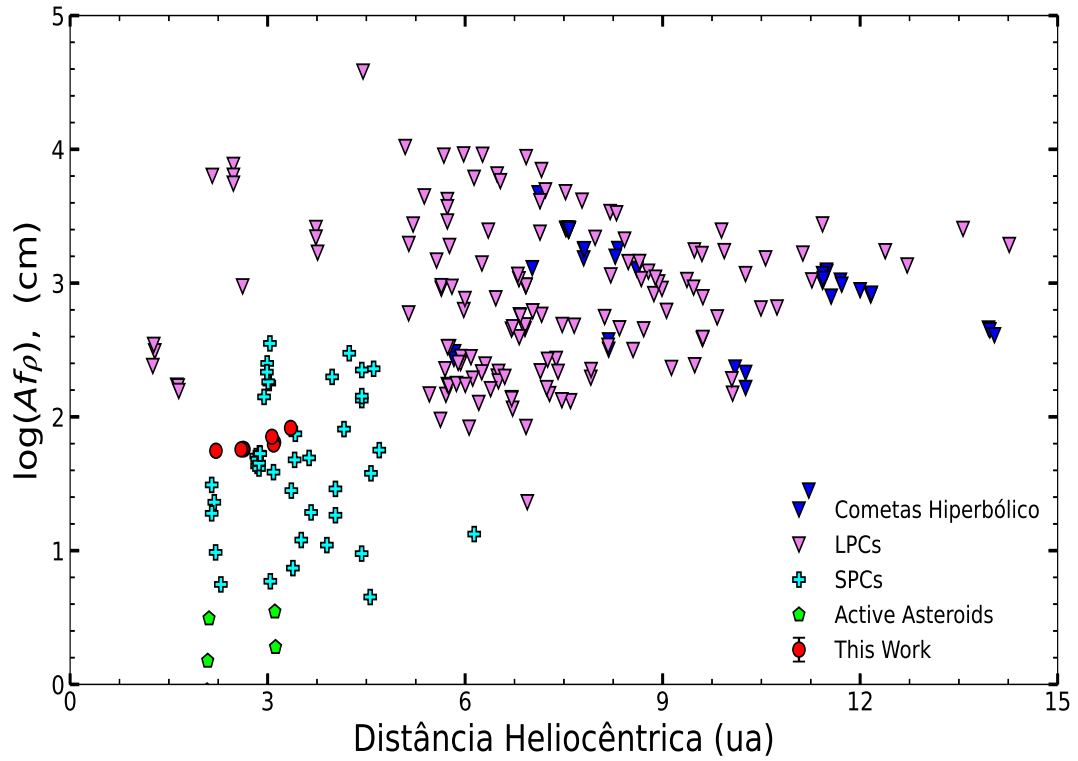


Figura 5.7: $\log(Af\rho)$ computados para cometas em função das distâncias heliocêntricas. Em triângulo temos o parâmetro para Cometas de Longo Período (LPCs); em cruz os Cometas de Curto Período (SPCs); em hexágonos são os Asteroides Ativos e nos círculos vermelho as medidas obtidas para o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS) (Borysenko et al., 2020, 2019, 2022; Ivanova, 2020)

o cometa estar iniciando uma possível transição de cometa (enquanto objeto com coma detectada) para um objeto com característica asteroidal.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas Futuras

Da natureza física dos cometas hiperbólicos vimos haver um excesso dessa população quando comparado com o total, aproximadamente 12% da população total, embora essa porcentagem represente os cometas que em suas órbitas atuais estão descritos como hiperbólicos. Esse excesso pode ser causado por viés observacional, uma vez que nem sempre é possível ter uma cobertura orbital o suficiente para ter boa determinação da órbita. Além disso, dentro da população de cometas hiperbólicos estão aqueles provenientes de outros sistemas planetários, os cometas interestelares. Ou ainda, os Cometas Manxs que são objetos vindos dos limites do Sistema Solar, mas que possuem pouca ou nenhuma atividade.

Embora não seja esperado que os cometas hiperbólicos tenham características físicas diferentes dos cometas de longo período, mas de modo geral, a caracterização de cometas de longo período é um meio de aumentar a compreensão da população dos objetos que povoam a Nuvem de Oort.

Sobre o Cometa Hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS), nossas conclusões principais são: A atividade começou antes do periélio, tanto que inicialmente o cometa foi classificado como Asteroide Hiperbólico, e a atividade deve ter iniciado quando o cometa estava aproximadamente 7 ua, sugerindo como principal mecanismo de ativação a transição de gelo de água amorfo para cristalino. Já as medições de $Af\rho$ são consistentes com as de cometas de longo período e tendem a um aumento significativo até depois do periélio.

A partir dos dados de pré-descobertas obtidos a partir do projeto DES foi possível estimar a magnitude absoluta em 10,7 e com isso estimamos um núcleo ~ 45 km considerando o albedo típico de 0,04 e um coeficiente de fase $\beta = 0.11\text{mag.deg}^{-1}$.

O cometa hiperbólico C/2017 U7 (PANSTARRS) apresentou característica peculiar quando comparado com as demais populações de cometas, Centauros e Objetos transnetunianos, embora tenham similaridade dentro das incertezas com membros da população de Centauros e TNOs. Todavia, é a presença de uma banda de absorção centrada em $0,595\mu\text{m}$ que é a principal característica atípica, e essa carac-

terística é notada durante todo o tempo de observação. O fato de a cor ($g - r$) de dados de pré-descoberta também ter essa característica, unindo ainda ao fato de os valores de $Af\rho$ serem mais baixos na região da banda r, indica que essa distinção pode estar relacionada com a composição do material da poeira.

Quanto a parâmetro de $Af\rho$ nós notamos que os valores continuam aumentando até depois da passagem do periélio, o que indica que uma vez iniciada a atividade, a coma continuou evoluindo até muito depois do periélio. Entretanto, em consequência da órbita do cometa, não houve alteração drástica nas distâncias heliocêntricas que fosse suficiente para suprimir a atividade.

Outro ponto importante sobre este objeto, descrito em nosso artigo, se refere ao estudo dinâmico realizado por nossos colaboradores. O cometa C/2017 U7 (PANSTARRS) é atribuído como um cometa dinamicamente velho pertencente à parte externa da Nuvem da Oort, embora a possibilidade de ter sido capturado do meio interestelar não possa ser descartada.

Sobre o cometa C/2021 O3 (PANSTARRS), nosso estudo mostrou um cometa com baixa atividade e possivelmente o cometa está experimentando um processo de transição de um objeto com características observacionais de uma população cometária para um objeto com características asteroidais.

Finalmente, como proposta futura, nós temos alguns trabalhos que estão bem encaminhados e que não foram inseridos neste documento de tese. Em ordem de encaminhamento devemos submeter os resultados do estudo observacional e dinâmico do cometa hiperbólico C/2021 O3 (PANSTARRS); concluir as análises do cometa interestelar 2I Borisov, bem como concluir as análises do cometa hiperbólico C/2018 U1 e continuar as observações do cometa hiperbólico C/2021 X1.

Referências Bibliográficas

- A'Hearn, M. F., Schleicher, D. G., Millis, R. L., Feldman, P. D., and Thompson, D. T. (1984). Comet Bowell 1980b. *AJ*, 89:579–591.
- Alvarez-Candal, A., Pinilla-Alonso, N., Ortiz, J. L., Duffard, R., Morales, N., Santos-Sanz, P., Thirouin, A., and Silva, J. S. (2016). Absolute magnitudes and phase coefficients of trans-Neptunian objects. *AAP*, 586:A155.
- Astropy Collaboration, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Greenfield, P., Droettboom, M., Bray, E., Aldcroft, T., Davis, M., Ginsburg, A., Price-Whelan, A. M., Kerzendorf, W. E., Conley, A., Crighton, N., Barbary, K., Muna, D., Ferguson, H., Grollier, F., Parikh, M. M., Nair, P. H., Unther, H. M., Deil, C., Woillez, J., Conseil, S., Kramer, R., Turner, J. E. H., Singer, L., Fox, R., Weaver, B. A., Zabalza, V., Edwards, Z. I., Azalee Bostroem, K., Burke, D. J., Casey, A. R., Crawford, S. M., Dencheva, N., Ely, J., Jenness, T., Labrie, K., Lim, P. L., Pierfederici, F., Pontzen, A., Ptak, A., Refsdal, B., Servillat, M., and Streicher, O. (2013). Astropy: A community Python package for astronomy. *AA*, 558:A33.
- Binzel, R. P., DeMeo, F. E., Turtelboom, E. V., Bus, S. J., Tokunaga, A., Burbine, T. H., Lantz, C., Polishook, D., Carry, B., Morbidelli, A., Birlan, M., Vernazza, P., Burt, B. J., Moskovitz, N., Slivan, S. M., Thomas, C. A., Rivkin, A. S., Hicks, M. D., Dunn, T., Reddy, V., Sanchez, J. A., Granvik, M., and Kohout, T. (2019). Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS). *Icarus*, 324:41–76.
- Binzel, R. P., Lupishko, D., di Martino, M., Whiteley, R. J., and Hahn, G. J. (2002). Physical Properties of Near-Earth Objects. In *Asteroids III*, pages 255–271.
- Binzel, R. P., Reddy, V., and Dunn, T. L. (2015). The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites. In *Asteroids IV*, pages 243–256.

- Bolin, B. T., Lisse, C. M., Kasliwal, M. M., Quimby, R., Tan, H., Copperwheat, C. M., Lin, Z.-Y., Morbidelli, A., Abe, L., Bendjoya, P., Burdge, K. B., Coughlin, M., Fremling, C., Itoh, R., Koss, M., Masci, F. J., Maeno, S., Mamajek, E. E., Marocco, F., Murata, K., Rivet, J.-P., Sitko, M. L., Stern, D., Vernet, D., Walters, R., Yan, L., Andreoni, I., Bhalerao, V., Bodewits, D., De, K., Deshmukh, K. P., Bellm, E. C., Blagorodnova, N., Buzasi, D., Cenko, S. B., Chang, C.-K., Chojnowski, D., Dekany, R., Duev, D. A., Graham, M., Jurić, M., Kulkarni, S. R., Kupfer, T., Mahabal, A., Neill, J. D., Ngeow, C.-C., Penprase, B., Riddle, R., Rodriguez, H., Smith, R. M., Rosnet, P., Sollerman, J., and Soumagnac, M. T. (2020). Characterization of the Nucleus, Morphology, and Activity of Interstellar Comet 2I/Borisov by Optical and Near-infrared GROWTH, Apache Point, IRTF, ZTF, and Keck Observations. *Aj*, 160(1):26.
- Borysenko, S., Baransky, A., Kuehrt, E., Hellmich, S., Mottola, S., and Meech, K. (2020). Study of the physical properties of selected active objects in the main belt and surrounding regions by broadband photometry. *Astronomische Nachrichten*, 341(9):849–859.
- Borysenko, S., Baransky, A., and Musiichuk, E. (2019). Photometric observations of ecliptic comet 47P/Ashbrook-Jackson and selected quasi-Hilda and main-belt comets at Kyiv Comet Station (MPC code-585) in 2017. *Icarus*, 317:44–47.
- Borysenko, S., Kokhirova, G., and Rakhmatullaeva, F. (2022). Some physical properties of a new Jupiter-family comet P/2019 LD2 (ATLAS) from broadband observations. *Icarus*, 372:114752.
- Bressi, T. H., Meech, K. J., Kleyna, J., Wipper, C., Micheli, M., Linder, T., Holmes, R., Miller, P., Gomez, E., Miles, R., Buzzi, L., Foglia, S., Bulger, J., Lowe, T., Schultz, A., Willman, M., Chambers, K., Chastel, S., Denneau, L., Flewelling, H., Huber, M., Lilly, E., Magnier, E., Wainscoat, R., Waters, C., Weryk, R., Abreu, D., Koschny, D., Knoefel, A., Busch, M., Schwab, E., Sato, H., Armstrong, J. D., Teagarden, Z. N., Ryden, S. W., Moss, S. R., and Williams, G. V. (2018). A/2017 U7. *Minor Planet Electronic Circulars*, 2018-E17.
- Brown, J. C., Potts, H. E., Porter, L. J., and Le Chat, G. (2011). Mass loss, destruction and detection of Sun-grazing and -impacting cometary nuclei. *Aap*, 535:A71.

- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., and Aarseth, S. J. (2018). Where the Solar system meets the solar neighbourhood: patterns in the distribution of radiant of observed hyperbolic minor bodies. *Mnras*, 476(1):L1–L5.
- de León, J., Licandro, J., and Pinilla-Alonso, N. (2018). The Diverse Population of Small Bodies of the Solar System. In Deeg, H. J. and Belmonte, J. A., editors, *Handbook of Exoplanets*, page 55.
- De Pra, M., Lazzaro, D., Carvano, J., Gonzales, J. A., and Carvano, J. M. (2013). Minor Planet Observations [Y28 OASI, Nova Itacuruba]. *Minor Planet Circulars*, 82716:4.
- De Pra, M. N., Carvano, J., Morate, D., Pinilla-Alonso, N., and Licandro, J. (2018a). CANA: A Python package for the analysis of hydration in asteroid spectroscopic and spectrophotometric data. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50*, volume 50 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 315.02.
- De Pra, M. N., Carvano, J., Morate, D., Pinilla-Alonso, N., and Licandro, J. (2018b). CANA: A Python package for the analysis of hydration in asteroid spectroscopic and spectrophotometric data. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50*, volume 50 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 315.02.
- De Sanctis, M. C., Ammannito, E., McSween, H. Y., Raponi, A., Marchi, S., Capaccioni, F., Capria, M. T., Carrozzo, F. G., Ciarniello, M., Fonte, S., Formisano, M., Frigeri, A., Giardino, M., Longobardo, A., Magni, G., McFadden, L. A., Palomba, E., Pieters, C. M., Tosi, F., Zambon, F., Raymond, C. A., and Russell, C. T. (2017). Localized aliphatic organic material on the surface of Ceres. *Science*, 355(6326):719–722.
- Dones, L., Brassier, R., Kaib, N., and Rickman, H. (2015). Origin and Evolution of the Cometary Reservoirs. *Space Science Reviews*, 197(1-4):191–269.
- Duncan, M. J. (2008). Dynamical Origin of Comets and Their Reservoirs. *Ssr*, 138(1-4):109–126.
- Evangelista-Santana, M., Carvano, J. M., De Prá, M., de la Fuente Marcos, R., Schambeau, C., Licandro, J., de la Fuente Marcos, C., Souza-Feliciano, A. C., and Pinilla-Alonso, N. (2022). Physical and dynamical characterization of hyperbolic comet C/2017 U7 (PANSTARRS). *Icarus*, 377:114834.

- Fernández, J. A., Gallardo, T., and Young, J. D. (2016). The end states of long-period comets and the origin of Halley-type comets. *Mnras*, 461(3):3075–3088.
- Fernández, Y. R., Kelley, M. S., Lamy, P. L., Toth, I., Groussin, O., Lisse, C. M., A’Hearn, M. F., Bauer, J. M., Campins, H., Fitzsimmons, A., Licandro, J., Lowry, S. C., Meech, K. J., Pittichová, J., Reach, W. T., Snodgrass, C., and Weaver, H. A. (2013). Thermal properties, sizes, and size distribution of Jupiter-family cometary nuclei. *Icarus*, 226(1):1138–1170.
- Festou, M. C., Keller, H. U., and Weaver, H. A. (2004). A brief conceptual history of cometary science. In Festou, M. C., Keller, H. U., and Weaver, H. A., editors, *Comets II*, page 3.
- Fink, U. and Rubin, M. (2012). The calculation of $Af\rho$ and mass loss rate for comets. *Icarus*, 221(2):721–734.
- Flaugher, B., Diehl, H. T., Honscheid, K., Abbott, T. M. C., Alvarez, O., Angstadt, R., Annis, J. T., Antonik, M., Ballester, O., Beaufore, L., Bernstein, G. M., Bernstein, R. A., Bigelow, B., Bonati, M., Boprie, D., Brooks, D., Buckley-Geer, E. J., Campa, J., Cardiel-Sas, L., Castander, F. J., Castilla, J., Cease, H., Cela-Ruiz, J. M., Chappa, S., Chi, E., Cooper, C., da Costa, L. N., Dede, E., Derylo, G., DePoy, D. L., de Vicente, J., Doel, P., Drlica-Wagner, A., Eiting, J., Elliott, A. E., Emes, J., Estrada, J., Fausti Neto, A., Finley, D. A., Flores, R., Frieman, J., Gerdes, D., Gladders, M. D., Gregory, B., Gutierrez, G. R., Hao, J., Holland, S. E., Holm, S., Huffman, D., Jackson, C., James, D. J., Jonas, M., Karcher, A., Karliner, I., Kent, S., Kessler, R., Kozlovsky, M., Kron, R. G., Kubik, D., Kuehn, K., Kuhlmann, S., Kuk, K., Lahav, O., Lathrop, A., Lee, J., Levi, M. E., Lewis, P., Li, T. S., Mandrichenko, I., Marshall, J. L., Martinez, G., Merritt, K. W., Miquel, R., Muñoz, F., Neilsen, E. H., Nichol, R. C., Nord, B., Ogando, R., Olsen, J., Palaio, N., Patton, K., Peoples, J., Plazas, A. A., Rauch, J., Reil, K., Rheault, J. P., Roe, N. A., Rogers, H., Roodman, A., Sanchez, E., Scarpine, V., Schindler, R. H., Schmidt, R., Schmitt, R., Schubnell, M., Schultz, K., Schurter, P., Scott, L., Serrano, S., Shaw, T. M., Smith, R. C., Soares-Santos, M., Stefanik, A., Stuermer, W., Suchyta, E., Sypniewski, A., Tarle, G., Thaler, J., Tighe, R., Tran, C., Tucker, D., Walker, A. R., Wang, G., Watson, M., Weaverdyck, C., Wester, W., Woods, R., Yanny, B., and DES Collaboration (2015). The Dark Energy Camera. *AJ*, 150(5):150.

- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., Doi, M., Shimasaku, K., and Schneider, D. P. (1996). The Sloan Digital Sky Survey Photometric System. *Aj*, 111:1748.
- Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Morbidelli, A. (2005). Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435(7041):466–469.
- Guliyev, A. S. and Dadashov, A. S. (2010). On hyperbolic comets. In Fernandez, J. A., Lazzaro, D., Prrialnik, D., and Schulz, R., editors, *Icy Bodies of the Solar System*, volume 263, pages 81–84.
- Higuchi, A. and Kokubo, E. (2020). Hyperbolic Orbits in the Solar System: Interstellar Origin or Perturbed Oort Cloud Comets? *Mnras*, 492(1):268–275.
- Horner, J., Evans, N. W., and Bailey, M. E. (2004). Simulations of the population of Centaurs - I. The bulk statistics. *MNRAS*, 354(3):798–810.
- Howell, S. B. (2006). *Handbook of CCD Astronomy*, volume 5.
- Hughes, D. W. (1991). On hyperbolic comets. *Journal of the British Astronomical Association*, 101:119–120.
- Hui, M.-T. (2018). Two Hyperbolic Baldheads in the Solar System: 2017 U7 and 2018 C2. , 156(2):73.
- Ivanova, A. V. (2020). Small Bodies of the Solar System Active at Large Heliocentric Distances: Studies with the 6-Meter Telescope of Sao Ras. *Astrophysical Bulletin*, 75(1):31–49.
- Jewitt, D. (1996). From Comets to Asteroids: When Hairy Stars Go Bald. *Earth Moon and Planets*, 72(1-3):185–201.
- Jewitt, D. (2015). Color Systematics of Comets and Related Bodies. *Aj*, 150(6):201.
- Jewitt, D. (2022). Destruction of Long-Period Comets. *arXiv e-prints*, page arXiv:2208.04469.
- Jewitt, D. and Hsieh, H. H. (2022). The Asteroid-Comet Continuum. *arXiv e-prints*, page arXiv:2203.01397.
- Jewitt, D., Hui, M.-T., Kim, Y., Mutchler, M., Weaver, H., and Agarwal, J. (2020). The Nucleus of Interstellar Comet 2I/Borisov. *Apjl*, 888(2):L23.
- Jewitt, D. and Luu, J. (2019). Initial Characterization of Interstellar Comet 2I/2019 Q4 (Borisov). *Apjl*, 886(2):L29.

- Jewitt, D., Luu, J., and Marsden, B. G. (1992). 1992 QB1. *Iaucirc*, 5611:1.
- Jewitt, D. C. (2004). From cradle to grave: the rise and demise of the comets. In Festou, M. C., Keller, H. U., and Weaver, H. A., editors, *Comets II*, page 659.
- Joye, W. A. and Mandel, E. (2003). New Features of SAOImage DS9. In Payne, H. E., Jedrzejewski, R. I., and Hook, R. N., editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII*, volume 295 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 489.
- Jurić, M., Ivezić, Ž., Lupton, R. H., Quinn, T., Tabachnik, S., Fan, X., Gunn, J. E., Hennessy, G. S., Knapp, G. R., Munn, J. A., Pier, J. R., Rockosi, C. M., Schneider, D. P., Brinkmann, J., Csabai, I., and Fukugita, M. (2002). Comparison of Positions and Magnitudes of Asteroids Observed in the Sloan Digital Sky Survey with Those Predicted for Known Asteroids. *AJ*, 124(3):1776–1787.
- Kaiser, N. (2004). Pan-STARRS: a wide-field optical survey telescope array. In Oschmann, Jacobus M., J., editor, *Ground-based Telescopes*, volume 5489 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 11–22.
- Keller, S. C., Schmidt, B. P., Bessell, M. S., Conroy, P. G., Francis, P., Granlund, A., Kowald, E., Oates, A. P., Martin-Jones, T., Preston, T., Tisserand, P., Vaccarella, A., and Waterson, M. F. (2007). The SkyMapper Telescope and The Southern Sky Survey. *PASA*, 24(1):1–12.
- Królikowska, M. (2001). A study of the original orbits of “hyperbolic” comets. *Aap*, 376:316–324.
- Levison, H. F. (1996). Comet Taxonomy. In Rettig, T. and Hahn, J. M., editors, *Completing the Inventory of the Solar System*, volume 107 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 173–191.
- Levison, H. F., Morbidelli, A., Dones, L., Jedicke, R., Wiegert, P. A., and Bottke, W. F. (2002). The Mass Disruption of Oort Cloud Comets. *Science*, 296(5576):2212–2215.
- Licandro, J., Popescu, M., de León, J., Morate, D., Vaduvescu, O., De Prá, M., and Ali-Laoga, V. (2018). The visible and near-infrared spectra of asteroids in cometary orbits. *Aap*, 618:A170.

- Licandro, J., Serra-Ricart, M., Oscoz, A., Casas, R., and Osip, D. (2000). The Effect of Seeing Variations in Time-Series CCD Inner Coma Photometry of Comets: A New Correction Method. *AJ*, 119(6):3133–3144.
- Luu, J. X. and Jewitt, D. C. (1990). Charge-Coupled Device Spectra of Asteroids. I. Near-Earth and 3:1 Resonance Asteroids. *AJ*, 99:1985.
- Luu, J. X. and Jewitt, D. C. (1992). High resolution surface brightness profiles of near-earth asteroids. *Icarus*, 97(2):276–287.
- Marzari, F. and Scholl, H. (1998). Capture of Trojans by a Growing Proto-Jupiter. *Icarus*, 131(1):41–51.
- Meech, K. J., Pittichová, J., Bar-Nun, A., Notesco, G., Laufer, D., Hainaut, O. R., Lowry, S. C., Yeomans, D. K., and Pitts, M. (2009). Activity of comets at large heliocentric distances pre-perihelion. *Icarus*, 201(2):719–739.
- Meech, K. J. and Svoren, J. (2004). Using cometary activity to trace the physical and chemical evolution of cometary nuclei. In Festou, M. C., Keller, H. U., and Weaver, H. A., editors, *Comets II*, page 317.
- Meech, K. J., Yang, B., Kleyna, J., Hainaut, O. R., Berdyugina, S., Keane, J. V., Micheli, M., Morbidelli, A., and Wainscoat, R. J. (2016). Inner solar system material discovered in the Oort cloud. *Science Advances*, 2:e1600038.
- Morbidelli, A. and Brown, M. E. (2004). The kuiper belt and the primordial evolution of the solar system. In Festou, M. C., Keller, H. U., and Weaver, H. A., editors, *Comets II*, page 175.
- Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Gomes, R. (2005). Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature*, 435(7041):462–465.
- Moroz, L. V., Pieters, C. M., and Akhmanova, M. V. (1992). Why the Surfaces of Outer Belt Asteroids are Dark and Red? In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 23 of *Lunar and Planetary Science Conference*, page 931.
- Mumma, M. J. and Charnley, S. B. (2011). The Chemical Composition of Comets—Emerging Taxonomies and Natal Heritage. *Araa*, 49(1):471–524.
- Ofek, E. O. (2012). Sloan Digital Sky Survey Observations of Kuiper Belt Objects: Colors and Variability. *ApJ*, 749(1):10.

- Oort, J. H. (1950). The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bain*, 11:91–110.
- Peixinho, N., Delsanti, A., and Doressoundiram, A. (2015). Reanalyzing the visible colors of Centaurs and KBOs: what is there and what we might be missing. *Aap*, 577:A35.
- Raponi, A., Ciarniello, M., Capaccioni, F., Mennella, V., Filacchione, G., Vinogradoff, V., Poch, O., Beck, P., Quirico, E., De Sanctis, M. C., Moroz, L., Kappel, D., Erard, S., Bockelée-Morvan, D., Longobardo, A., Tosi, F., Palomba, E., Combe, J. P., Rousseau, B., Arnold, G., Carlson, R. W., Pommerol, A., Pilorget, C., Fornasier, S., Bellucci, G., Barucci, A., Mancarella, F., Formisan, M., Rinaldi, G., Istiqomah, I., and Leyrat, C. (2020). Infrared detection of aliphatic organics on a cometary nucleus. *arXiv e-prints*, page arXiv:2009.14476.
- Raymond, S. N. and Izidoro, A. (2017). Origin of water in the inner Solar System: Planetesimals scattered inward during Jupiter and Saturn’s rapid gas accretion. *icarus*, 297:134–148.
- RELAB (2019). RELAB spectral database. http://www.planetary.brown.edu/relabdocs/relab_disclaimer.htm. Version: 2019-12-31.
- Romanishin, W. (2006). An introduction to astronomical photometry using ccds.
- Rondón, E., Lazzaro, D., Rodrigues, T., Carvano, J. M., Roig, F., Monteiro, F., Arcoverde, P., Medeiros, H., Silva, J., Jasmim, F., Prá, M. D., Hasselmann, P., Ribeiro, A., Dávalos, J., and Souza, R. (2020). OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies—Some Results on NEO’s Physical Properties. *PASP*, 132(1012):065001.
- Sekanina, Z. (1967). Hyperbolic Comets and Oorts Hypothesis of Cometary Cloud. In *Liege International Astrophysical Colloquia*, volume 13 of *Liege International Astrophysical Colloquia*, pages 460–476.
- Shoemaker, E. M., Williams, J. G., Helin, E. F., and Wolfe, R. F. (1979). Earth-crossing asteroids: orbital classes, population, and fluctuation of population in late geologic time. Reports of planetary geology program, 1978 - 1979, p. 3 - 5.
- Solontoi, M., Ivezić, Ž., Jurić, M., Becker, A. C., Jones, L., West, A. A., Kent, S., Lupton, R. H., Claire, M., Knapp, G. R., Quinn, T., Gunn, J. E., and Schneider, D. P. (2012). Ensemble properties of comets in the Sloan Digital Sky Survey. *Icarus*, 218(1):571–584.

- Terai, T., Yoshida, F., Ohtsuki, K., Lykawka, P. S., Takato, N., Higuchi, A., Ito, T., Komiyama, Y., Miyazaki, S., and Wang, S.-Y. (2018). Multi-band photometry of trans-Neptunian objects in the Subaru Hyper Suprime-Cam survey. *Pasj*, 70:S40.
- Toth, I. and Lisse, C. M. (2006). On the rotational breakup of cometary nuclei and centaurs. *Icarus*, 181(1):162–177.
- Vaghi, S. (1973). Orbital Evolution of Comets and Dynamical Characteristics of Jupiter’s Family. *AAP*, 29:85.
- Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N., O’Brien, D. P., and Mandell, A. M. (2011). A low mass for Mars from Jupiter’s early gas-driven migration. *Nature*, 475(7355):206–209.
- Whipple, F. L. (1950). A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. *Apj*, 111:375–394.
- Womack, M., Sarid, G., and Wierzechos, K. (2017). CO in Distantly Active Comets. *Pasp*, 129(973):031001.
- Zhang, Q., Ye, Q., Farnham, T. L., and Holt, C. E. (2022). Disintegration of Near-Sun Comet C/2021 O3 (PANSTARRS). *The Astronomer’s Telegram*, 15358:1.

Apêndice A

Projetos de pedido de tempo submetido durante o doutorado

A partir de Setembro de 2018, nós iniciamos as observações de asteroides a partir do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI). Entretanto, ao longo da pesquisa fomos redirecionando nossas observações para cometas hiperbólicos, e ao longo desse período submetemos algumas propostas observacionais para observatórios além do OASI. A seguir descreveremos resumidamente cada uma delas:

1. Proposta: Monitoring the spectra and dust properties of the first known active Jupiter Trojan: 2019 LD2.
PI: Marçal Evangelista Santana
Observatório: Telescópio SOAR para o semestre 2020B.
Objetivo: Estudar as propriedades físicas do primeiro objeto ativo pertencente aos troianos de Júpiter.
Status: Aprovado, porém em consequência dos impactos causados pela pandemia do COVID não foi possível a coleta de dados.
2. Proposta: Investigation of the spectral variations on binary asteroids.
PI: Marçal Evangelista Santana
Observatório: Telescópio SOAR para o semestre 2021A.
Objetivo: Investigar as variações espectrais do asteroide binário 1139 (Atami).
Status: O pedido foi rejeitado.
3. Proposta: Characterizing of the hyperbolic comet C/2018 U1 (Lemmon).
PI: Marçal Evangelista Santana
Observatório: Telescópio SOAR para o semestre 2021B.
Objetivo: Caracterizar o cometa hiperbólico em torno do periélio.

Status: O projeto foi aprovado e executado entre os meses de agosto e outubro.

4. Proposta: Investigate the possible activity in 468861(2013 LU28).
PI: Marçal Evangelista Santana
Observatório: Telescópio GEMINI para o semestre 2022A
Objetivo: Investigar a possível atividade do TNO 468861(2013 LU28).
Status: O projeto foi rejeitado.

5. Proposta: Investigating the nature of the hyperbolic comet C/2022 F1(ATLAS).
PI: Marçal Evangelista Santana
Observatório: Telescópio GEMINI para o semestre 2022A no modo Fast Turnaround
Objetivo: Caracterização do cometa hiperbólico como potencial candidato a ser cometa interestelar
Status: O projeto foi rejeitado.

6. Proposta: Investigating the nature of the hyperbolic asteroid A/2021 X1.
PI: Marçal Evangelista Santana
Observatório: Telescópio SOAR em 2022A como pedido ao diretor.
Objetivo: Investigar a natureza da atividade do asteroide hiperbólico. Inicialmente o objeto foi observado a partir do OASI, e após detectarmos atividade nós fizemos um reporte junto ao Minor Planet Center e uma proposta de observação no SOAR.
Status: Recebemos parecer desfavorável para as datas propostas.

7. Proposta: Characterizing of the hyperbolic objects A/2021 X1 and C/2022 F1.
PI: Marçal Evangelista Santana
Observatório: Telescópio SOAR em 2022B.
Objetivo: Caracterizar a produção de poeira e o espectro na região espectral entre 0,3 e 0,6 μm .
Status: Aprovado, em execução.

8. Proposta: Assessing the ice content of comets from the Oort cloud, where TNG meets the James Webb Space Telescope.

PI: Vania Lorenzi, Colaborador: Marçal Evangelista Santana

Observatório: Telescópio GNT para 2023B.

Objetivo: Investigar a natureza peculiar do Centauro/TNO 2013 LU28.

Status: Aprovado, em execução.

Apêndice B

Trabalhos Desenvolvidos em Colaboração Durante a Tese

- **Lightcurve analysis of near-Earth objects from the IMPACTON project: Evidence of binary systems and cohesion strength.**

Filipe Monteiro, Daniela Lazzaro, Eduardo Rondón, Plícida Arcoverde, **Marçal Evangelista-Santana**, Jonatan Michimani, Wesley Pereira, Wesley Mesquita, Hissa Medeiros, Tatiane Corrêa, José Silva-Cabrera, Teresinha Rodrigues.

Rotations of asteroids have been set and altered by several processes since their formation. In the case of the near-Earth objects (NEOs), the rotational states are significantly affected by non-gravitational effects. In addition, an abundant population of binary systems has been found among NEOs with rotational periods very close to the spin barrier and in the size range from 0.2 to 10 km. In this paper we report photometric observations of about 80 NEAs carried out with the 1-m telescope of the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI, Brazil) from 2016 October to 2020 December. Reliable rotational periods and lightcurve amplitudes were determined for 46 objects, of which 15 are Potentially Hazardous Asteroids (PHAs). A minimum period value was also derived for other 11 NEOs. Then, asteroids with rotation periods between 2 and 3 h had their lightcurves analyzed for binarity signatures. We analyzed 21 binary candidates and for 8 of them we found the signature of a possible satellite. These suspected binaries showed a single possible mutualevent or a secondary period superimposed on the lightcurve. Primary lightcurves for 6 confirmed binary NEOs were also obtained and for some of them the orbital period was also determined. Finally, we show that binary candidates require some internal cohesion

strength to avoid structural failure by centrifugal forces.

Publicado em: Icarus

Data de Aceite:Icarus

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115297>

- **Photometry and lightcurve analysis of four mars-crossing asteroids.**

Jonatan Michimani, Daniela Lazzaro, Eduardo Rondón, Filipe Monteiro, Plícida Arcoverde, **Marçal Evangelista Santana**, Wesley Pereira, Wesley Mesquista, Roberto Souza, Terezinha Rodrigues.

Abstract: Rotational periods of four Mars-crossing (MCs) were determined from lightcurves acquired at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (MPC Y28, OASI) between 2020 July to 2021 October.

Publicado em: Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers, Vol. 49, No. 4, pp. 272-273 (2022).

Data de Publicação: 31 de Maio de 2022

ISSN: The Minor Planet Bulletin (ISSN 1052-8091).

- **A photometric study of members of the NEOs Atiras population**

E. Rondón, D. Lazzaro, J. Carvano, F. Monteiro, P. Arcoverde, **M. Evangelista**, J. Michimani, W. Mesquita, T. Rodrigues

Abstract: The observation of objects of the Atiras population is a challenge due to the narrow time-window in which observations are possible and, even so, at very low altitudes. This is due to the orbit of these objects, internal to that of the Earth. In this work we present the results of a photometric observational campaign of Atiras aiming to determine their physical parameters using the rotational light curve, the solar phase curve and the photometric spectrum. The period and amplitude have been determined for the asteroids (163693) Atira, (413563) 2005 TG45 and 2017 YH. In the case of (163693) Atira, we have determined a plausible rotational period $P = 3.1532 \pm 0.0001$, where the composite light curve presents structure usually related to the presence of a companion, as it has been suggested by radar observations of this asteroid. For asteroids (163693) Atira, (413563) 2005 TG45, (481817) 2008 UL90 and 2018 JB3 it was possible to derive the absolute magnitude and the phase coefficient. The obtained values are similar to those observed for asteroids with intermediate to low albedo. Finally, for asteroid (163693) Atira we have obtained a featureless photometric spectrum which is compatible in the Carvano taxonomic scheme with the Xp, Dp or Cp classes. No appreciable surface variations were observed for this object.

Publicado em: Icarus, Volume 372, article id. 114723.

Data de Aceite: Janeiro de 2022

DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114723

- **Physical characterization of equal-mass binary near-Earth asteroid 2017 YE5: a possible dormant Jupiter-family comet**

Monteiro, F.; Rondón, E.; Lazzaro,; Oey, J. ; **Evangelista-Santana, M.** ; Arcoverde, P. ; De Cicco, M.; Silva-Cabrera, J. S.; Rodrigues, T. ; Santos, L. B. T.

Abstract: Photometric observations of the nearly equal-mass binary near-Earth asteroid 2017 YE5 were carried out at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI, Brazil) and at the Blue Mountains Observatory (BMO, Australia) between 2018 July and August, shortly after it made a close approach to Earth in 2018 June. These observations allowed to determine an orbital period of the system in good agreement with the result of the radar observations. Our results also indicate that the 2017 YE5 system is not fully locked in a synchronous spin-orbit resonance, as there is a possible asynchronous component or tumbling rotator in the system. Additional data obtained at the Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM, Mexico) in 2018 August allowed to derive the colour indices and the low-resolution spectrum, which indicate that the object has a very reddish surface similar to the outer Solar system objects. This is consistent with a dark albedo of about 3 per cent, derived from an effective diameter of the combined components and an absolute magnitude of 19.2. Infrared data obtained at the NASA's Infrared Telescope Facility exhibit a thermal emission in the $2.5 \mu\text{m}$ range for which a low albedo of 2-4 per cent was adjusted by applying a thermal model. Regarding to the taxonomic classification, we found that the 2017 YE5 is a D-type in the Bus-DeMeo taxonomy. Therefore, according to our results and considering that the 2017 YE5 system has a typical comet orbit ($TJ = 2.87$), we suggest that it is a dormant Jupiter-family binary comet.

Publicado em: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 507, Issue 4, pp.5403-5414

Data de Aceite: Novembro 2021

DOI: 10.1093/mnras/stab2408

- **Properties of slowly rotating asteroids from the Convex Inversion Thermophysical Model**

Marciniak, A. ; Durech, J.; Alí-Lagoa, V. ; Ogtoza, W. ; Szakáts, ; Muller, T. G. ; Molnár, L. ; Pál, A. ; Monteiro, F. ; Arcoverde, P. ; Behrend, R. ; Benkhaldoun, Z. ; Bernasconi, L. ; Bosch, J. ; Brincat, Brunetto, L. ; Butkiewicz-Bak, M. ; Del Freato, F. ; Duffard, R. ; **Evangelista-Santana, M.** ; Farroni, G. ; Fauvaud, S. ; Fauvaud, M. ; Ferrais, M. ; Geier, S. ; Golonka, J. ; Grice, J. ; Hirsch, R. ; Horbowicz, J. ; Jehin, E. ; Julien, P. ; Kalup, Cs.; Kaminski, K. ; Kaminska, M. K. ; Kankiewicz, P. ; Kecskemethy, V. ; Kim, D. H. ; Kim, M. J. ; Konstanciak, I. ; Krajewski, J. ; Kudak, V. ; Kulczak, P. ; Kundera, T. ; Lazzaro, D. ; Manzini, F. ; Medeiros, H. ; Michimani-Garcia, J. ; Morales, N. ; Nadolny, J. ; Oszkiewicz, D. ; Pakstiene, E. ; Pawtowski, M. ; Perig, V. ; Pilcher, F. ; Pinel, P. ; Podlewska-Gaca, E. ; Polakis, T. ; Richard, F. ; Rodrigues, T. ; Rondón, E. ; Roy, R. ; Sanabria, J. J. ; Santana-Ros, T. ; Skiff, B. ; Skrzypek, J. ; Sobkowiak, K. ; Sonbas, E. ; Stachowski, G. ; Strajnic, J. ; Trela, P. ; Tychoniec, L. ; Urakawa, S. ; Verebelyi, E. ; Wagrez, K. ; Zejmo, M. ; Zukowski, K.

Abstract: Context. Recent results for asteroid rotation periods from the TESS mission showed how strongly previous studies have underestimated the number of slow rotators, revealing the importance of studying those targets. For most slowly rotating asteroids (those with $P \gtrsim 12$ h), no spin and shape model is available because of observation selection effects. This hampers determination of their thermal parameters and accurate sizes. Also, it is still unclear whether signatures of different surface material properties can be seen in thermal inertia determined from mid-infrared thermal flux fitting. Aims: We continue our campaign in minimising selection effects among main belt asteroids. Our targets are slow rotators with low light-curve amplitudes. Our goal is to provide their scaled spin and shape models together with thermal inertia, albedo, and surface roughness to complete the statistics. itself.

Publicado em: Astronomy & Astrophysics, Volume 654, id.A87, 32 pp

Data de Aceite: Outubro 2021

DOI: 10.1051/0004-6361/202140991

- **Analysis in the visible range of NASA Lucy mission targets: Eurybates, Polymele, Orus and Donaldjohanson.**

Souza-Feliciano, A. C. ; De Prá, M. ; Pinilla-Alonso, N.id ; Alvarez-Candal, A. ; Fernández-Valenzuela, E. ; De León, ; Binzel, R. ; Arcoverde, P. ; Rondón, E. ; **Evangelista, M. S.**

Abstract: Jupiter Trojan asteroids are minor bodies that share Jupiter's orbit around the Sun. Although not yet well understood in origin and composition, they have surface properties that, besides being comparable with other populations of small bodies in the Solar System, hold information that may restrict models of planetary formation. Because of this, there has been a significant increase in the interest in studying this population. In this context arises the NASA Mission Lucy, with a planned launch in 2021. The Lucy Mission will be the first one to address a group of six objects (five Jupiter Trojans and one main belt asteroid) with the aim of investigating, in detail, their nature. In order to provide valuable information for mission planning and maximize the scientific return, we carried out ground based observations of four targets of the mission. Aimed at looking for variabilities on the spectra of (3548) Eurybates, (15094) Polymele and (21900) Orus, we performed rotationally resolved visible spectroscopy of them at SOAR Telescope. We also analyzed the first visible spectrum obtained for the main belt asteroid (52246) Donaldjohanson at Gran Telescopio Canarias. The spectra of (21900) Orus and (15094) Polymele present here are the first ones in the visible range and show rather homogeneous characteristics along the surfaces. Their taxa correspond with those of the two dominant Trojan populations, the P- and the D-type group of objects. Spectroscopy of (3548) Eurybates, on the other side, suggests some variation on the characteristics of the reflectance of this body. Donaldjohanson shows hints of hydrated materials in its visible spectrum. The Lucy mission will investigate the surface composition of these targets and will shed light on their connections with other populations of minor bodies and on their role in the evolution of the Solar System.

Publicado em: Icarus, Volume 338, article id. 113463.

Data de publicação: Março de 2020

DOI: 10.1016/j.icarus.2019.113463

- **Characterization of aerosol chemical composition from urban pollution in Brazil and its possible impacts on the aerosol hygroscopicity and size distribution**

Almeida, Gerson P. ; Bittencourt, Antônio T. ; **Evangelista, Marçal S.** ; Vieira-Filho, Marcelo S. ; Fornaro, Adalgiza

Abstract: We studied the effect of aerosols inorganic chemical composition on the aerosol hygroscopicity of urban pollution in Brazil, where biofuels have been used in large scale. We applied size segregated inorganic chemical composition analysis using ISORROPIA II model and k-Kohler theory to determine the hygroscopicity parameter (k) of submicrometer aerosols measured in São Paulo city. The size dependence of organic and black carbon (BC) mass were estimated by chemical mass balance and mean observed values.

Results showed ultrafine mode particles with diameter smaller than 100 nm with a relatively K₂SO₄ and Na₂SO₄ large amount inducing further growth by diffusive condensation and coagulation of low-volatile organic compounds. The process could lead to modifications of aerosol size distribution and also to formation of more active Cloud Condensation Nuclei (CCN) due to the formation of aerosols with considerably increase of hygroscopicity (> 40%). The contribution from BC can decrease up to 40% of the observed hygroscopicities values of particles around 100 nm in diameter. Moreover, we present a parameterization based on aerosol mass fraction to accurately predict k derived from data of Aerosol Mass Spectrometer (AMS) collected in urban pollution in Brazil. Results are compared to hygroscopicity derived from observations of the pollution plume downwind Manaus, on the northern region of Brazil. Both cases were analogous indicating that, despite the fact of receiving influences of organic components from the forest, the pollution plume of Manaus shows the same characteristics of hygroscopicity, and can be modeled following the same parameterization.

Publicado em: Atmospheric Environment, Volume 202, p. 149-159

Data de publicação: Abril de 2019

DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.01.024