

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

RELAÇÕES ENTRE CORPOS PARENTAIS,
METEOROIDES, METEOROS E CHUVAS DE
METEOROS

MARCELO ANTÔNIO BARROS DE CICCIO
ORIENTADORA: DRA. DANIELA LAZZARO

RIO DE JANEIRO - RJ
2024

RELAÇÕES ENTRE CORPOS PARENTAIS, METEOROIDES, METEOROS E
CHUVAS DE METEOROS

Marcelo Antônio Barros De Cicco

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 Ciências.

Orientador: Daniela Lazzaro

Rio de Janeiro
Julho de 2024

RELAÇÕES ENTRE CORPOS PARENTAIS, METEOROIDES, METEOROS E
CHUVAS DE METEOROS

Marcelo Antônio Barros De Cicco

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 CIÊNCIAS EM ASTRONOMIA.

Examinada por:

Prof. Dra. Daniela Lazzaro,

Prof.,

Prof.,

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2024

Barros De Cicco, Marcelo Antônio

Relações entre corpos parentais, meteoroides, meteoros e chuvas de meteoros/Marcelo Antônio Barros De Cicco. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2024.

XVIII, 220 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Daniela Lazzaro

Tese (doutorado) – ON/MCTI/Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2024.

Bibliografia: p. 203 – 220.

1. Meteoros. 2. Meteoroides. 3. ACOs. I. , . II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Título.

Agradecimentos

O fim desta jornada marca a vitória da persistência e do amor a astronomia. Sem estes dois ingredientes seria impraticável alcançar a meta do doutoramento. E nenhuma conquista é realizada de forma solitária, no caminho percorrido, contei com ajuda e incentivo de muitas pessoas.

Minha esposa Daniela teve papel fundamental ao longo de todo o tempo, desde o início da pós-graduação, me incentivando nas horas certas e apoiando sempre, minha eterna gratidão. Também a minha estimada orientadora Daniela Lazzaro que pela sua brilhante conduta me auxiliando nos momentos cruciais desempenhou papel fundamental para a continuidade de minha formação científica.

Sou muito grato também as meu chefes e colegas do INMETRO que me apoiaram e acreditaram no meu potencial para estar neste doutorado. Agradeço ao Rodolfo Sabóia pelo incentivo, ao Luiz Tarelho por ter sempre a palavra de apoio e confiança à quem estarei em eterna dívida. Também ao Fernando A. Rodrigues e toda a equipe do LAORT.

Especial agradecimento a Felipe Monteiro, amigo e colega de profissão que sempre esteve pronto para dar idéias e sugestões, sendo sua parceria e participação fundamental para a realização deste trabalho final.

Ao pessoal da secretaria da pós-graduação sou grato também, pois sempre prestaram toda a ajuda que precisei. Um especial agradecimento a minha grande colega e amiga Iharka Szücs-Csillik que nos momentos certos, durante o doutorado me apoiou e ajudou com conselhos e orientações decisivas.

Também minha gratidão ao pessoal do observatório de Bucharest, na pessoa de seu diretor Mirlei Birlan e à Hegedüs Tibor diretor do observatório de Baja - Hungria.

E, por fim, a todos os participantes do projeto exoss, e em particular à Luciana

Fontes e sua incansável força e ajuda. Entretanto, sem a inspiração do Todo Universo e sua vasta imensidão e Inteligência Cósmica que rege as leis físicas da natureza não haveria motivação em explorar seus mistérios.

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 Ciências (D.Sc.)

RELAÇÕES ENTRE CORPOS PARENTAIS, METEOROIDES, METEOROS E CHUVAS DE METEOROS

Marcelo Antônio Barros De Cicco

Julho/2024

Orientador: Daniela Lazzaro

Programa: Astronomia

Considerando a importância do estudo dos meteoros visando a identificação de corpos ativos e a existência de complexos asteroides-meteoroides, este trabalho tem como objetivo o estudo de possíveis ligações parentais entre corpos asteroidais em órbitas cometárias (ACO) e chuvas de meteoros.

Inicialmente é feita uma discussão sobre a formação do Sistema Solar e a origem das regiões de pequenos corpos, como o Cinturão Principal, Centauros, Cinturão Transneptuniano, etc. Em seguida, são discutidos os limites dinâmicos que separam asteroides de cometas através do critério de Tisserand e suas implicações na identificação de corpos ativos. Também são descritos os conceitos atuais sobre os meteoros, meteoroides e bólidos além de chuvas e complexos asteroides-meteoroides.

Foram utilizadas metodologias desenvolvidas por Micheli (2013) e Guennoun et al. (2019) para separar objetos com altas possibilidades de conexão de ACOs com algum enxame de meteoroides. Vale ressaltar que estas metodologias são diferentes dos usuais critérios de dissimilaridade que apresentam problemas por serem subjetivos. Foi assim identificada uma lista de 67 ACO com altas possibilidades de conexão com alguma chuva de meteoroides.

Discutimos as ligações genéticas entre os 67 objetos listados e chuvas de meteoros com potenciais associações entre correntes de meteoroides que formam complexos asteroides-meteoroides.

Também analisamos as órbitas, antes e depois do encontro próximo de um meteoróide rasante (“Earth grazing” em inglês) tipo condrito ordinário, de acordo com suas

propriedades de eficiência luminosa e densidade nuclear calculada, classificado dinamicamente como em órbita típica cometária. Aplicamos dois integradores numéricos simpléticos concluindo ser impossível a previsão de outros encontros próximos. Isto se deve basicamente a fatores como perturbações não previstas.

Palavras-chave: meteoros, meteoroides, ACO, NEA, meteoros rasantes.

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 Ciências (D.Sc.)

RELAÇÕES ENTRE CORPOS PARENTAIS, METEOROIDES, METEOROS E CHUVAS DE METEOROS

Marcelo Antônio Barros De Cicco

Julho/2024

Orientador: Daniela Lazzaro

Programa: Astronomia

Initially, a discussion is presented on the formation of the Solar System and the origin of small body regions such as the Main Belt, Centaurs, and the Trans-Neptunian Belt. Following this, the dynamic boundaries separating asteroids from comets through the Tisserand criterion are discussed, along with their implications for identifying active bodies. Current concepts regarding meteors, meteoroids, bolides, and meteor showers, as well as asteroid-meteoroid complexes, are also described.

Methodologies developed by Micheli (2013) and Guennoun et al. (2019) were employed to identify objects with high probabilities of connections between ACO and meteor showers. These methodologies differ from the usual dissimilarity criteria, which are problematic due to their subjective nature. A list of 67 ACO with high probabilities of connection to some meteor showers was identified.

Genetic links between the listed 67 objects and meteor showers are discussed, as well as potential associations with asteroid-meteoroid complexes.

Also, the orbits of an "Earth-grazing" meteoroid, an ordinary chondrite type, according to luminous efficiency and nuclear density, dynamically classified as a typical cometary orbit, were analyzed both before and after its close encounter. Using two symplectic numerical integrators, it was concluded that predicting future

close encounters is impossible due to unforeseen perturbations.

key words: meteors, meteoroids, ACO, NEA, grazing meteor.

Conteúdo

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	3
1.1 A formação do Sistema Solar	5
1.2 Os Pequenos Corpos	13
1.2.1 Objetos em órbitas próxima a Terra - NEO	14
1.2.2 Asteroides	17
1.2.3 As populações além de Júpiter	19
1.2.4 Cometas	20
1.2.5 Critério de Tisserand e o limite entre asteroides e cometas	21
1.2.6 Meteoroides	23
1.3 Objetivos	27
2 Conceitos sobre os Meteoros	29
2.1 O Conceito Atual	29
2.2 Origens	31
2.2.1 Chuvas de Meteoros	31
2.2.2 Origem dos Meteoroides que causam Chuvas de Meteoros	32
2.2.3 Meteoros originados de Cometas	34
2.2.4 Asteróides Ativos	38
2.2.5 Objetos ativos além de Júpiter	38
2.2.6 Meteoroides do Cinturão Principal	39
2.3 Meteoros Esporádicos	39
2.4 Meteoros Hiperbólicos	39
2.5 Bólidos e Superbólidos	42
2.5.1 A tipologia de Bólidos baseada na sua constituição	43
2.6 Correntes de Meteoroides e chuvas	45
2.6.1 Critérios de Dissimilaridade	46
2.7 Complexos asteroides-meteoroides	48

2.7.1	Complexo Geminids - (3200) Phaethon	49
2.7.2	Complexo Quadrantids - (196256) 2003 EH1	51
2.7.3	Complexo Capricornids - 169 P/NEAT	51
2.7.4	Complexo Taurids	52
2.7.5	Complexo Taurids - Perseids	52
2.7.6	Complexo Phoenecids - 2003 WY25(Cometa 289/P Blanpain)	53
2.7.7	Complexo Andromedis - Cometa 3D/Biela	53
3	Associação entre ACO e chuvas ou complexos	54
3.1	Introdução	54
3.1.1	ACO e o limite superior T_J	56
3.2	ACO e JFC entre os NEO	57
3.3	Estudo das Associações com Corpos Parentais - Metodologia	59
3.3.1	Primeira Etapa: o Método de Micheli (2013) ' <i>Match</i> '	60
3.3.2	Segunda Etapa: aplicação da metodologia de Guennoun (2019)	64
3.3.3	Coleta de dados de NEA e Cometas	66
3.3.4	Comparação de ACO e lista de chuvas	68
3.3.5	Validação do algoritmo "Match"	69
3.4	Resultados	71
3.5	Discussão dos resultados obtidos	75
3.5.1	Associação: chuva August mu-Draconids (#470, AMD) e o NEA ACO (2002 GJ8)	77
3.5.2	Associação do ACO 2017 MM7 com o complexo Quadrantids (#010 QUA) - NEO (196256) 2003 EH1	89
3.5.3	O caso do NEA 2009 WN25	98
4	A recorrência de um bólido tipo rasante	106
4.1	Introdução	106
4.2	Artigo "EARTH-GRAZING FIREBALL'S RECURRENCE"	107
4.3	Um possível fragmento de um ACO	128
5	Conclusões Gerais e Perspectivas	129
A	Artigos Publicados	131
A.1	"Meteor showers from known long-period comets"	131
A.2	"Physical characterization of equal-mass binary near-Earth asteroid 2017 YE5: a possible dormant Jupiter-family comet"	153
A.3	"Lifetime of cm-sized zodiacal dust from the physical and dynamical evolution of meteoroid streams"	166

B	Desenvolvimento de Softwares	191
B.1	<i>Pseudo Códigos</i>	191
B.1.1	Bash Scripts	191
B.1.2	Códigos em PYTHON	193
B.1.3	Códigos em FORTRAN	195
C	Programa de Associação de Radianes Teóricos	197
C.1	Código para determinar a conexão radiante-corpo parental	198
C.2	Código para determinar a conexão meteoros-corpo parental	200
D	Tabela de Classificação de Queries do SBDB	201
D.1	Tabela de Classificação do SBDB	201
	Bibliografia	203

Lista de Figuras

- 1.1 Diagrama, fora de escala, mostrando a posição do cinturão de asteroides, do cinturão de Transneptuniano, incluindo as órbitas mais externas de planetas anões: Plutão e Eris. Digital, for Scientific American; Artwork © 2007 Don Dixon / cosmographica.com 5
- 1.2 Nesta imagem é possível identificar a silhueta de um sistema planetário em formação, em torno da estrela jovem *Theta 1 Orionis C*, de cerca de 1 milhão de anos. A escala mostra o comprimento longitudinal do disco protoplanetário, com ≈ 300 UA. Em destaque, no canto inferior esquerdo, figura ampliada do sistema. Imagem tirada de <https://www.circumstellardisks.org/>. 7
- 1.3 Simulação do modelo de Nice: (a) estrutura inicial; (b) configuração antes de Júpiter e Saturno atingirem a ressonância 2:1; (c) espalhamento dos planetesimos após o deslocamento das órbitas de Netuno e Urano; (d) estrutura final após a ejeção dos planetesimos. Figura retirada de Nesvorný (2018) 13
- 1.4 Diagrama do conjunto de todos os pequenos corpos listados no Minor Planet Center. As escalas de distâncias são: (a) até 50 UA; (b) até 5.5 U.A. e (c) até 1.5 AU. Site: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/MPLists.html> (acessado em 06.11.2023). 14
- 1.5 Distribuição espacial semi-eixo maior versus excentricidade, de todos os NEO catalogados. Os diferentes marcadores e cores representam os grupos dinâmicos: Apolo (triângulo invertido verde), Amor (triângulo cor vermelho alaranjado), Atena (quadrado ouro) e Atira (triângulo invertido verde-escuro, porém não é possível distingui-los, devido ao seu baixo número relativo aos outros objetos). As curvas vermelha, verde, laranja e azul claro são zonas limites de $q = 0.25, 0.5$ e 1 U.A., respectivamente. 16

1.6	Classificação Taxonômica Bus-DeMeo com 25 classes, divididas em quatro grupos: tipo C , associado a material rico em carbono, tipo S associado a material rico em silicatos, tipo X associado a materiais metálicos, e os end members, que apresentam mineralogia distintas. Figura retirada de http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html	18
1.7	Meteoroides que penetram na atmosfera terrestre, em função da massa e do diâmetro, de acordo com o método de Grün, figura retirada de Drolshagen et al. (2015).	24
1.8	Meteoróides que penetram a atmosfera da Terra, em função da massa e do diâmetro de acordo com o modelo de Brown, figura retirada de Drolshagen et al. (2015).	25
1.9	Meteoroides que penetram na atmosfera da Terra, em função da massa e do diâmetro, utilizando a interpolação dos modelos de Grün e de Brown, figura retirada de Drolshagen et al. (2015).	26
2.1	Diagrama da modelagem da corrente de meteoroides ligada ao NEO (20196256) 2003 EH1, figura retirada de Jenniskens (2007a).	33
2.2	Diagrama representativo de uma corrente de meteoroides formada por um cometa. No exemplo, a chuva Leonids, cujo o progenitor é o cometa Tempel Tuttle. Figura retirada de SAO (2017).	34
2.3	Gráfico mostrando a distribuição de frequências de velocidades heliocêntricas de meteoros esporádicos, com ajuste de uma curva de distribuição com $\mu = 42.53$ km/seg e $\delta = \pm 0.60$. A linha vertical tracejada marca o limite parabólico de velocidades, figura retirada de De Cicco (2020).	41
3.1	Histograma da classe de objetos selecionados para o cálculo de radiantes sintéticos.	68
3.2	Distribuição de corpos parentais tipo ACO (círculos pretos) da tabela 3.4, no espaço de semi-eixo maior versus a excentricidade, e linhas com $T_J = 2.00$ ($i = 0^\circ$) e $T_J = 3.05$ ($i = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ e 70°). As quatro curvas que representam as distâncias periélicas $q=0.25, 0.5, 1$ e 1.3 U.A., tem as cores azul claro, laranja, verde e vermelha. O tamanho dos círculos indica a inclinação do objeto, com tamanho maior para maiores inclinações.	76
3.3	Distribuição de órbitas de meteoros por faixa de λ_\odot : (a) August mu-Draconids $\lambda_\odot = 145^\circ - 158^\circ$, (b) Kappa Cygnids período $\lambda_\odot = 120^\circ - 160^\circ$, (c) August Draconids período $\lambda_\odot = 125.27^\circ - 169.82^\circ$, (d) December alpha-Draconids período $\lambda_\odot = 154^\circ - 162^\circ$. A variação de cores representa a velocidade geocêntrica do meteoro.	78

3.4	Contra um fundo de meteoros na faixa de λ_{\odot} entre 120° - 160° , plotamos na figura superior, posição dos riantes, por ra-dec, e na figura inferior, diagrama π -i. Cada simbolo marca a posição de IOD, AMD, AUD e KCG.	79
3.5	Diagrama das órbitas de meteoros conexos ao ACO 2020 HU6. Em azul escuro a órbita média de 2020 HU6, as órbitas verdes representam os 30 meteoros e as cores preta e laranja representam as órbitas dos riantes sintéticos, J2000xJ2000.	81
3.6	Evolução dos elementos orbitais de 2015 GD. (a) Periélio, (b) Curva de Semi-eixo maior, com 100 clones.	83
3.7	As quatro figuras de a-d acima representam as variações seculares do periélio, (a)semi-eixo maior, (b) periélio e (c) inclinação de 2015 GD, 2008 ED69, 2020 HU6 e 2002 GJ8. Na figura (d) mostramos os resultados das integrações para trás no tempo de 2002 GJ8, com encontros próximos com Júpiter.	84
3.8	Aplicação do critério D_{sh} nas órbitas de 2015 GD, 2002 GJ8, 2008 ED69 e 2020 HU6. Nota-se uma região de convergência de valores abaixo de 0.20 para todos os pares combinados, pouco antes de 5 000 anos atrás. As combinações parentais 2008 ED69 - 2020 HU6, 2015 GD - 2020 HU6 e 2015 GD - 2008 ED69 mostram valores abaixo de 0.05 em torno de 5 000 anos atrás. As cores das linhas representam cada par combinado, descritos na legenda da figura, acima à direita.	86
3.9	Diagrama do esquemático do complexo Kappa Gygids, contendo os ACO propostos e as chuvas associadas, com os valores de <i>Match</i> de cada NEA.	88
3.10	Distribuição de órbitas de meteoros por faixa de λ_{\odot} : (a)Northen δ -Aquarids (NDA, #026) $\lambda_{\odot} = 118.40^{\circ} - 169.29^{\circ}$, (b) August ι -Cetids (AIC, #00505) $\lambda_{\odot} = 140.27.^{\circ} - 168.92^{\circ}$, (c) phi-Cetids (PCE, # 642) $\lambda_{\odot} = 156.00^{\circ} - 172.00^{\circ}$, (d) North iota-Aquariids (NIA, #033) $\lambda_{\odot} = 140.86^{\circ} - 189.62^{\circ}$	91
3.11	Contra um fundo de meteoros na faixa de λ_{\odot} entre 110° - 200° , plotamos na figura superior, posição dos riantes, por ra-dec, e na figura inferior, diagrama π -i. Cada simbolo marca a posição de PCE, NIA, NDA e AIC.	92
3.12	Diagrama da órbitas, em cor verde, dos 8 meteoros conexos ao ACO 2017 MM7 (n° sequencial spkid 3776128), a órbita de cor preta corresponde ao objeto e a azul ao radiante sintético, , J2000xJ2000.	95

3.13	Variação do critério D_{sh} das órbitas de 2003 EH1 e 2017 MM7, dentro de um período de 10 000 anos. Nota-se uma região de convergência de valores abaixo de 0.05, há cerca de 1 000 e 2 000 anos atrás.	97
3.14	As três figuras de a-c acima representam as variações seculares do periélio, semi-eixo maior e inclinação de 2003 EH1 e 2017 MM7, respectivamente.	99
3.15	Diagrama complexo Quadrantids, contendo os ACOs propostos e as chuvas associadas, com os valores de <i>Match</i> de 2017 MM7 e as órbitas associadas.	100
3.16	Diagrama da órbitas, em cor verde, dos 15 meteoros conexos ao ACO 2009 WN25 (n° sequencial spkid 3478247), a órbita de cor preta corresponde ao objeto e a azul ao radiante sintético, J2000xJ2000.	102
3.17	Distribuição de órbitas de meteoros por faixa de λ_{\odot} . (a) November Draconids período $\lambda_{\odot} = 225^{\circ} - 238^{\circ}$, (b) November i-Draconids período $\lambda_{\odot} = 221^{\circ} - 268^{\circ}$, (c) December alpha-Draconids período $\lambda_{\odot} = 230^{\circ} - 265^{\circ}$	103
3.18	Contra um fundo de meteoros na faixa de λ_{\odot} entre $220^{\circ} - 270^{\circ}$, plotamos na figura superior, posição dos riantes, por ra-dec, e na figura inferior, diagrama π -i. Cada simbolo marca a posição de NED, NID e DAD.	104
3.19	Diagrama do complexo alpha-Draconids, contendo o ACO 2009 WN25 proposto e as chuvas associadas, com os valores de <i>Match</i> e as órbitas associadas.	105

Lista de Tabelas

1.1	Quadro demonstrativo de grupos dinâmicos por critério de Tisserand e Período Orbital.	27
2.1	Quadro de faixas de densidade nuclear de acordo com diferentes autores	35
2.2	Quadro descritivo de tipos de meteoritos por densidade média e porosidade	45
2.3	<i>Thresholds</i> dos principais métodos de aplicação de critérios de dissimilaridades	48
2.4	Elenco de complexos asteroides - meteoroides	50
3.1	Dados Comparativos de distância mínima e critério D_{sh} (retirados de Neslusan et al. (1994)).	62
3.2	Associações de objetos encontradas na validação do algoritmo “ <i>Match</i> ”	70
3.3	Discriminação de objetos tipo NEO por faixa de falso-positivos	71
3.4	Resultados obtidos utilizando a metodologia descrita na subseção 3.3 .	72
3.5	Chuva #470 AMD e suas probabilidades de associação	77
3.6	Parâmetros médios das coordenadas equatoriais geocêntricas e seus respectivos elementos orbitais das chuvas AMD, KCG, AUD e IOD (J.2000).	77
3.7	Sumário de parâmetros de radiante e órbita (J.200) de 30 meteoros conexos a 2020 HU6.	80
3.8	Quadro comparativo de elementos orbitais (J2000) dos ACO relativos ao radiante da chuva AMD #470 e riantes sintéticos.	81
3.9	Quadro comparativo de elementos orbitais (J2000) com os dados de riantes das chuvas e riantes sintéticos.	93
3.10	Sumário de parâmetros de radiante e órbita (J.200) de 8 meteoros conexos a 2017 MM7.	94
3.11	Sumario de parametros de riantes e órbitas de 15 meteoros conexos a 2009 WN25 (J.200).	101
3.12	Parâmetros médios da chuva e os elementos orbitais (J.2000) do candidato a corpo parental, inclusive seu radiante sintético.	103

B.1	Output tabelados de NEAS	192
B.2	Output tabelados de NEAS	192
B.3	Output tabelados de Cometas	193
B.4	Output tabelados de Asteróides	193
D.1	Tabela descritiva de classes de Órbitas do SBDB - versão 1.5	202

Nomenclaturas

- ACOS:** do inglês, Asteroids in comet-like orbits (asteroides em órbita cometária).
- ALMA :** do inglês, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (rede Atacama grande milímetro/submilímetro).
- AMD :** Momento angular total.
- CAIs :** Inclusões de Cálcio e Alumínio.
- CILBO:** do inglês, Canary Island Long-Baseline Observatory (Observatório de base linha longa das Ilhas Canárias).
- COAST:** Coordenação de Astronomia e Astrofísica do Observatório Nacional – unidade de pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (ON/MCTI).
- CP :** do inglês, Main Belt (cinturão principal).
- EC :** do inglês, Elliptical Comets (cometas eclípticos).
- EFN:** do inglês, European Fireball Network (rede europeia de bólidos).
- ESA:** do inglês, European Space Agency (agência espacial europeia).
- SSB:** do inglês, Solar System Barycenter (baricentro do Sistema Solar).
- SS:** Sistema Solar.
- UAI:** União Astronômica Internacional.
- GM :** parâmetro gravitacional solar.
- NEO :** do inglês, Near Earth Objects (objetos próximos à Terra).
- HST :** do inglês, Hubble Space Telescope (telescópio espacial Hubble).
- HTC :** do inglês, Halley Type Comets (cometas tipo Halley).
- JFC :** do inglês, Jupiter family Comets (cometas da família de Júpiter).
- JWST :** do inglês, James Webb Space Telescope (telescópio espacial James Webb).
- MBA:** do inglês, Main Belt Asteroids (cinturão principal de asteroides).
- MDC :** do inglês, Meteor Data Center (centro de dados de meteoros).
- mid-IR:** do inglês, Mid Infrared (infravermelho médio).
- MMR:** do inglês, mean Motion Resonance (ressonâncias de movimento médio).
- MOID :** do inglês, Minimum Orbit Intersection Distance (Mínima distância de intersecção orbital).
- NEA:** do inglês, Near Earth Objects (asteroides próximos à Terra).
- NEC:** do inglês, Near Earth Comets (cometas próximos à Terra).
- NIR:** do inglês, Near Infrared (infravermelho próximo).

PCA : do inglês, Principal Component Analysis (análise de principal componente).

SFD: do inglês, Size frequency Distribution (distribuição de frequências de tamanhos).

SDOs : do inglês, Scattered Disk Objects (objetos do disco espalhado).

TC: do inglês, Taurids Complex (complexo das Taurids).

UV : do inglês, Ultraviolet (comprimento de onda do ultra violeta).

VIS: do inglês, Visible Infrared (infravermelho visível).

Capítulo 1

Introdução

”...one of the most fundamental problems of science. Together with the origin of the Universe, galaxy formation, and the origin and evolution of life, it forms a crucial piece in understanding, were we, as a species, come from.”

J. Lissauer, 1993.

Iniciar o tema principal deste trabalho implica, antes de tudo, em contextualizar a formação de nosso Sistema Solar entendendo a formação e origem dos pequenos corpos. Particularmente, estudá-los fundamenta a motivação desse estudo, ou seja, buscar as relações entre meteoroides, meteoros e chuvas de meteoros e corpos parentais (os asteroides e cometas), analisando suas propriedades físicas e orbitais.

A investigação de progenitores de correntes de meteoroides é um tópico importante na compreensão da estrutura e dinâmica dos corpos asteroidais e cometários, assim como para estudar a relação das propriedades físicas e dinâmicas dos meteoros com o fluxo de meteoroides que penetram na atmosfera terrestre.

Para uma primeira visão do quadro que compõe o nosso sistema planetário, podemos dividi-lo em seus objetos: estrela principal, planetas, planetas Anões e pequenos Corpos, estes ainda se subdividem em Objetos de Kuiper e Transneptunianos, asteroides, cometas, objetos próximos a Terra, meteoroides e partículas de poeira. A composição física do nosso Sistema Solar (SS) estabelecida pela UAI (União Astronômica Internacional) (Seidelmann and Urban, 2010) define o Sol como seu corpo primário, uma estrela de tipo espectral G2V, da sequência principal, com massa de $1.98847 \pm 0.00007 \times 10^{30}$ kg e GM (parâmetro gravitacional solar)

de $1.32712440042 \pm 0.0000000001 \times 10^{20} \text{ m}^3/\text{s}^2$. O Sol corresponde cerca de 99.8% de toda a massa do SS conhecido, cujos limites se estendem até cerca de 100 000 U.A. .

Os planetas podem ser divididos em tipo terrestres (ou rochosos) - Mercúrio, Vênus, Terra e Marte e tipo gigantes - Júpiter, Saturno (ou gasosos), Urano e Netuno (ou gigantes gelados). O primeiro grupo situa-se entre 0.4 a 2.5 U.A., o qual é separado por um cinturão de asteroides (cp), é seguido pelos planetas do segundo grupo, ocupando a região entre 5 a 30 UA. Os gigantes gasosos possuem massa específica de cerca de $1 \text{ g}/\text{cm}^3$, compostos primariamente por hidrogênio e hélio, enquanto que os gigantes gelados apresentam massa específica média de $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$, podendo conter gelos de água, metano e amônia.

Os planetas tendem a possuir seus planos equatoriais próximos ao plano da eclíptica, com exceção de Urano que possui seu pólo rotacional inclinado cerca de 90° . São definidos como planetas anões (134340) Plutão, (1) Ceres, (136108) Haumea, (136199) Éris (136572) e Makemake.

Por fim, a classificação de pequenos corpos que engloba os objetos Transneptunianos (TNOs), os cometas de curto e longo período, assim como os hiperbólicos, os asteroides na região entre Marte e Júpiter, os objetos em órbita próxima a Terra (NEOs), que subdividem-se em tipo Amor, Atenas, Apolo e Atiras, e os meteoroides e partículas de poeira. Os satélites e anéis também podem ser incluídos nesta classificação, embora eles estejam em órbita de planetas ou de asteroides, como (65803) Didymos e seu satélite S/2003, Dimorphos e o objeto centauro ¹, (10199) Chariklo rodeado por anéis.

Todos os corpos do SS giram em torno de um baricentro, que dinamicamente se desloca, às vezes localizando-se dentro de um raio do Sol ($695\,700 \text{ km}$) e por vezes fora (Park et al., 2021), devido a variação do movimento do centro de massa do Sistema, que é influenciado fundamentalmente pelas posições e massas dos planetas, especialmente os gigantes gasosos, Júpiter e Saturno.

O foco deste trabalho são os pequenos corpos, particularmente os meteoroides que penetram na atmosfera terrestre, conhecidos como meteoros, e seus corpos parentais. Estes objetos incluem grãos de poeira e rochas originadas de ejeções de atividade cometária e também de colisões entre corpos maiores, e tem, por definição, um diâmetro abaixo de 1 m (Wood, 2019), estudos dinâmicos confirmam que certos

¹Na subseção 1.2.2 detalhamos a definição do grupo Centauro.

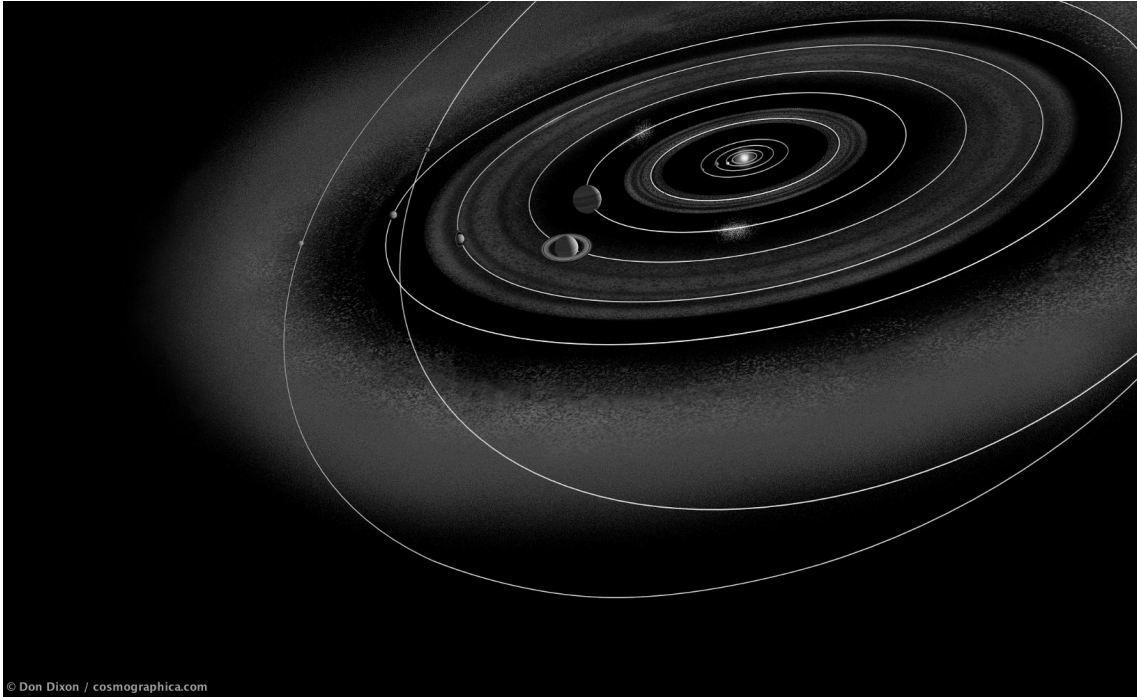


Figura 1.1: Diagrama, fora de escala, mostrando a posição do cinturão de asteroides, do cinturão de Transneptuniano, incluindo as órbitas mais externas de planetas anões: Plutão e Eris. Digital, for Scientific American; Artwork © 2007 Don Dixon / cosmographica.com

caminhos, combinados com efeitos perturbativos gravitacionais e não-gravitacionais, podem trazer tais objetos em direção ao nosso planeta, bem como mantê-los em correntes de detritos que, ao cruzarem a órbita terrestre, produzem o que se conhece como chuva de meteoros.

Na próxima Seção vamos abordar os trabalhos mais recentes sobre como nosso Sistema Solar se formou e o surgimento das regiões contendo os pequenos corpos.

1.1 A formação do Sistema Solar

O Sistema Solar teve origem do colapso de uma nuvem molecular, possivelmente como resultado da explosão de uma estrela mais antiga. A estrela jovem, assim formada, e seu disco são referenciados como Nebulosa Solar Primitiva. A atual existência abundante de matéria sólida sugere que o processo principal de formação ocorreu através da acreção, à partir de grande número colisões, dando origem aos planetas e corpos menores que se formaram em torno da jovem estrela solar, há cerca de 4.57 bilhões de anos.

Quando as primeiras partículas se condensaram, o disco protoplanetário gasoso perdurou por cerca de 2 a 10 milhões de anos, sendo que muito provavelmente os planetas gasosos Júpiter e Saturno iniciaram sua formação neste período. A criação dos planetas terrestres teve provável início após 30 – 100 milhões de anos da dispersão do disco de gás, embora a física do estágio de disco protoplanetário ainda não seja bem determinada (Nesvorný, 2018).

Uma característica importante na formação de nosso Sistema Solar consiste na criação dos planetas em um disco achatado, que orbitava um jovem proto-Sol, esse tipo de estrutura tem sido observado em inúmeras regiões protoplanetárias extra-solares.

Os discos protoplanetários tem sido detectados por missões observacionais ², como HST, JWST e o ALMA, evidenciando a típica formação de um sistema de planetas em torno de uma estrela central jovem. A figura 1.2 mostra uma imagem do sistema protoplanetário Orion 294-606, feita na faixa do hidrogênio, centrada linha Paschen-alpha, em 1.87 microns, realizada pela NIRCcam do JWST (Britt and Consolmagno, 2000).

O modelo de Nice que descreve a formação do disco primordial é atualmente o mais aceito tendo fornecido, mediante simulações numéricas, a compreensão das várias propriedades e alimentando pistas sobre os estágios iniciais e evolução subsequente do SS (Morbidelli et al., 2005, 2007). Este modelo, entretanto, não consegue explicar satisfatoriamente algumas propriedades físicas do SS, como a arquitetura secular do sistema protoplanetário externo, a sobrevivência dos planetas terrestres e a estrutura orbital do cinturão interno de asteroides.

O modelo prevê a evolução planetária de forma estocástica, quer diz pequenas variações nos parâmetros nas condições iniciais geram resultados diferentes, de forma que milhares de simulações com pequenas variações nas condições iniciais podem ser testadas.

Basicamente o processo de formação de nosso Sistema Solar passou inicialmente por um “estágio de colapso”, que pode ter durado entre 10^5 a 10^6 anos, quando gás e poeira se precipitaram na direção do plano equatorial do disco, com os movimentos de matéria perpendiculares sendo cancelados e a energia sendo dissipada em forma de calor. A metade da energia gravitacional é convertida em energia cinética

²No site <https://www.circumstellardisks.org/>, atualizado em 13.08.2021 e acessado em 10.10.2022, estão catalogados 323 discos resolvidos e 24 não resolvidos.



Figura 1.2: Nesta imagem é possível identificar a silhueta de um sistema planetário em formação, em torno da estrela jovem *Theta 1 Orionis C*, de cerca de 1 milhão de anos. A escala mostra o comprimento longitudinal do disco protoplanetário, com ≈ 300 UA. Em destaque, no canto inferior esquerdo, figura ampliada do sistema. Imagem tirada de <https://www.circumstellardisks.org/>.

orbital, sendo descrita pela seguinte fórmula (Lissauer and de Pater, 2013):

$$\frac{G M_{\text{protoestrela}}}{2r_{\odot}} = \frac{(V_c)^2}{2}, \text{ por unidade de massa disponível para o calor.} \quad (1.1)$$

G é a constante gravitacional.

$M_{\text{protoestrela}}$ é a massa da estrela primordial.

r_{\odot} é a distância à estrela primordial.

V_c - velocidade da unidade de massa.

À medida em que os gases em velocidades supersônicas vão em direção ao plano médio da nebulosa protoplanetária, são desacelerados quando atravessam ondas de choque, devido à acreção no disco. As típicas temperaturas pós-choque podem atingir temperaturas de 1500 K próximo a 1 U.A. e ≈ 100 K a cerca de 10 U.A.. Um equilíbrio pode ser atingido quando as forças ficam balanceadas, ou seja, a

força gravitacional em direção ao centro opõe-se a força centrífuga e a força gravitacional, em direção ao plano médio, equilibra-se com o gradiente de pressão para fora.

A etapa seguinte é a “evolução dinâmica da parte interna do disco protoplanetário”. O momento angular e transferência de calor devido ao transporte de massa são determinantes para a estrutura e evolução do disco. As partículas de sólidos e gás são expelidos e sujeitas a um rápido aquecimento intenso devido a luminosidade da estrela jovem. Vale ressaltar que este mecanismo poderia produzir côndrulos e infusões refratárias ricas em cálcio e alumínio (CAI) encontrados em meteoritos mais primitivos.

Após essa etapa, segue-se a fase de “runway”, onde o parâmetro fundamental consiste na velocidade relativa entre os planetesimos, pois se $V \gtrsim V_e$ (V_e é a velocidade de escape do planetesimo.) a taxa de crescimento é proporcional a sua dimensão radial ao quadrado (R^2) e ocorre um crescimento organizado entre a distribuição de tamanhos. Entretanto, se $V \ll V_e$, a taxa de crescimento dos planetesimos será proporcional a R^4 , o que leva a taxas rápidas de crescimento, ocasionando o “runway growth”, e os crescimentos oligárquicos.

Como no SS não restou mais nenhum gás entre os planetas, algum processo de expulsão deve ter ocorrido, numa etapa de “limpeza”. Uma possível explicação seriam os intensos ventos solares da fase *T Tauri* de nosso Sol, retirando todo o material volátil, adicionalmente alguns estudos apontam que elevadas taxas de UV do Sol jovem ou de estrelas próximas massivas induziram fotoevaporação no disco (Lissauer and de Pater, 2013; Nesvorný, 2018).

O excesso de material presente na parte mais externa do SS primordial pode ter sido ejetado em direção às regiões bem exteriores, onde hoje se localiza a nuvem de Oort ou serem expelidos para o meio interestelar pelos planetas gigantes.

Acredita-se que a formação dos planetas não tenha sido um processo eficiente, já que qualquer excitação das órbitas das menores partes constituintes do disco poderia frustrar o crescimento destes. O processo de migração *planetesimals-driven* é fundamental para a compreensão de estruturas como o cinturão Transneptuniano e os gigantes gelados, Netuno e Urano (Hahn and Malhotra, 2005). Simulações numéricas indicam que o processo de acreção na região além de U.A. deve ter sido lento, seguido por poucas perturbações, finalizando o mecanismo com a extinção do gás nebular primordial. A migração de *planetesimals-driven* pode ser resumido como a interação gravitacional entre planetesimos e planetas, com

a troca de momento angular e energia, conforme a equação a seguir (Nesvorný, 2018):

$$\frac{\delta r}{r} \simeq -C \frac{m}{M} \quad (1.2)$$

, onde:

M : massa do planeta

r : raio da órbita

m : massa do planetesimo

C : constante $\simeq 1$ (Malhotra, 1993)

δr : variação do raio orbital.

Conforme a equação 1.2 acima, se Júpiter com $r \simeq 5$ AU ejetasse $15 M_{\oplus}$ (massas terrestres) de massa planetesimal ele perderia cerca de $\delta r \simeq -0.2$ AU. Dessa forma, o planeta espalhando planetesimos na direção do interior do SS, resultaria em ampliação de seus raios orbitais, neste modelo a evolução dinâmica é tipicamente violenta, com a ejeção de pelo menos um gigante gelado.

Júpiter e Saturno são compostos essencialmente de He e H_2 o que indica que se formaram antes que o disco protoplanetário fosse extinto, pelo menos num período de 10^7 anos antes do seu desaparecimento. O trabalho de Nesvorný and Morbidelli (2012) mostra resultados consistentes ao simular 10^4 variações de condições e parâmetros iniciais, testando o modelo *migration/planetary-driven*, com cinco planetas gigantes e um gigante gelado com massa comparável a Urano e Netuno, ejetado por Júpiter, considerando a massa do disco de ≈ 15 a $20 M_{\oplus}$.

Na região dos planetas terrestres, após o período de *runway* pode ter ocorrido uma fase de altas taxas de crescimento, levando à configuração atual. Os embriões planetários massivos se formaram em intervalos regulares com os protoplanetas, perturbando uns aos outros, em órbitas cruzadoras, com encontros próximos e violentos choques inelásticos induzindo os processos de acreção. Outra evidência consiste na obliquidade dos eixos de rotação dos planetas, de impactos cósmicos durante essa fase.

A interação entre os planetas gigantes e protoplanetas terrestres durante a fase de migração planetária foi marcada, principalmente, pela transferência de momento

angular (AMD) conservado e acoplagem secular (em Nesvorný, 2018, sec. 7), onde :

$$AMD = \sum_i m_i n_i a_i^2 [1 - (1 - e_i^2)]^{\frac{1}{2}} \cdot \cos i_i \quad (1.3)$$

n_i : frequência orbital do i-esimo planeta.

m_i : massa do i-esimo planeta.

a_i : semi-eixo maior do i-esimo planeta.

e_i : excentricidade do i-esimo planeta.

i_i : inclinação do i-esimo planeta.

A fórmula acima mostra que a transferência de momento angular implicaria na formação de órbitas circulares e coplanares. Nesta fase, ocorreram cruzamentos e colisões de protoplanetas terrestres. Porém, as simulações numéricas não apresentam bons resultados, com mais objetos interiores dos atualmente existentes, atualmente, e choques com Mercúrio. No caso particular do mecanismo da migração planetária ele atuaria num período de 50 milhões de anos, após a extinção do gás do disco protoplanetário.

As colisões entre protoplanetas podem ter sido também devido à acumulação de numerosos embriões planetários, inclusive corroborando a teoria da formação lunar (hipótese "Theia") devido a um impacto gigante durante este período, com um corpo comparável a Marte chocando-se com a Terra (Kegerreis et al., 2022).

Com referência à formação das regiões dos pequenos corpos como os cinturões de asteroides e transneptunianos, simulações de integrações numéricas estocásticas, constroem cenários iniciais tentando prever a estrutura atual. Neste sentido, estas populações desempenham papel fundamental na definição dos parâmetros da evolução dinâmica do Sistema Solar, com um todo.

Os asteroides no cinturão principal (entre 2 e 3 U.A.) tem uma massa total menor que $10^{-3} M_{\oplus}$, e acredita-se que o planeta Júpiter tenha sido o responsável pela perda de massa na região, devido ao espalhamento de embriões planetários. As ressonâncias com Júpiter também podem modificar as excentricidades e inclinações de planetesimos, levando à perda de material, na região.

Muito do material do cinturão pode ter sido espalhado em órbitas cruzadoras de Júpiter, e dali serem ejetados para fora do SS ou acretados por ele. Colisões em

altas velocidades levariam planetesimais a degradarem-se em grãos até vaporização parcial.

Embriões planetários formados no cinturão e presos em ressonâncias com Júpiter poderiam ser levados a altas excentricidades, perturbando vizinhos não ressoantes e promovendo uma migração orbital. A dispersão de componentes gasosos do disco protoplanetário poderia contribuir também com perturbações, espalhando locais ressoantes em largas porções da região dos asteroides.

Planetesimos da parte mais externa do disco protoplanetário foram dispersados pelos planetas e partes deles foram implantados em diversos locais. De acordo com estudos recentes estocásticos as probabilidades de implantação seriam: (i) no cinturão de asteroides, 5×10^{-6} ; (ii) os troianos, 5×10^{-7} ; (iii) o cinturão de Kuiper, 5×10^{-1} , (iv) disco espalhado, 5×10^{-3} , e (v) nuvem de Oort, 5×10^{-2} . Observações desses dados são consistentes com o modelos de migração e instabilidade, e confirmam a distribuição, tamanhos e órbitas desses corpos nestas regiões (Nesvorný, 2018).

Tanto Júpiter quanto Saturno, emergiram do disco protoplanetário em órbitas presas na ressonâncias 3:2 (e menos provável 2:1). No Sistema Solar primordial estas ressonâncias estavam em locais diferentes dos atuais, por exemplo a ressonância 3:1 se localizava a cerca de ≈ 2.8 U.A., movendo-se para dentro da parte central do cinturão principal, chegando atualmente a 2.5 U.A.. A distribuição orbital dentro do cinturão é resultado de ressonâncias primordiais e os seus deslocamentos, por mecanismos como a hipótese do *Jumping Jupiter* (Nesvorný, 2018).

A hipótese *Jumping Jupiter* consiste resumidamente do encontro de Júpiter e Saturno com um gigante gelado, num período entre 50 a 300 mil anos, onde as ressonâncias seculares também deslocam-se em distancias discretas, na região do cinturão principal, afetando as órbitas dos asteroides. O semi-eixo de Júpiter mudaria de < 2.1 U.A. e descontinuadamente passaria para > 2.3 U.A..

Esta hipótese pode melhor explicar a configuração atual do cinturão de asteroides, por este mecanismo a perda de matéria na região seria em torno de 80% da massa original, entretanto ela falha em não explicar a sua baixa massa de $\approx 5 \times 10^{-4} M_{\oplus}$. Nesta época, as partes internas do cinturão foram desestabilizadas por ressonâncias com Júpiter, contribuindo para impactos primordiais no Sistema Solar interno.

Sob a ótica das hipóteses do modelo de Nice, *migration/planetary-driven* e *Jumping Jupiter* procura-se explicar a existência dos objetos troianos que localizam-se em dois pontos lagrangianos L_4 e L_5 , com $a \approx 5$ U.A., $e < 0.15$, $i < 40^\circ$ e $\delta\lambda \approx \pm 60^\circ$ (diferença média de longitudes entre jupiter e troianos), e albedo entre 0.05 a 0.07.

Modelagem de capturas tipo caóticas explicariam a influência da migração de Júpiter e Saturno e as inclinações das órbitas observadas de até 40° , porém o modelo de *Jumping Jupiter* não consegue prever essas altas inclinações.

Por fim, no que se refere aos gigantes gelados, ainda na fase do disco primordial, eles poderiam estar presos em ressonâncias 3:2, 4:3 e 5:4. Se Urano e Netuno tivessem se formado tardiamente na fase final do disco, com baixa massa, as ressonâncias seriam 2:1 e 3:2 (Nesvorný, 2018).

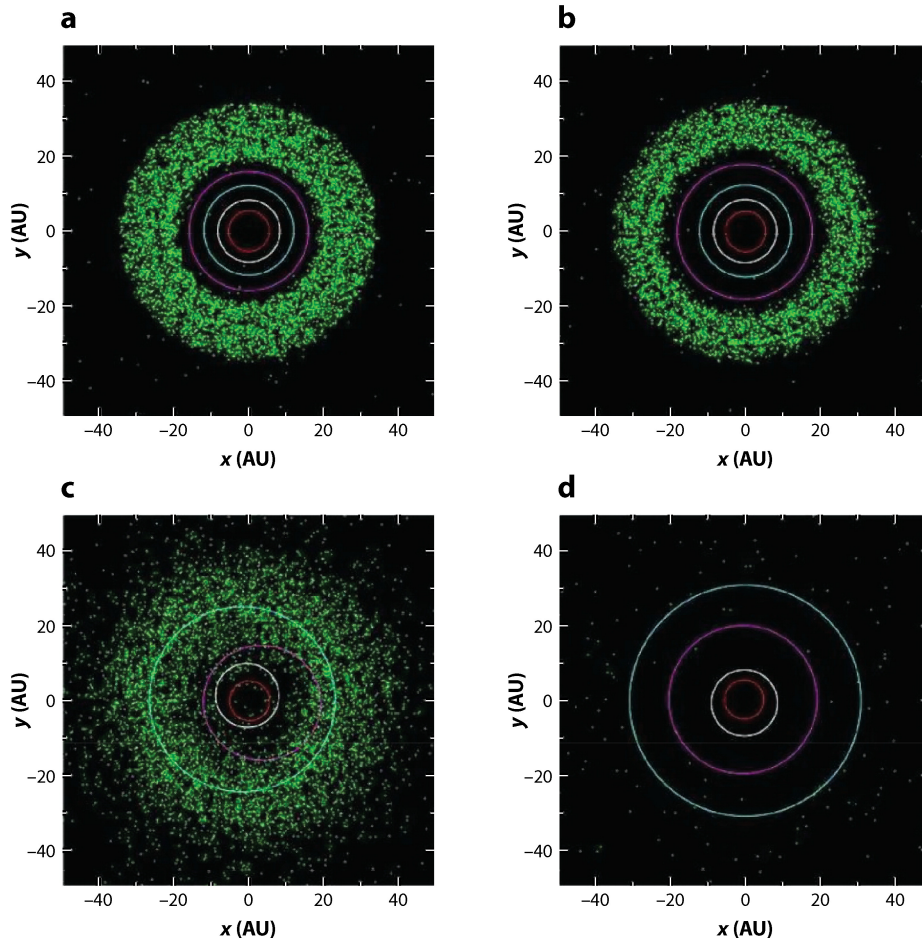
Netuno evoluiu, lentamente, através do disco de planetesimos, espalhando material planetesimal, num período que durou cerca de ≈ 10 Myr, até chegar à órbita atual, próxima de 30 U.A..

Ainda no contexto do modelo de Nice, a instabilidade inicial na formação do SS e a ocorrência de encontros próximos entre Urano e Netuno, paulatinamente foram sendo deslocados para fora do disco planetesimal, migrando até suas órbitas atuais.

Os planetas migraram quando Netuno chegou próximo de 27.7 U.A., uma instabilidade dinâmica deve ter ocorrido quando um quinto planeta realizou encontros com outros planetas, sendo posteriormente ejetado por Júpiter, ocasionado a alteração do semi-eixo maior do planeta joviano e modificando sua excentricidade até chegar ao valor atual (Nesvorný and Morbidelli, 2012).

Os planetas mais externos surgiram do disco protoplanetário de ressonâncias em compasso com Júpiter e Saturno, e Netuno, em torno de $\approx 20 - 25$ U.A. Inclusive modelos atuais aplicam a existência de um terceiro gigante gelado, entre as órbitas de Saturno e Urano, próximo a ≈ 10 U.A., com o disco de planetesimos na parte mais externa indo para além da órbita de Netuno até o limite de ≈ 30 U.A., com uma região de baixa-massa estendendo-se até, pelo menos ≈ 47 U.A..

Na figura 1.3, mostramos a simulação numérica do trabalho de Nesvorný (2018) apresentando as fases de estabilização do SS que foram discutidas nesta seção.



 Nesvorný D. 2018.
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 56:137–74

Figura 1.3: Simulação do modelo de Nice: (a) estrutura inicial; (b) configuração antes de Júpiter e Saturno atingirem a ressonância 2:1; (c) espalhamento dos planetesimos após o deslocamento das órbitas de Netuno e Urano; (d) estrutura final após a ejeção dos planetesimos. Figura retirada de Nesvorný (2018)

1.2 Os Pequenos Corpos

Pelos modelos descritos, concluímos que os pequenos corpos são remanescentes prístinos da época da formação, sendo inclusive, testemunhos da fase primordial e estando ainda em contínua evolução dinâmica.

Os pequenos corpos podem ser classificados por suas propriedades dinâmicas e físicas. A classificação dinâmica dos pequenos corpos tem como base suas características orbitais e posição no Sistema Solar: NEO (do inglês, Near Earth Objects, objetos próximos à Terra), cinturão principal, Troianos, Centauros, cinturão transneptuniano, a nuvem de Oort.

Lembrando que a massa do nosso Sistema Solar corresponde a cerca de

$338\,000 M_{\oplus}$ e se não levar em conta a massa de nossa estrela, sobra $\approx 4\,700 M_{\oplus}$. Entretanto, a massa total do cinturão de asteroides é de cerca de $0.001 M_{\oplus}$, enquanto do cinturão transneptuniano pode ter entre 0.1 e $0.01 M_{\oplus}$. Estas duas regiões são as principais fontes de NEO e cometas de curto período. À seguir, vamos aprofundar cada população.

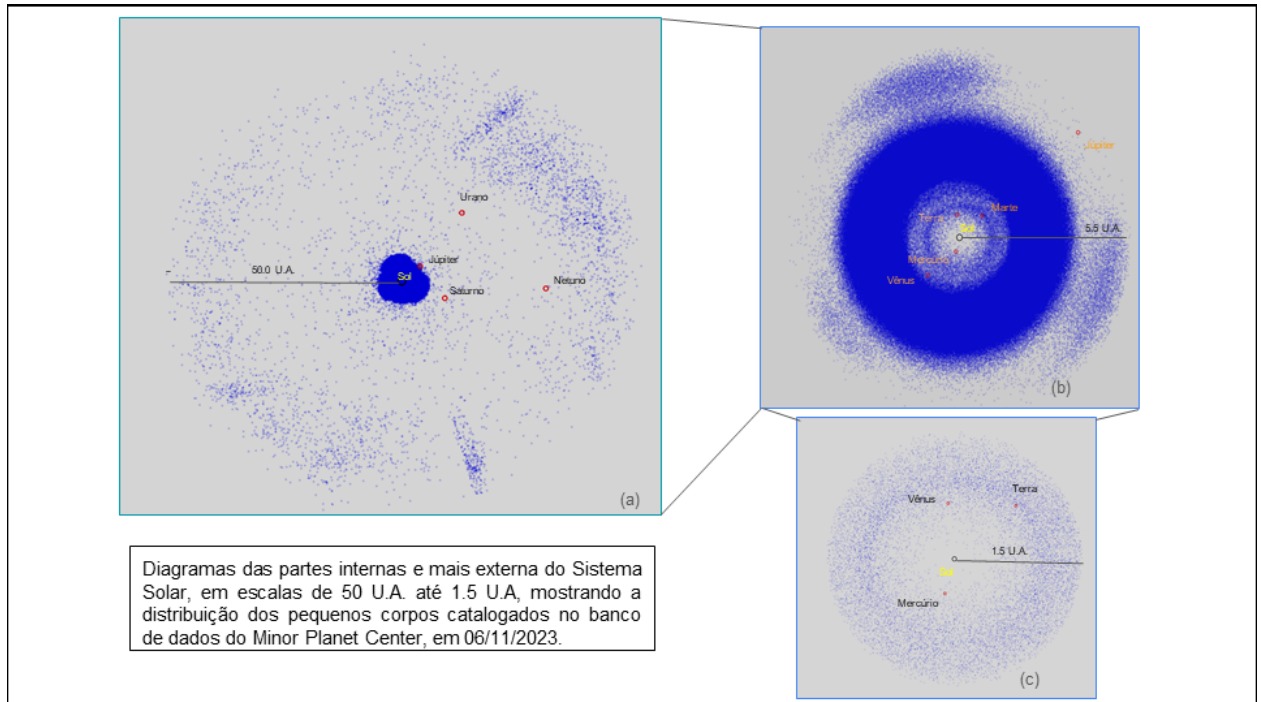


Figura 1.4: Diagrama do conjunto de todos os pequenos corpos listados no Minor Planet Center. As escalas de distâncias são: (a) até 50 UA; (b) até 5.5 U.A. e (c) até 1.5 AU. Site: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/MPLists.html> (acessado em 06.11.2023).

1.2.1 Objetos em órbitas próxima a Terra - NEO

A denominação NEO refere-se a objetos, cuja órbita alcança a distância de 1.3 U.A. a partir do Sol. Em geral, não apresentam nenhum tipo de atividade, com poucas exceções, como por exemplo, o asteroide 200 Phaeton (1983 TB), corpo parental da chuva de meteoros Geminids. Estudos dinâmicos confirmam que a grande maioria dos NEO tem sua origem no cp, e até Dezembro de 2023 são conhecidos mais de 34 mil objetos³.

Esta extensa população é composta por cometas, muitos dormentes ou extintos, asteroides e meteoroides. Esses objetos tem dimensões acima de dezenas de metros,

³<https://minorplanetcenter.net/>

chegando a ordem de dezenas de quilômetros. Suas órbitas aproximam-se ou interceptam a órbita da Terra. Dividem-se basicamente em 4 grupos dinâmicos: Amor, Apolo, Atenas e Atira. Os do tipo Amor, tem $a > 1$ U.A. e 1.017 U.A. $< q < 1.3$ U.A.; os da classe Apolo possuem $a > 1$ U.A. e $q < 1.017$ U.A.; os do tipo Atenas $a < 1$ U.A. e $Q > 0.983$ U.A. e os Atira possuem $a < 1$ U.A. e $Q < 0.983$ U.A. .

Os tipo Atenas, cruzam a órbita terrestre, e possuem curto período orbital. Seu diâmetro, em média, é menor do que 3 km, cerca de 300 desse tipo já estão caracterizados.

Os tipo Apolo, conhecidos também como cruzadores da Terra, pois tem seu semi-eixo maior que 1 U.A., tem dimensões menores que 10 km. Atualmente, conhece-se em torno de 18 000 desses objetos, a maioria tendo origem no CP por conta de interações ressonantes com o planeta Júpiter.

Os tipo Amor tem suas órbitas entre a Terra e Marte, com semi-eixo maior acima de 1 U.A. e $1.016 < q < 1.3$ U.A., embora não cruzem a órbita terrestre, perpassam a do planeta Marte. São catalogados cerca de 14 000 objetos desta classe e muitos encontros próximos com a Terra e Marte podem levá-los a evoluir e tornarem-se do tipo Apolo.

Os tipo Atira (IEO) possuem órbita inteiramente dentro da órbita da Terra, com $Q < 0.983$ U.A.. Devido à dificuldade observacional pela proximidade relativa ao Sol, na perspectiva da Terra, são conhecidos apenas 32 objetos e sua dinâmica orbital mostra que podem ser perturbados por encontros com o planeta Mercúrio.

A vida dinâmica de um NEO está em torno de 10^7 anos (Gladman et al., 2000), portanto, muito inferior ao tempo de existência de nosso Sistema Solar, cerca de 4.6 bilhões de anos. Isto implica que deve existir um fluxo contante de objetos para esta região. Estima-se, que as regiões de ressonância 3:1, ν_6 , e 5:2 e partes mais internas do CP sejam as principais fontes de reposição desta população.

Na figura 1.5 apresentamos um diagrama de semi-eixo maior, por excentricidade, da distribuição dos NEO catalogados no site <https://www.minorplanetcenter.net/data> (acessado em 21 de dezembro de 2023). As curvas de distância de periélio $q = 0.25, 0.5$ e 1 U.A. ao longo de a , são representadas pelas linhas contínuas. Grande parte desses grupos dinâmicos, principalmente os Apolo e Amor serão objetos de nosso estudo no Capítulo 3.

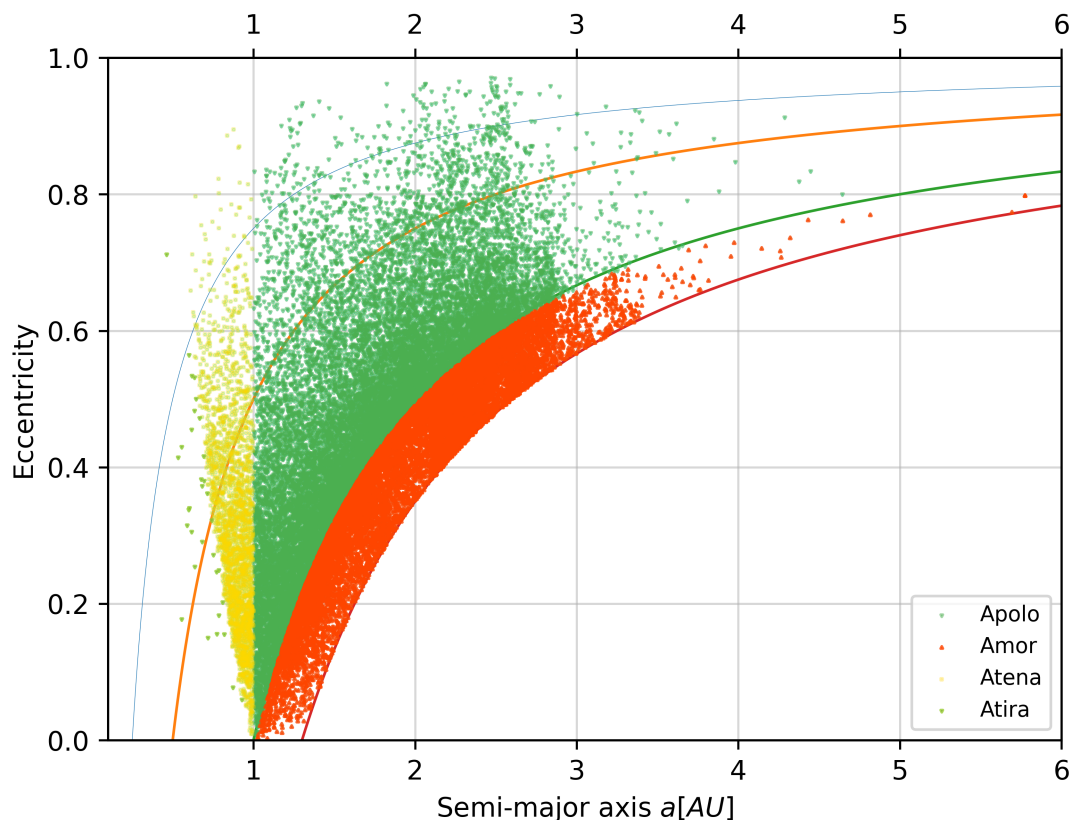


Figura 1.5: Distribuição espacial semi-eixo maior versus excentricidade, de todos os NEO catalogados. Os diferentes marcadores e cores representam os grupos dinâmicos: Apolo (triângulo invertido verde), Amor (triângulo cor vermelho alaranjado), Atena (quadrado ouro) e Atira (triângulo invertido verde-escuro, porém não é possível distingui-los, devido ao seu baixo número relativo aos outros objetos). As curvas vermelha, verde, laranja e azul claro são zonas limites de $q = 0.25, 0.5$ e 1 U.A, respectivamente.

Dessa extensa população de pequenos corpos que compõem a população de NEO, os NEA (do inglês Near Earth Asteroids, asteroides próximos à Terra) constituem uma grande parcela desses objetos com dimensões acima de dezenas de metros sendo corpos inativos. Entretanto, estudos apontam, que uma pequena parte podem ser de cometas adormecidos ou extintos. A população dos NEO abrange, por conseguinte, uma ampla gama de propriedades dinâmicas e físicas, que iremos explorar a seguir.

Outra população que faz parte dos NEO é conhecida como NEC (do inglês Near Earth Comets, cometas próximos à Terra) são cometas de curto período, $P \leq 20$ anos, na população de objetos em órbitas próximos à Terra, com $2.0 < T_J < 3.0$ (T_J é o critério de Tisserand, assunto abordado na subsecção 1.2.5), e vida útil em torno de 12 mil anos (Mommert et al., 2015).

Os NEA e NEC são considerados a principal fonte de meteoritos terrestres, dado que são os corpos com características mais próximas aos meteoritos do tipo condríticos, o tipo mais comum presente nas diversas coleções, aqui na Terra.

Mommert et al. (2015) mostra que cerca de 9% dos NEO podem ser NEC adormecidos, e NEO com $2.0 \leq Tj \leq 2.8$ e $\rho_v \leq 0.064$ (ρ_v e o albedo geométrico) tem 96% de probabilidade de ser um NEC. Portanto, estudar a fração de NEC, dentre os NEO, é importante para entender a evolução dos pequenos corpos no Sistema Solar. Além disso, podem se fragmentar em varias partes, como exemplo C/2012 S1 (ISON), dando origem a meteoroides.

1.2.2 Asteroides

Os asteroides estão no cinturão principal (cp) e são corpos que orbitam o Sol, remanescentes da época da formação planetária. Muitos são primitivos, não tendo sofrido aquecimento ou processos de fusão, enquanto outros não sofreram diferenciação.

O cinturão estende-se cerca de 2.2 a 3.3 U.A.e atualmente são catalogados mais de 10^6 objetos nesta região. A distribuição destes corpos não é homogênea existindo concentração devido à processos dinâmicos, os chamados grupos, como os Hungarias, Phocaea, Cybeles e Hildas, e à colisões, as famílias entre as quais, Flora, Koronis, Eos, Themis, e muitas outras.

Os asteroides podem ser classificados segundo muitos critérios diferentes: dinâmicos (proximidade a alguma ressonância, associação a famílias dinâmicas, estabilidade orbital, etc), estrutura interna (monolíticos, fragmentados, reacumulados), composição mineralógica e propriedades observacionais de suas superfícies.

A classificação de asteroide baseada em cor, espectro e albedo, é devido a grande variedade de suas superfícies. Isto pode ser obtido através da análise de seus espectros de reflectância (VIS/NIR e mid-IR) (Reddy et al., 2015), assim como com o auxílio de sondas com retorno de amostras, como as recentes missões Hayabusa -2 ao asteroide (162173) Ryugu (Kuninaka, 2021) e OSIRIS-REX ao asteroide (101955) Bennu, ambos com superfície mais primitiva.

A classificação baseia-se na análise dos espectros ligando cada tipo de asteroide

a uma composição mineralógica da superfície. Assim, a primeira classificação foi publicada por Chapman et al. (1975), os quais analisaram a composição de 110 asteroides, à partir de dados de cor e albedo e separando-os em 3 grupos: C - associados a material rico em carbono, S - associados a compostos ricos em silicatos e U - quando não se encaixam em nenhuma das duas categorias.

Com o desenvolvimento das técnicas observacionais, do aumento exponencial na identificação de asteroides e de novos métodos de análise (Tholen and Barucci, 1989; Bus and Binzel, 2002b; DeMeo et al., 2009b), mais classificações surgiram. Atualmente, a mais utilizada é a Bus-DeMeo (DeMeo et al., 2009a), a qual utiliza 25 classes, divididas em 3 grupos, C, S e X, além de outras 8 classes (end members). Na figura 1.6 é reproduzido o esquema taxonomico Bus-Demeo

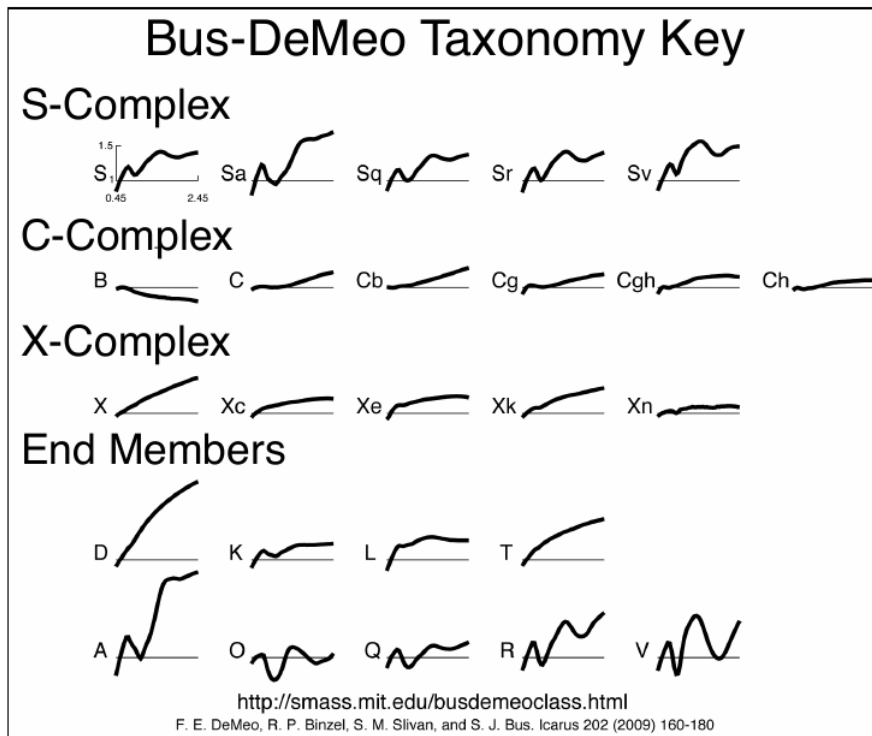


Figura 1.6: Classificação Taxonômica Bus-DeMeo com 25 classes, divididas em quatro grupos: **tipo C**, associado a material rico em carbono, **tipo S** associado a material rico em silicatos, **tipo X** associado a materiais metálicos, e os end members, que apresentam mineralogia distintas. Figura retirada de <http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html>

Os Troianos acompanham as mesmas órbitas dos planetas, localizando-se nos pontos lagrangianos L4 e L5, são conhecidos 6 planetas com esses objetos: Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Urano e Netuno.

Os mais numerosos são os de Júpiter e Netuno sendo principalmente do tipo P e D, com possibilidade de estarem relacionados a cometas ricos em H_2O -gelo. Formados além de 20 U.A., podem ter sido capturados da parte mais externa do disco de planetesimos ($a > 20$ UA), de acordo com os trabalhos de Morbidelli et al. (2005) e Nesvorný et al. (2013), os quais demonstraram capturas vindas do disco externo de uma quantidade significativamente grande desses objetos. Dados observacionais de Troianos estáveis são compatíveis as simulações de *Jumping Jupiter*, como a distribuição e massa de $\approx 10^{-5} M_{\oplus}$.

Atualmente a missão Lucy⁴ (Olkin et al., 2021) encontra-se a caminho dessa região, realizando *flybys* em asteroides do CP, mas com objetivo principal de investigar os Troianos de Júpiter.

1.2.3 As populações além de Júpiter

Os Centauros são objetos com órbitas entre Júpiter e Netuno, os quais por serem perturbados pelos gigantes gasosos, são instáveis. Exibem características tanto de cometas quanto de asteroides, com aproximadamente 30 deles mostrando comas de poeira semelhantes às dos cometas, indicando possível atividade (Jewitt and Hsieh, 2022) .

Por fim o cinturão transneptuniano é constituído por objetos com uma variada população de órbitas e classificados dinamicamente como: (a) ressonantes, (b) cinturão clássico ou de Kuiper, (c) disco espalhado e (d) objetos separados. Ocupa uma faixa que vai desde a órbita de Netuno, a cerca de 30 U.A. estendendo-se até 50 U.A. do Sol. São compostos principalmente por amônia, água e metano.

Simulações atuais apontam que o disco externo pode ter sido a fonte de populações de TNOs (Nesvorný, 2018), indicando que estes objetos e os Troianos podem ter compartilhado a mesma origem, mostrando a mesma SFD - Size Frequency Distribution (porém, com uma lacuna em objetos > 100 km). Logo, existe a possibilidade da região dos Troianos ser um repositório de materiais do cinturão transneptuniano. O artigo de Fernandez and Ip (1983), que estuda a interação entre planetesimais no disco protoplanetário, mostra que as estruturas do disco mais externo do Sistema Solar foram alterando-se, à medida os planetas cresceram e migraram.

⁴A Missão Lucy foi lançada em 16/10/2021 e levará uma jornada de 12 anos para visitar doze asteroides diferentes - dois do CP e dez Troianos de Júpiter.

1.2.4 Cometas

São corpos gelados que apresentam atividade (Dones et al., 2015), com a formação de um coma de gás e poeira e uma cauda, devido a irradiação solar e consequente sublimação de gelos de água, muitos deles podem atingir o Sistema Solar interno após sua saída de locais, como por exemplo, além da órbita de Netuno.

Os cometas possuem uma “vida útil”, dependendo da distância periélica e o seu número de passagens, como, por exemplo, os JFC (do inglês, Jupyter Family Comets, cometas da família de Júpiter) que tornam-se inativos após ≈ 500 passagens periélicas. Portanto, algum mecanismo dinâmico possibilita a constante reposição destes objetos, através de reservatórios mais externos no SS (Fernandez, 1980).

Os cometas são divididos dinamicamente em de Longo Período, $P > 200$ anos (LPC), e de Curto Período $P < 200$ anos (CP). A classificação de Levison (1996) também separa a população de cometas em Elípticos (EC) e Nearly-Isotropic Comets (NIC), os primeiros tem critério de Tisserand⁵ ($T_J > 2$), incluindo a família de Júpiter, cometas da parte interna do SS que não sofrem mais a influência de Júpiter e ainda Centaurus ativos, os segundos possuem $T_J < 2$ e incluem LPC e cometas Halley-type (HTC).

A injeção de cometas no Sistema Solar interior está ligada à nuvem de Oort, como também podem vir de outras regiões (Oort, 1950; Brassier and Morbidelli, 2013). As teorias mais aceitas mostram que quantidades de pequenos planetesimais, entre $10 - 1000 M_{\oplus}$ e formados entre ~ 3 a 30 U.A. do Sol, foram ejetados de regiões externas por perturbações gravitacionais dos planetas gigantes. O principal reservatório de cometas do tipo LPC, provavelmente, situa-se na nuvem de Oort.

Em recente estudo Dones et al. (2015), corroboram a ideia de que cometas eclípticos (EC) tem sua origem e evolução na região do cinturão de Kuiper, entre 30 - 50 U.A.. É possível que pequenos KBO, cruzadores da órbita de Netuno, sejam catapultados, por conta de perturbações planetárias em periélios menores que 2.5 U.A., tornando-os ativos e visíveis (Levison and Duncan, 1997).

Estes autores (Levison and Duncan, 1997) indicam que a região do disco espalhado seria a mais eficiente fonte de EC, pois os objetos em suas passagens periélicas aproximam-se de Netuno, sendo perturbados com a subsequente diminuição de seus

⁵A definição deste critério e detalhada na próxima subsecção 1.2.5.

períodos orbitais.

O modelo de Nesvorný et al. (2017) revela que cerca de 75% dos ECs teriam sua origem distribuída entre disco espalhado, de 50 a 200 U.A., sendo que $\approx 20\%$ pode ter se originado de $a < 50$ U.A., cerca de 4% dos ECs podem também ter se originado da população dos Plutinos (grupo dinâmico de objetos do cinturão de Kuiper ligados a ressonância 3:2 exterior a Netuno (Malhotra, 1995)).

Cometas tipo Halley (HTC) possuem inclinações e períodos maiores, em geral, do que os EC, sendo provavelmente originários de regiões mais achatadas da nuvem de Oort (Levison et al., 2001).

Um ponto importante a considerar sobre a origem dos cometas está no fato que a população de objetos transneptunianos, com tamanhos entre 1 a 10 km, ainda não está bem determinada. A simulação de Nesvorný et al. (2017) aponta que a produção de cometas pode ser inferida da estimativa do número de objetos originados do disco planetesimal e que por sua vez pode ser calibrada usando a estimativa da população dos Troianos de Júpiter.

Numa visão geral, modelos atuais apontam que cerca de 1.5×10^7 de cometas com dimensões > 10 km, podem existir entre $50 < a < 200$ U.A. e no total, a nuvem de Oort deve conter cerca de 3.8×10^8 destes objetos.

Devemos ressaltar que os modelos discutidos acima não conseguem satisfatoriamente explicar totalmente a origem e formação de todos os corpos do Sistema Solar atual. Persistem ainda muitas lacunas no sentido de ter um modelo coerente, como as migrações planetárias para dentro da órbita de Júpiter, a posição atual de algumas famílias de asteroides no cp, as altas inclinações de Urano e Plutão, o movimento retrógrado de rotação de Vênus e Urano, por exemplo.

1.2.5 Critério de Tisserand e o limite entre asteroides e cometas

O parâmetro de Tisserand (T_j) é definido como um invariante do problema restrito de 3-corpos, com aproximação circular e dado por:

$$T_j = \frac{a_j}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_j}(1-e^2)} \times \cos i \quad (1.4)$$

onde a , e são os elementos orbitais do objeto, a_j o semi-eixo maior de Júpiter e i é o valor da inclinação do objeto.

O critério de Tisserand relaciona-se com a velocidade de encontros U , em relação à Júpiter, pela seguinte fórmula:

$$U = \sqrt{3 - T_j} \quad (1.5)$$

Dessa forma, a velocidade de encontro será válida para $T_j \leq 3$, Kresak (1979) mostrou que, em geral, os asteroides apresentam valor $T_j > 3$ e cometas, $T_j < 3$.

É importante ressaltar que algumas populações, classicamente consideradas como asteroides, tais como os Troianos, não satisfazem este critério, isso devido às hipóteses incluídas na equação 1.4 e casos limites, como objetos em órbita cometária que não mostram atividade e corpos em órbita asteroidal apresentando atividade.

O critério de Tisserand não considera outros corpos massivos como por exemplo Marte e Vênus que também geram perturbações gravitacionais assimétricas em pequenos corpos, quando ocorrem encontros próximos. Perturbações não-gravitacionais, como os efeitos radiativos, não se incluem da mesma forma na equação do parâmetro, como a pressão de radiação e o efeito YARKOVSKI os quais podem alterar a órbita ao longo de milhares de anos.

Também não são consideradas as perturbações não-gravitacionais, como assimetria da exaustão de grãos⁶ (Fernández et al., 2002) e efeitos seculares de processos radiativos, assim como a verdadeira forma da órbita de Júpiter que é quase-circular.

Assim, torna-se questionável, usar o valor de *threshold* de $T_j = 3$, como um limite de separação dinâmica entre cometas e asteroides, pois não leva em conta outras perturbações e o formato real da órbita de Júpiter. No Capítulo 3 este critério será novamente abordado, à partir de resultados da nossa investigação sobre corpo parentais de meteoróide, em órbitas típicas cometárias.

Outro ponto importante a considerar envolve a evolução dinâmica que pode levar um objeto de um lado do valor limite = 3 para o outro lado (Fernández and Sosa, 2015), como no caso do cometa 249P/LINEAR. Interações com a ressonância 2:1 (MMR) com Júpiter pode excitar a excentricidade de MBA, modificando o T_j

⁶Efeito não-gravitacional menos provável de outgassing causando assimetrias, contribuindo para o desvio de evolução dinâmica apenas gravitacional.

para um valor mais baixo.

À seguir vamos discutir sobre o fluxo de massa (“*mass stream*”) que atinge a Terra, vindo principalmente de cometas e asteroides próximos, pois são as fontes principais de meteoroides e meteoros.

1.2.6 Meteoroides

São objetos sólidos que se movem no espaço interplanetário ou penetram a atmosfera, sendo de origem natural, com um tamanho estimado de $30\ \mu\text{m}$ a $1\ \text{m}$ (IAU, 2017). A principal fonte destes corpos são os NEO, e quando sobrevivem a fase de meteoro, resistindo a completa vaporização, tornam-se meteoritos. O trabalho de Vernazza et al. (2008) demonstrou, por exemplo, a relação entre um NEA e os meteoritos condrito do tipo LL, sugerindo que a família Flora, na parte interna do CP, poderia ser uma importante fonte.

Babadzhanov et al. (2008), por exemplo, identificaram a possibilidade do NEO 2003 WP21, 2003 UL3 e 2004 TG10 estarem associados a correntes de meteoroides do complexo Taurids. Outros autores também realizaram cruzamentos de associação entre corpos progenitores e meteoros deste complexo (Porubčan et al., 2006; Jopek, 2011), achando resultados similares. Estudos aventam a possibilidade da fragmentação de um cometa há cerca de 20 000 anos, deixando corpos menores, como NEO e sub-correntes formando o referido complexo.

A análise do fluxo de massa que impacta na Terra é feita através de diversas técnicas, conforme apontam Drolshagen et al. (2015):

1. Estudo de microcrateras em amostras de rochas lunares;
2. Análise de equipamento de hardware de satélites recuperados;
3. Medições óticas e radares;
4. Bólidos;
5. Crateras de impacto em nosso planeta combinado com simulações de NEO.

Existem 2 modelos básicos de simulação de entrada de fluxo de matéria na atmosfera terrestre denominados modelo de Grün, e de Brown.

O modelo de Grun et al. (1985), baseia-se em medições de microimpactos em espaçonaves, microcrateras lunares e fotometria da luz zodiacal, abrangendo de 10^{-21} a 10^{-3} Kg, e sendo definido por:

$$Fm = (2.2 \times 10^3 m^{0.306} + 15)^{-4.38} + 1.3 \times 10^{-9} \times (m + 10^{11} m^2 + 10^{27} m^4)^{-0.36} + 1.3 \times 10^{16} m + 10^6 m 2^{-0.85} \quad (1.6)$$

A unidade de massa m está em gramas e de fluxo de massa em $kg m^{-2} seg^{-2}$. Este modelo não leva em conta o fator G resultante do efeito da gravidade na Terra o que aumenta o fluxo de objetos impactantes. Para se compensar isto, é levado em conta a velocidade de escape, $v_{esc} = \sqrt{2 \frac{\mu}{r+H}}$, onde r é o raio médio da Terra, H a altura considerada ($H=100$ km, por definição) e $\mu = 3.986 \cdot 10^5 \frac{km^3}{seg^2}$. Assim, para uma altura de 100 km teremos $v_{esc}=11.099$ km/seg, e aplicando a fórmula de cálculo do fator $G = \frac{v^2}{v^2 - v_{esc}^2}$, para uma velocidade média de $v=20$ km/seg, assumida para os meteoroides, obteremos um fator de 1.445 a ser multiplicado por Fm .

Na figura 1.7 é mostrado o fluxo de massa em função da massa e do diâmetro, para um acumulado anual, calculados no artigo de Drolshagen et al. (2015):

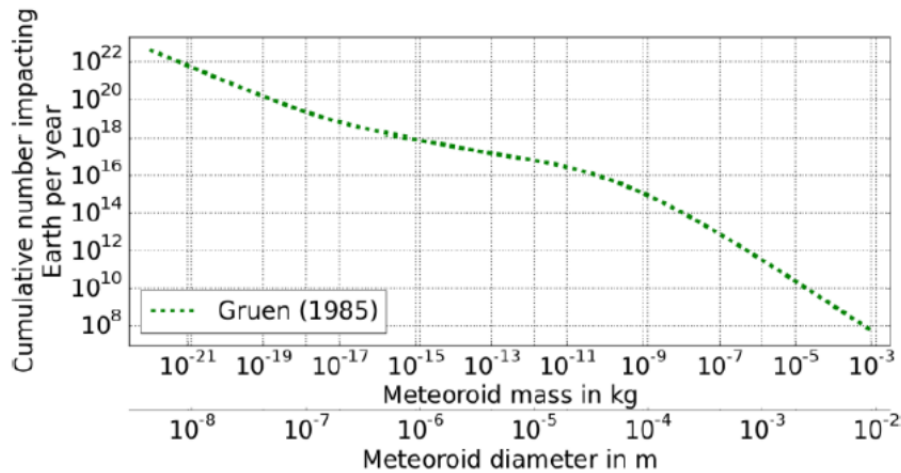


Figura 1.7: Meteoroides que penetram na atmosfera terrestre, em função da massa e do diâmetro, de acordo com o método de Grün, figura retirada de Drolshagen et al. (2015).

Já o modelo de Brown (Brown et al., 2002) leva em conta o número cumulativo de meteoroides impactando a Terra anualmente, com uma dependência na energia E (em kilotons). Esse modelo é baseado em dados de bólidos registrados por sensores de satélites, variando o diâmetro entre 1 e 9 m, interpolando-se até 20 km.

A fórmula que descreve esse fluxo é dada por:

$$F_B = 3.7 E^{-0.9} \quad (1.7)$$

, ou convertendo-se em energia cinética obteremos:

$$F_B(m) = \left(\frac{mv^2}{24.185 \cdot 10^{12}} \right)^{-0.9} \quad (1.8)$$

Na figura 1.8, reproduzimos o gráfico do artigo de Drolshagen et al. (2015), obtida pelo modelo Brown.

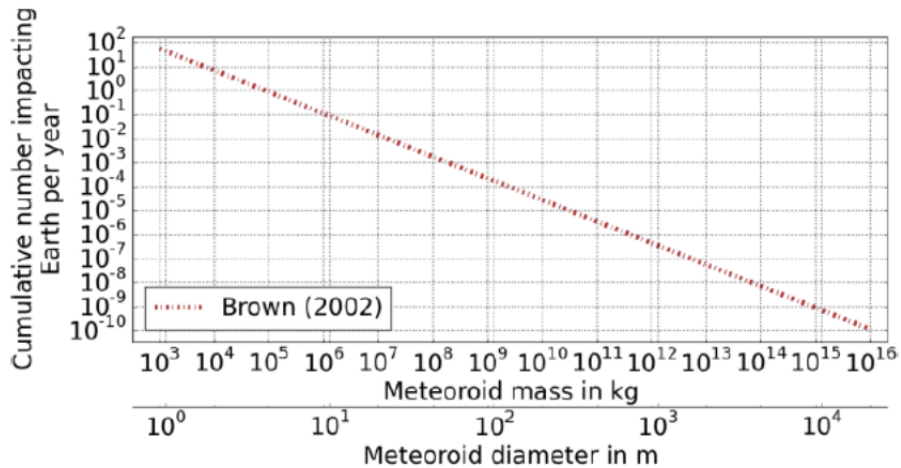


Figura 1.8: Meteoróides que penetram a atmosfera da Terra, em função da massa e do diâmetro de acordo com o modelo de Brown, figura retirada de Drolshagen et al. (2015).

Para unir os dois modelos, de forma a ter um amplo espectro do fluxo de massa, o artigo de Drolshagen et al. (2015) aplica uma interpolação da lei de potências, do tipo $Y = am^b$ permitindo a intersecção dos dois modelos. O resultado é a expressão:

$$F_{int}(m) = 5.59 \cdot 10^4 m^{-0.993} \quad (1.9)$$

. O resultado do novo modelo interpolado é apresentado na figura 1.9.

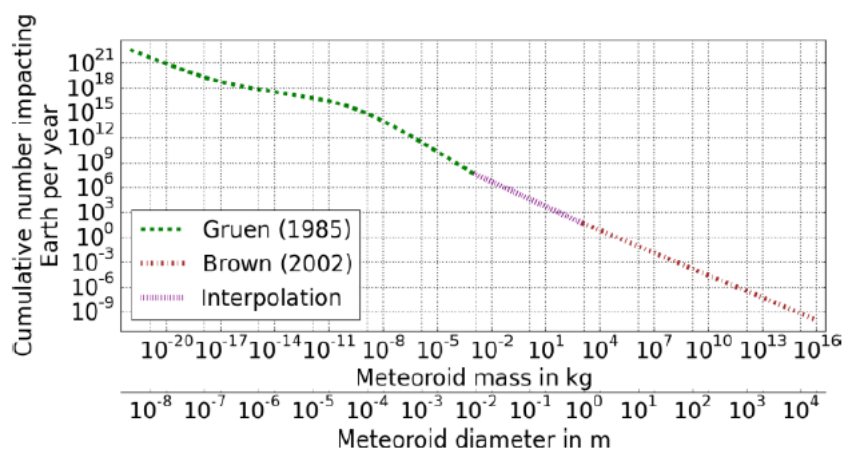


Figura 1.9: Meteoroides que penetram na atmosfera da Terra, em função da massa e do diâmetro, utilizando a interpolação dos modelos de Grün e de Brown, figura retirada de Drolshagen et al. (2015).

À partir desse novo modelo interpolado pode-se calcular o fluxo de massa total anual chegando ao valor de $21.9 \cdot 10^3 \times \text{ton/ano}$, ou $\sim 60 \text{ ton/dia}$.

É importante ressaltar que o modelo de Grün é compatível com análises de impacto de micrometeoritos e com os dados da rede CILBO⁷ até a massa de 100 g.

O estudo de Drolshagen et al. (2015) leva em conta também o limite de diâmetro de 1 km, já que objetos maiores deste valor tem uma expectativa de impacto de 700 000 anos. E dentro de um limite de massa de 10^{-21} a 10^{12} kg, o fluxo é de cerca de 54 ton/dia. Segundo o mesmo artigo, o fluxo máximo vem de dimensões que variam entre 10^{-11} e 10^{-5} kg.

No que diz respeito ao fluxo na faixa de massa de bólidos e meteoros, as incertezas de cálculo são ainda muito grandes, conforme aponta o estudo desse mesmo autor, inclusive com indicações para um fluxo reduzido nesta faixa. Portanto, mais dados de registros de bólidos, meteoros e impactos lunares são necessários para que se possa melhorar os cálculos sobre as estimativas desses corpos.

⁷CILBO é o acrônimo de Canary Island Long-Baseline Observatory que é um projeto da ESA de câmeras pareadas para observação de meteoros (Koschny et al., 2013).

1.3 Objetivos

Neste Capítulo discutimos a formação do SS mostrando como os seus subprodutos, os pequenos corpos, dependendo de sua localização podem indicar características importantes dos fenômenos que levaram à formação de cada região como, por exemplo o cinturão de asteroides, o cinturão transneptuniano e regiões do disco espalhado, principalmente influenciados por migrações planetárias e perturbações dos planetas gigantes.

Basicamente, os pequenos corpos, são divididos entre asteroides e cometas, diferenciando-se um do outro pela presença de atividade (perda de massa). Uma forma de estabelecer dinamicamente limites entre as duas classes, é baseada no parâmetro de Tisserand o qual através de uma aproximação de dinâmica restrita circular de 3 corpos, parametriza a velocidade relativa entre um objeto e Júpiter, num encontro próximo. O valor T_j conhecido como critério de Tisserand, é usado para separar os asteroides e cometas com $T_j > 3$, para os primeiros e $T_j < 3$, para os segundos.

Porém, se incluirmos mais critérios, considerando, por exemplo, o período orbital, q , Q , além do critério de Tisserand, surgem outras classes dinâmicas, ACO (em inglês, asteroids in comet-like orbits, asteroides em orbitas cometárias), cometas do CP, etc. (Tancredi, 2014). Na tabela à seguir mostramos como fica esta subdivisão, conforme discutido na seção sobre pequenos corpos, e estudos de autores como Levison (1996); Mommert et al. (2015); Jewitt and Hsieh (2022).

Tabela 1.1: Quadro demonstrativo de grupos dinâmicos por critério de Tisserand e Período Orbital.

Família	T_j	P (anos)	Origem
Asteroides	> 3	$\lesssim 20$	diversas fontes
LPC	< 2	≥ 200	Oort
HTC	> 2	≤ 200	contribuições de Oort e disco espalhado
JFC	entre 2 e 3	≤ 20	cinturão de Kuiper
ACO	entre 2 e 3	≤ 20	diversas fontes

Dessa forma, as diferentes regiões e processos de formação dão origem a objetos com propriedades físicas e dinâmicas distintas, como os asteroides e os cometas. Estudos mais recentes, vem mostrando que estes últimos podem conter silicatos das partes mais internas do disco protoplanetário, assim como voláteis de regiões mais

externas do disco, enquanto que os primeiros podem mostrar atividade pela perda de massa devido à uma combinação de processos erosivos.

Por conta disso, somente o critério de Tisserand não é capaz de explicar a diferença entre as duas populações de objetos, pois não considera as perturbações planetárias nem a evolução orbital não determinística, após um determinado tempo. Portanto, estes limites devem ser mais relaxados e muitos pequenos corpos não podem ser classificados, com exatidão, como do tipo asteroidal ou cometário.

Se um asteroide tendo uma órbita típica cometária, apresenta conexão com alguma chuva pode, na realidade, ser um cometa, ou um fragmento deste. De outra forma, se suas propriedades físicas indicam uma origem asteroidal (mesmo com perda de massa detectada) pode ser que ele seja um asteroide apresentando alguma forma de atividade.

Exemplos como os NEO (3200) Phaethon e o 2003 EH1, associados às chuvas Geminids e Quadrantids, respectivamente, mostram que uma separação entre cometas e asteroides é bastante complexa (aprofundamos no próximo Capítulo).

O foco deste trabalho é, portanto, investigar as propriedades dinâmicas e físicas, de uma subpopulação de pequenos corpos, conhecidos como ACO, determinando a possibilidade de suas conexões com enxames de meteoroides que provoquem chuvas de meteoros na Terra, fornecendo mais pistas sobre suas origens.

Estudar os ACO pode fornecer evidências para melhor entender as linhas divisórias entre cometas e asteroides, assim como os processos que podem dar início à atividade de perda de massa e contribuir numa melhor compreensão da formação de nosso Sistema Solar e sua dinâmica.

No próximo Capítulo discutiremos meteoros, sua origem e importância. No Capítulo 3 apresentaremos resultados de associações encontradas entre ACO e chuvas, fazendo análises e discutindo suas implicações dentro do contexto de corpos ativos em nosso SS. No Capítulo 4 mostramos um estudo comparativo de integradores numéricos avaliando os encontros próximos de um earth-grazer (bólide rasante a Terra) e sua caracterização como um ACO, embora classificado atualmente como um fragmento de asteroide. E, concluímos no Capítulo 5, com a discussão dos resultados obtidos e suas implicações.

Capítulo 2

Conceitos sobre os Meteoros

”O cavallina, cavallina storna, che
portavi colui che non ritorna;...”

*Giovanni Pascoli, Canti di
Castelvecchio, 1903*

2.1 O Conceito Atual

Os meteoros constituem-se por um conjunto de fenômenos aerodinâmicos que ocorrem nas camadas superiores da atmosfera (podendo variar entre 180 a 15 quilômetros de altura), produzindo intenso brilho por conta do impacto de partículas sólidas em altas velocidades com o ar (IAU, 2017). Devido às altas velocidades que podem variar desde 15 km/seg até 65 – 70 km/seg, estes corpos sofrem extrema ablação (processo de perda de massa), vaporizando seu material e criando ao seu redor um envoltório de plasma. Modelos foram desenvolvidos para interpretar a dinâmica deste complexo fenômeno, estimando propriedades como: massa inicial, densidade e origem a qual tanto pode ser asteroidal ou quanto cometária.

Os modelos atuais que explicam a dinâmica de meteoros, basicamente partem de três equações diferenciais que descrevem suas trajetórias na atmosfera terrestre combinando os efeitos de desaceleração e ablação. São expressas pelas equações (Hoppe, 1937):

$$\frac{dv}{dt} = -\Gamma A \rho_a \rho m^{-1/3} v^2 \quad (2.1)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{A\Lambda}{2\zeta} \rho_d^{-2/3} \rho m^{2/3} v^3 \quad (2.2)$$

$$\frac{dh}{dt} = -v \cos(Z_R) \quad (2.3)$$

, onde:

v : velocidade em um ponto arbitrário de sua trajetória

Γ : coeficiente de arrasto

A : fator de forma que corresponde à relação $A = Sm^{-2/3} \rho_d^{2/3}$

m : massa do corpo

S : seção de choque do meteoróide

h : altura do meteoróide

ρ_d : densidade nuclear do corpo

ρ : densidade do ar

Λ : coeficiente de transferência de calor

ζ : energia necessária para ablação de uma unidade de massa do meteoróide

Z_R : distância zenital

O modelo representado por estas equações é denominado de "*single body*" ou "*non fragmentation*", sendo uma primeira aproximação para se estudar o fenômeno. As equações 2.1 e 2.2 tratam respectivamente da desaceleração e da perda de massa do corpo, enquanto que a equação 2.3 relaciona a perda de altura com a distância zenital do radiante do meteoro (Pecina and Ceplecha, 1983).

Uma divisão conceitual deve ser introduzida neste ponto, enquanto meteoros são um conjunto de fenômenos luminosos, o corpo material que dá origem a estes fenômenos se chama de meteoróide. Portanto, quando estivermos descrevendo conceitos, classificações e dinâmica do fenômeno, nos referiremos preferencialmente à palavra meteoróide, que são fragmentos sólidos que impactam na atmosfera terrestre, produzindo meteoros, podendo variar da escala micrométrica até a ordem de metro.

2.2 Origens

Falar sobre a origem dos meteoros é discutir sobre a origem dos meteoroides, pois são esses corpos que geram o fenômeno atmosférico.

Os meteoroides fazem parte de nosso Sistema Solar, sendo que menos de 1% de suas velocidades heliocêntricas excedem a velocidade de escape,¹ ou seja, a velocidade limite considerada a uma distância de 1 U.A. do Sol, igual a 42 km/seg. Notar que o cálculo dessa velocidade leva em consideração a velocidade orbital média da Terra que é de 30 km/seg, a uma distância de 1.U.A, multiplicada por $\sqrt{2}$.

Os meteoroides podem ser provenientes de remanescentes da passagem de um cometa, nas proximidades do Sol ou de asteroide, em órbita próxima a Terra e, em menor número, de fragmentos gerados por impactos na Lua e em Marte. De acordo com Borovička (2007), são três processos básicos que dão origem a meteoróides, pela desagregação de seus corpos progenitores:

1. Arrasto de vapor: gelos aquecidos acabam carreando partículas sólidas, poeira e grãos (Whipple, 1951);
2. Disrupção catastrófica de cometas. Além de criar núcleos secundários, produzem grandes quantidades de poeira e meteoroides (Jenniskens, 2006);
3. Colisões entre corpos do Sistema Solar, basicamente choques entre asteroides, produzindo fragmentos colisionais (Nesvorný et al., 2003).

2.2.1 Chuvas de Meteoros

Um dos principais efeitos de fluxo de meteoroides discutidos na subseção 1.2.6 é conhecida como chuva de meteoros que atingem periodicamente a Terra. As chuvas acontecem quando o número de meteoros observados ultrapassa a média de fundo de fluxo de massa por área usual penetrando a atmosfera da Terra.

As chuvas de meteoros têm sua origem num ponto, denominado de radiante, e isto implica que os elementos dessas chuvas possuem orbitas heliocêntricas similares. Portanto, a determinação dos elementos orbitais das chuvas possibilita uma boa

¹Quando a velocidade heliocêntrica excede a velocidade de escape do SS são chamados de meteoroides hiperbólicos. Na seção 2.4 explicamos com mais detalhes.

indicação sobre a origem parental dos meteoroides.

Os processos que levam asteroides a dar origem a chuvas são os seguintes (Jopek, 2011): (a) colisões catastróficas, em geral ocasionadas na formação de famílias, embora tais eventos sejam raros e as chuvas originadas dessa forma já teriam sido extintas há muitos anos, (a exceção do objeto P/2010 A2, provavelmente originado de colisão entre dois asteroides, que poderia dar origem a uma chuva), (b) Forças de maré agindo em regolitos de asteroides que tem encontros próximos com planetas terrestres e (c) o efeito YORP - Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (é um fenômeno físico que descreve a alteração do movimento de rotação de um objeto celeste devido à interação entre a radiação solar e o objeto em si).

No que diz respeito à conexão dinâmica entre uma chuva e seu corpo parental, Jopek (2011), indica os seguintes critérios para se determinar a ligação entre uma chuva e algum corpo parental: (a) distância, (b) *threshold* de similaridade, (c) análise de cluster. A partir da aplicação desses critérios o trabalho desse autor exemplifica a associação entre NEA e o chamado complexo das Taurídeas, além da existência de grupos cometários e asteroidais. No próximo Capítulo iremos explorar mais a fundo estas associações.

2.2.2 Origem dos Meteoroides que causam Chuvas de Meteoros

Os cometas são considerados a principal fonte de meteoroides que penetram na atmosfera terrestre. A conexão entre o fluxo de meteoroides e cometas já estabelecida desde o sec. XIX, principalmente após os cálculos do astrônomo Schiaparelli que estabeleceu uma ligação entre as chuvas Perseidas e o cometa 1862 III além das chuvas Leonídeas e o cometa 1862 I (Jopek, 2011). Esta hipótese ficou amplamente confirmada por Fred Whipple em 1951, depois de publicar os resultados do primeiro survey de observação fotográfica de meteoros pareados.

Os detritos de cometas e de asteroides que formam correntes de meteoroides podem ter órbitas similares dos seus progenitores. Os fragmentos assim separados de seus corpos progenitores vão formando um fluxo de material desprendido que vai originar correntes de poeira e grãos. Entretanto, os fragmentos destas correntes acabam evoluindo dinamicamente de forma diferente, pois vão sofrendo perturbações, encontros próximos e colisões mútuas.

Se o corpo parental possui atividade será cometa, caso contrário será um asteroide ou cometa dormente ou extinto (Jewitt, 2012; Jewitt et al., 2013). Como também uma pequena parte dos NEO podem ser cometas adormecidos ou extintos Jenniskens (2008b). Determinar uma associação entre NEO e correntes de meteoroides pode revelar se o progenitor é um cometa inativo ou um asteroide que apresentou alguma perda de massa.

Por exemplo, Babadzhanov et al. (2008) identificaram que os NEO 2003 WP21, (380955) 2003 UL3 e 2004 TG10 podem estar associados a correntes de meteoroides do complexo Taurids. Outros autores também realizaram cruzamentos de associação entre corpos progenitores e meteoros no complexo das Taurids (Jopek, 2011; Porubčan et al., 2006), achando resultados similares. Estudos aventam a possibilidade da fragmentação de um cometa há cerca de 20 000 anos, deixando corpos menores, como NEO e sub-correntes formando o referido complexo.

No diagrama a seguir, apresentamos um exemplo de um objeto que é fonte da chuva de meteoros Quadrantids (Wiegert and Brown, 2005), formando um complexo de meteoroides (maiores detalhes na subseção 2.7.2). No Capítulo 3 vamos aprofundar a relação entre esta chuva e o seu corpo progenitor, discutindo nossos resultados que envolvem este caso.

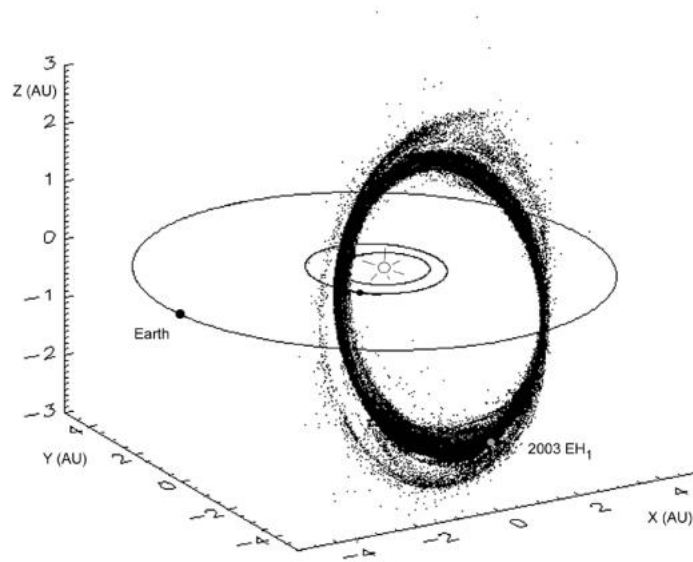


Figura 2.1: Diagrama da modelagem da corrente de meteoroides ligada ao NEO (20196256) 2003 EH1, figura retirada de Jenniskens (2007a).

Já os NEA são fontes essencialmente de meteoritos (Vernazza et al., 2008) demonstraram a relação entre eles e os meteoritos condritos do tipo LL, sugerindo

que a família Flora, na parte interna do cinturão de asteroides, poderia ser uma importante fonte. Em geral, os meteoritos penetram em nossa atmosfera como bólidos.

2.2.3 Meteoros originados de Cometas

As fontes mais usuais de meteoros são os fragmentos cometários. Na medida que um cometa aproxima-se do Sol, sua superfície vai sendo aquecida e os gelos são sublimados e o fluxo de gás decorrente acaba arrastando grãos de poeira. Outra forma de espalhamento de detritos é a fragmentação cometária.

Os detritos deixados no caminho orbital, são denominados de correntes *"streams"* pois vão espalhando-se ao longo da trajetória do cometa, como imensos rastros de poeira e partículas. Quando a Terra vai de encontro a essas correntes, os fragmentos adentram a nossa atmosfera, gerando as chuvas, que são um grupo de meteoros produzidos por meteoroides da mesma corrente (IAU, 2017), na figura 2.2 mostramos um diagrama exemplificativo deste fenômeno.

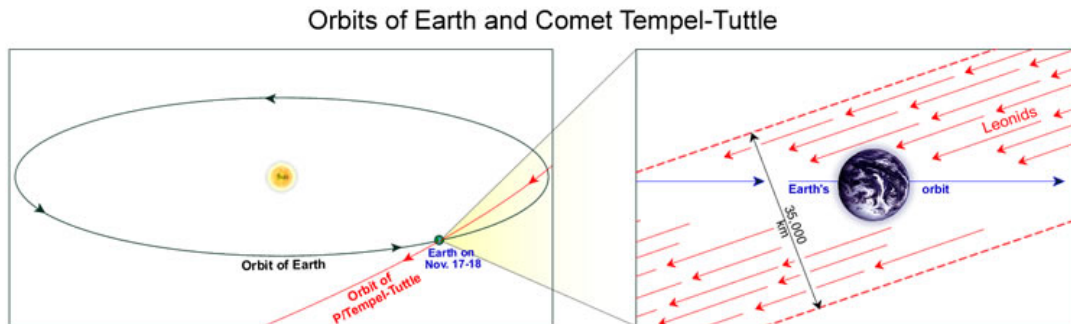


Figura 2.2: Diagrama representativo de uma corrente de meteoroides formada por um cometa. No exemplo, a chuva Leonids, cujo o progenitor é o cometa Tempel Tuttle. Figura retirada de SAO (2017).

Quanto à velocidade de ejeção dos meteoroides, em média, seu valor é menor do que a velocidade orbital do cometa, implicando que as órbitas iniciais dos meteoroides serão muito similares entre si. A velocidade de um meteoroide é de aproximadamente de 100 m/seg, relativa ao núcleo cometário, conforme o modelo básico de Whipple (1951):

$$V^2 = 4.3 \times 10^5 \times R_c \left(\frac{1}{b\sigma r^{2.25}} - 0.013R_c \right) \quad (2.4)$$

R_c é o raio do núcleo cometário, em unidades de km à distância heliocêntrica r

in A.U., σ é a densidade nuclear, e b é o raio do meteoróide.

Vale ressaltar de que a velocidade de ejeção de matéria do núcleo cometário é um tema ainda em discussão, pois é incerto como os mecanismos de sublimação e ejeção ocorrem no vácuo. Para cometas com diâmetro do núcleo de 10 km, a velocidade de escape é cerca de 3m/seg e a velocidade de ejeção podendo ser entre 0.5 e 1 km/seg.

Um importante parâmetro para o cálculo da trajetória de um meteoro é sua densidade média nuclear, pois está relacionada com a altura do início da ablação, dependendo da velocidade, rupturas e massa final. No que se refere a meteoróides do tipo cometário, diversos estudos apontam uma densidade nuclear entre 500 e 1000 kg/m^3 , porém essa faixa de valores ainda é bastante debatida e os diversos autores divergem. Abaixo apresentamos um quadro demonstrativo de várias faixas de densidade nuclear, calculadas pelos diferentes autores:

Tabela 2.1: Quadro de faixas de densidade nuclear de acordo com diferentes autores

densidade nuclear	Autor
260 kg/m^3	Jacchia et al (1967)
140 kg/m^3 - 630 kg/m^3 (chuvas) e 280 kg/m^3 (esporádicos)	Verniani (1969)
1400 kg/m^3 - 4000 kg/m^3	Ceplecha (1967)
1400 kg/m^3 - 630 kg/m^3	Babadghanov (1993)

A densidade nuclear além de fornecer informação sobre as propriedades do material do meteoróide, como a força mecânica, também auxilia na determinação do tipo do corpo parental, conforme uma classificação de Ceplecha, discutida mais a frente na subseção 2.5.1. Entretanto, conforme mostrado na tabela 2.1 as faixas de densidade variam de autor para autor, pois dependem da modelagem utilizada para a dinâmica de entrada na atmosfera.

Além do problema do viés de modelagem, apresenta-se também a questão das características não-homogêneas de um núcleo cometário, pois ele é formado por gelos e compostos de partículas rochosas. O material cometário pode conter constituintes mais duros, demonstrando uma inomogeneidade, em escala milimétrica, dos grãos.

É importante ressaltar que o material cometário é processado no ambiente espacial, seja pela atuação da radiação solar em regiões < 0.2 U.A, quanto por

longos períodos de exposição aos raios cósmicos na nuvem de Oort, acarretando efeitos similares. Ambos os casos levam à depleção de materiais voláteis, como a molécula de Na e a compactação da poeira. Assim, duas distintas populações de meteoroides com falta de Na podem existir no Sistema Solar.

Os meteoroides podem ser agrupados conforme os quatro tipos de famílias cometárias. Sendo que a influência gravitacional de Júpiter altera a evolução dinâmica das correntes de meteoroides, temos, então, quatro tipos de evoluções (Borovička, 2007):

- (a) longo período (*"Long-period type"*),
- (b) cometas tipo Halley,
- (c) cometas da família de Júpiter,
- (d) cometas da família Encke.

(a) Cometas de Longo Período

As órbitas dos meteoroides são muito longas e a partir de duas evoluções a dispersão e distorção das correntes são extremas, originando riantes mais difusos (Jenniskens et al., 2021, vide seção A.1 do apêndice A). Podemos exemplificar as seguintes chuvas nesta classe:

1861 G1 (Thatcher) → April Lyrids

C/1911 NS (Kiess) → Aurigids

C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock) → eta Lyrids´

No mesmo trabalho Jenniskens et al. (2021) encontraram 14 novas associações de chuvas com LPC de $P \geq 250$ anos estabelecendo um critério de período orbital menor que 4 000 anos e distâncias mínimas a órbita da Terra ≤ 0.10 U.A. para que haja a existência de uma chuva.

(b) Cometas tipo Halley

A interação com Júpiter é fraca e as órbitas dos meteoroides são relativamente estáveis e mais densas e critério de Tisserand: $T_j < 2$. Os rastros de poeira são reconhecidos mesmo depois de muitas revoluções, podendo dar origem a múltiplas chuvas. Entre os cometas que se enquadram neste tipo podemos citar:

1P/Halley → Eta-aquarids, Orionids

55P/Temple-Tuttle → Leonids

8P/Tuttle → Ursids

Os meteoroides que se originam dessa família de cometas apresentam baixa força mecânica (< 0.05 Mpa), baixa densidade (≤ 1 g/cm³) e alta porosidade. Os meteoroides menores, em geral, se desintegram nos grãos constituintes logo ao penetrarem na atmosfera, produzindo meteoros com curvas de luz simétricas, próximas a parábolas (Koten et al., 2004). Meteoroides maiores não se rompem imediatamente, mas desintegram-se catastróficamente em altitudes mais baixas, levando à rápida evaporação dos grãos e criando enormes *flares* que são resultantes do brilho de uma grande quantidade de material (Spurný et al., 2000; Borovička and Jenniskens, 2000).

Esses meteoroides apresentam uma grande diversidade de forma, de estrutura e de composição, em escala milimétrica, mesmo que pertençam a uma mesma chuva. Análises espectrais mostram ausência do elemento Fe relativamente à Mg, quando comparado aos condritos CI, baixa abundância de Cr e Mn, enquanto que Si e Na são mais abundantes (Borovička et al., 2005; Borovička, 2005).

(c) *Cometas da família de Júpiter (JFC)*

JFC são cometas com períodos orbitais muito curtos, de menos de 20 anos. Eles estão confinados dentro da órbita de Júpiter, mas podem ter origem como objetos do Cinturão de Kuiper devido a colisões, sendo subsequentemente capturados por Júpiter.

Cometas e meteoroides desta família no afélio estão próximos ao planeta Júpiter, momento em que se movem mais lentos. O espalhamento de poeira é portanto intensificado e os trilhos tendem a se partirem em " *Traillets*" enquanto trilhos independentes acabam sendo formados. A poeira é espalhada rapidamente, ao longo dos ciclos de nutação causado pela rotação rápida da linha nodal. Nesse caso o critério de Tisserand tem valor $2 < T_j < 3$.

Exemplos que se enquadram nesta categoria:

1D/Biela → Andromedis

7P/Pons-Winnecke → June Bootids

21P/Giacobini-Zinner → October Draconids

Os meteoróides dessa família são mais leves que os do tipo Halley e a chuva October Draconids apresenta material mais frágil, com densidade nuclear de aproximadamente 0.3 g/cm^3 .

(d) Cometas tipo Encke

O afélio desta família de cometas é longe da órbita de Júpiter, logo interagem com os planetas terrestres. A poeira é dispersada vagarosamente, a Taurids é um exemplo típico de chuva ligada a essa família que é definida como tendo critério Tisserand de $T_j > 3$. O cometa 2P/Encke é o progenitor dessa tipologia.

Muitos estudos apontam que chuvas oriundas de cometas tipo JFC e HTC (Ye, 2018), em geral, produzem enxames novos. Órbitas de meteoroides do tipo JFC, por conta da perturbação de encontros próximos com Júpiter, são caoticamente espalhadas e tendem a produzir fluxos irregulares, ex.: chuva #254 Phoenecids. Finalmente, enxames originados de HTC possuem uma distribuição mais ampla de inclinações e órbitas retrógradas (o que não acontece em JFC) podendo gerar chuvas mais regulares, ex. #13 Leonids e #7 Perseids.

2.2.4 Asteróides Ativos

Esse tipo de objeto são ainda raros observacionalmente pela dificuldade de identificação de algum tipo de atividade. Eles podem apresentar caudas tipo cometária e/ou coma, devido a perda de massa, através de mecanismos, como, sublimação, impactos, instabilidade rotacional e fraturas termais ou a combinação de vários processos (Jewitt and Hsieh, 2022). O primeiro asteroide desse tipo registrado foi o NEA 4015, atingindo hoje uma coleção de 60 objetos conhecidos, considerados asteroides ativos.

2.2.5 Objetos ativos além de Júpiter

Centaurus, entre Júpiter e Netuno, mas por estarem em áreas geladas acredita-se que outros processos de perda de material podem estar envolvidos (Hsieh and Jewitt, 2006). Outro grupo importante são os quasi-Hildas (QHAs), objetos na ressonância 3:2 (MMR) com Júpiter, envolve uma região do cinturão externo aos Troianos, com cerca de 3 000 asteroides, apenas cerca de 15 são ativos, exibindo

caudas de gás e poeira.

2.2.6 Meteoroides do Cinturão Principal

A busca da associação entre asteroides específicos e chuvas de meteoros é um tema que vem sendo discutido desde o trabalho de Olivier em 1925 (Jopek and Williams, 2013). Asteroides poderiam gerar correntes de meteoroides através de colisões mútuas, acomodações internas liberando energia, efeitos de maré, efeito YORP e *spin up* gerando instabilidade rotacional. A pesquisa sobre fluxos de meteoroides associados à asteroides é um tema ainda em aberto, pois ainda é pouco claro quais mecanismos levariam asteroides e NEA a produzir *streams* que possam dar origem a chuvas. Vale mencionar o caso do asteroide 2010 A2 que sofreu colisão deixando um trilha de detritos.

2.3 Meteoros Esporádicos

Uma chuva de meteoros ocorre quando a taxa de meteoros observada é significativamente maior do que a média de fundo e possuem um radiante bem definido. Meteoros que não possuem uma chuva ou um radiante definido são denominados como tipo esporádico. Este tipo de meteoro adiciona às chuvas usuais mais alguns meteoros por hora, em geral 1 ou 2, de forma que os meteoros esporádicos podem inflar artificialmente as taxas horárias das chuvas mais fracas.

Apenas 25 a 35 % dos meteoros observados pertencem à chuvas, sendo que a grande maioria de meteoros observados são esporádicos. Provavelmente, são originários de cometas e asteroides e que em algum momento devem ter pertencido a uma corrente de meteoroides, mas devido à perturbações, como também pressão de radiação e efeitos colisionais, suas órbitas evoluíram a ponto de não mais serem similares às de seus corpos parentais.

2.4 Meteoros Hiperbólicos

Quando falamos de meteoros hiperbólicos queremos dizer que os mesmos possuem órbitas hiperbólicas, embora não necessariamente tenham origem fora do Sistema Solar. A questão sobre se existem meteoroides de origem interestelar é um tema debatido há muito tempo. Hawkes and Woodworth (1997) apoiam a ideia da

existência de meteoros hiperbólicos, porém apontam a baixa probabilidade de terem origem extra-solar. Estes autores constatam que quanto menor é a massa, maior é a percentagem de meteoros com órbitas hiperbólicas. Isto vem sendo comprovado por estudos posteriores que mostram a contribuição de poeira cósmica na população de meteoroides interplanetários (Hajduková et al., 2014).

Vale lembrar que as sondas *Ulysses* e *Galileo* mostraram a predominância de partículas interestelares entre 10^{-17} e 10^{-15} Kg, na parte mais externa do Sistema Solar (Grün et al., 1997). A identificação de meteoróides interestelares pressupõe os seguintes requisitos: (a) trajetórias retrógradas, (b) altas velocidades de entrada, (c) independência latitudinal do plano da eclíptica (Grün and Landgraf, 2000).

Os estudos mais atuais acerca da origem de meteoros hiperbólicos, apontam que o cálculo das velocidades e da órbita esbarra na questão dos erros de medida mais do que ser uma característica real do objeto observado (Hajdukova et al., 2020).

Uma órbita elíptica pode facilmente se tornar hiperbólica. Na figura 2.3 mostramos a distribuição de velocidades heliocêntricas de meteoros esporádicos catalogados no banco de dados das redes de monitoramento de meteoros EDMOND, SONOTACO e EXOSS², demonstrando a concentração de velocidades em torno do ponto médio 42.53 ± 0.60 km/seg (De Cicco, 2020). Mesmo descartando-se a questão de erros, restam as perturbações planetárias que podem levar um meteoróide a evoluir para uma trajetória hiperbólica.

Considera-se o limite de frequência estatística, como em catálogos como IAU Meteor Data Center, a frequência calculada para meteoroides de origem interestelar é de 2×10^{-3} (Hajdukova, 1994) e de 6.1×10^{-3} para o mesmo catálogo atualizado em 2008 (Hajduková, 2008). Dessa forma, para videobservação de meteoroides interestelares o valor é de 1.3×10^{-3} .

Por exemplo, o trabalho de Hajduková et al. (2014) sobre o catálogo da SONOTACO concluiu que a maioria das órbitas hiperbólicas, $a < 0$ e $\epsilon > 1$, são devidas a erros na estimativa de velocidades dos meteoros observados. Dos 7 489 “hiperbólicos” calculados no catálogo de um total de 64 650 meteoros com órbitas determinadas, após a aplicação de filtros estatísticos sobre a qualidade da medida e do tipo de órbita, restaram apenas 484 órbitas hiperbólicas, sendo que destas 96% são claramente de origem do nosso Sistema Solar, e apenas 4% podem ter origem

²EDMOND - The European video MeteOr Network Database, SONOTACO - Sonotaco Network Japan, EXOSS - Exploring Southern Skies for New Radiants.

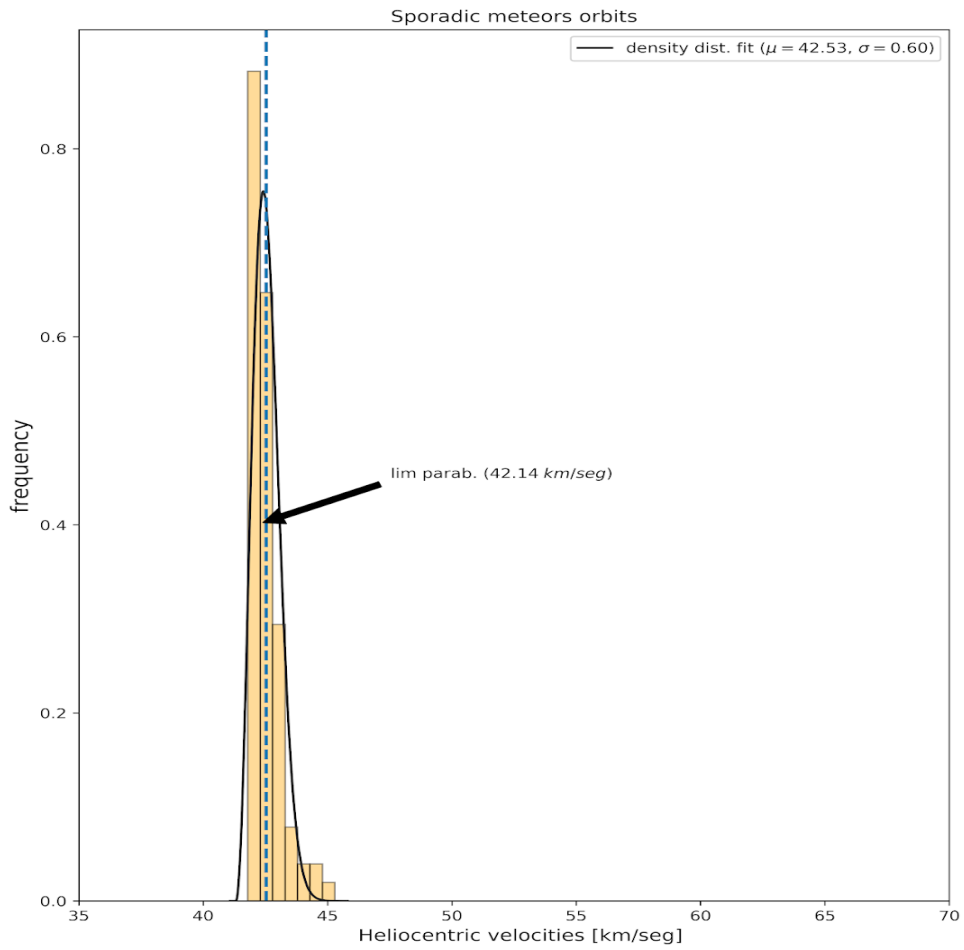


Figura 2.3: Gráfico mostrando a distribuição de frequências de velocidades heliocêntricas de meteoros esporádicos, com ajuste de uma curva de distribuição com $\mu = 42.53$ km/seg e $\delta = \pm 0.60$. A linha vertical tracejada marca o limite parabólico de velocidades, figura retirada de De Cicco (2020).

interestelar.

Inúmeros levantamentos feitos através de catálogos de videometeoros tem sido publicados, mas até o momento não se alcançou nenhuma resposta satisfatória sobre a origem interestelar.

2.5 Bólidos e Superbólidos

Bólidos são fenômenos extremamente brilhantes, atingindo magnitudes entre -4 a -17 , enquanto os superbólidos são mais raros e atingem magnitude visual inferior a -17 (Ceplecha et al., 1999). Estes últimos são causados por pequenos asteroides da ordem de metros (Borovička et al., 2015).

Os superbólidos são ainda um fenômeno pouco conhecido, pois seu corpo meteoroidal pré-impacto é de difícil detecção, sendo observáveis apenas quando estão bem próximos a Terra, a distâncias de centenas de milhares de quilômetros. Entre os exemplos podemos citar o NEO 2014 AA, descoberto apenas 21 horas antes de penetrar na atmosfera da Terra, em Janeiro de 2014. Outro caso é o do meteorito Almhata Sitta, cuja previsão da queda do NEO 2008 TC3, somente foi feita com um dia de antecedência (Loehle et al., 2017).

Os meteoroides que dão origem a superbólidos pertencem a uma classe de objetos ainda pouco estudados, corpos monolíticos ou "*rubble pile*". Portanto, esclarecer sua origem ajudará na pesquisa de processos de impactos terrestres, como as crateras do caso de Carrancas (Borovička and Spurný, 2008) e as ondas de explosão causando danos na queda do superbólido de Chelyabinsk (Brown et al., 2013).

Além do efeito luminoso, por conta da ablação do meteoróide, outros fenômenos também podem ocorrer, como: (i) o estampido sônico por conta das velocidades hipersônicas detonarem ondas de explosão, (ii) efeitos inaudíveis de baixa frequência na faixa do infrassom, (iii) sons eletrofônicos na faixa do rádio que reverberam em objetos próximos às testemunhas e (iv) trilhos de ionização (também comuns a meteoros mais fracos em brilho).

Portanto, a análise completa da queda de bólidos fornece dados sobre a distribuição orbital, propriedades físicas e, se acompanhadas de análise espectral, sua composição química, sendo uma ferramenta complementar ao estudo dos asteroides e cometas. Esse tipo de estudo também proporciona informações sobre os efeitos

de impacto em nosso planeta, como os estampidos sônicos, ondas de explosão em camadas atmosféricas e efeitos de danos na superfície.

Este foi o caso do superbólido Chelyabinsk em 2013 provocando uma onda sonora cuja explosão estilhaçou vidros, ferindo cerca de mil pessoas, além de provocar outros danos materiais. Efeitos maiores já ocorreram em outro caso conhecido, a famosa explosão de Tunguska, na Sibéria em 1908, arrasando uma área de cerca de 2 150 km² de floresta, sem deixar cratera.

2.5.1 A tipologia de Bólidos baseada na sua constituição

Uma importante classificação de bólidos é a de Ceplecha and McCrosky (1976), aprimorada em trabalhos subsequentes (Ceplecha, 1988, 1994). Esta classificação leva em conta parâmetros que avaliam o comportamento da trajetória de um bólido e que são usados para tipificar suas propriedades físicas. Basicamente definem a habilidade crescente de desintegração de um meteoróide, durante sua entrada atmosférica, agrupando-os em tipo rochoso, condritico ou cometário. Dessa forma, a classificação é dividida em três tipos básicos, sendo o último subdividido em dois subtipos:

I : condritos ordinários;

II : condritos carbonáceos;

IIIA : material cometário, relacionado a cometas de curto período;

IIIAi : material cometário, relacionado a cometas de longo período;

IIIB : material cometário *soft*, ligado a cometas de curto período, do tipo Giacobini-Zinner.

A classificação é calculada através da altura terminal do bólido, utilizando o chamado critério PE, definido pela relação (Ceplecha and McCrosky, 1976):

$$PE = \log \rho_E + A \times \log m_o + B \times \log v_\infty + C \times \log \cos(Z_R), \quad (2.5)$$

onde ρ_E é a densidade atmosférica terminal, m_o é a massa inicial do meteoróide, v_∞ velocidade pré-atmosférica e Z_R é a distância zenital. A, B and C são parâmetros para valores observacionalmente definidos para bólidos (Ceplecha, 1988) : $A = -0.42$; $B = 1.49$ e $C = -1.29$. Desta forma, diferentes grupos são definidos pela relação:

$$PE > -4.60 \implies \text{Grupo I} \quad (2.6)$$

$$-5.25 < PE < -4.60 \implies \text{Grupo II} \quad (2.7)$$

$$-5.70 < PE < -5.25 \implies \text{Grupo IIIA} \quad (2.8)$$

$$-5.70 < PE < -5.25 (a \geq 5 \text{ U.A.}) \implies \text{Grupo IIIAi} \quad (2.9)$$

$$PE \leq -5.70 \implies \text{Grupo IIIB} \quad (2.10)$$

Este tipo de classificação permite estudar as possíveis conexões entre meteoritos e NEAs, pois todos os testemunhos recuperados em solo tem sua origem num bólido ou superbólido. O tipo mineralógico da maioria dos meteoritos são da classificação de condritos ordinários, e em menor escala, acondritos e metálicos.

A classificação básica tipifica (Greenwood et al., 2020) os condritos ordinários em H, L, LL, enquanto os carbonáceos em : CI, CM, CR, CV, CO, CK, CB, CH. À seguir fazemos uma breve descrição da composição e similaridades taxonômicas com fundamento na classificação de (DeMeo et al., 2009a), apresentada na subseção 1.2.2.

(a) **Tipo Ordinário**

H (High): contém alta concentração de Ferro (Fe), tipo taxonômico similar ao S-complexo e tipo Q.

L (Low): baixa concentração de Ferro (Fe), próximo ao tipo taxonômico Q e S.

LL (Very Low): baixa concentração de Ferro (Fe) e da razão Fe metálico e Fe^o ao Ferro oxidado (FeO) e mais próximos de tipos taxonômicos Q e S.

(b) **Tipo Carbonáceo**

CI (Ivuna-like): apresentam a maior similaridade com abundâncias solares.

CM (Mighei-like): composição próxima quando aquecidos de asteroides tipo C.

CR (Renazzo-like): ricos em metais e próximos ao tipo taxonômico C.

CV (Vigarano-like): similares ao tipo taxonômico asteroidal K.

CO (Ornans-like): tipo próximo ao CM, com similaridades a composição de asteroides tipo C-complexo.

CK (Karoonda-like): similar ao tipo CO e CV, porem com baixo teor de carbono e similar ao tipo taxonômico K.

CB (Bencubbin-like): ricos em metais, e similares ao tipo taxonômico M.

CH: Alta concentração de Fe (meteorito ALH 85085-like) e similar ao tipo taxonômico M.

À seguir, apresentamos tabela descritiva ampliada do artigo de Kokhirova and Babadzhanov (2023) combinando os resultados de Greenwood et al. (2020), onde apresenta tipos mineralógico, densidade nuclear e porosidade para meteoritos tipo condritos ordinários e carbonáceos e o tipo acondrito.

Tabela 2.2: Quadro descritivo de tipos de meteoritos por densidade média e porosidade

Tipo de Meteorito	densidade mineralógica (g/cm ³)	densidade nuclear média (g/cm ³)	porosidade média (%)
H-type condritos ordinários	3.84	3.40	11.5
L-type condritos ordinários	3.75	3.34	10.8
LL-type condritos ordinários	3.56	3.19	10.4
Acondritos	3.20	2.97	7.0
CI condritos carbonáceos	2.27	2.12	11.0
CM condritos carbonáceos	2.71	2.21	12.0
CR condritos carbonáceos	3.11	3.15	6.0
CV condritos carbonáceos	3.51	3.10	11.0
CO condritos carbonáceos	3.69	3.11	16.0
CK condritos carbonáceos	3.58	2.85	21.8
CB condritos carbonáceos	5.65	5.25	3.9
CH condritos carbonáceos	3.65	3.77	~ 0

2.6 Correntes de Meteoroides e chuvas

Como vimos na seção introdutória deste Capítulo as correntes de meteoróides (“*streams*”) no Sistema Solar interno vem fundamentalmente de duas fontes: asteroides e cometas. O principal efeito deste fluxo são as chuvas de meteoros que atingem periodicamente a Terra.

Como as chuvas de meteoros têm sua origem num lugar denominado de radiante, e se compõem de fragmentos seguindo a mesma trajetória, isto implica que os meteoroides dessas chuvas possuem orbitas heliocêntricas similares. A determinação de seus elementos orbitais, portanto, permite investigar a origem parental dos meteoroides.

A conexão dinâmica entre uma chuva e seu corpo parental pode ser determinada através de técnicas de agrupamento, com os comumente usados critérios de dissimilaridade, explicados a seguir, ou através de outros métodos de agrupamento, como usaremos no Capítulo 3.

2.6.1 Critérios de Dissimilaridade

A metodologia baseada em critérios de similaridade associa fluxos de meteoroides a corpo progenitores, considerando três etapas: (a) uma função de distância; (b) um valor de "threshold" (c) e técnicas de análises estatísticas de *cluster*, como o PCA (Principal Component Analysis)³.

A etapa (a), conhecida como critério de função da distância, foi introduzido por Southworth and Hawkins (1963), com o desenvolvimento do método de função de similaridade de distância entre duas órbitas D_{SH} , também conhecido como D-criterion. Existem algumas variações deste método, introduzidas por Steel et al. (1991), que aplicam apenas espaço de 3 dimensões: q, ϵ, i ou a, ϵ, i . Modificações subsequentes foram introduzidas por Drummond (1981), D_D (ou D_r), e Jopek (1993), D_H (ou critério híbrido).

Esses métodos de função de distância consideram um espaço de cinco dimensões, usando os elementos orbitais: $\epsilon, q, \omega, \Omega, i$. Existem outros critério de distância, menos usados, como: o critério D_N (Valsecchi et al., 1999), o critério D_B (Jenniskens, 2008a) e o critério D_V (Jenniskens, 2008b).

Vamos aqui descrever apenas o critério D_{SH} , pois é atualmente o mais aplicado. Sua formulação é dada por:

$$D_{SH} = (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (q_1 - q_2)^2 + (2 \sin I_{12}/2)^2 + ((\epsilon_1 + \epsilon_2)/2)^2 \times (2 \sin I_{12}/2)^2 + ((\epsilon_1 + \epsilon_2)/2)^2 \times (2 \sin \Pi_{12}/2)^2 \quad (2.11)$$

$$\Pi_{12} = \omega_1 - \omega_2 + 2 \arcsin\left[\cos\left(\frac{i_1 + i_2}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2}\right) \times \sec\left(\frac{I_{12}}{2}\right)\right] \quad (2.12)$$

Onde ϵ_1 e ϵ_2 são as excentricidades e q_1, q_2 distâncias periélicas das órbitas 1 e 2, respectivamente, I é o ângulo entre os planos orbitais 1 e 2, e Π a distância das longitudes do periélio, entre 1 e 2, medida à partir da intersecção das órbitas.

O valor de "threshold", D-criterion (D_c) na etapa (b), é um ponto fundamental na aplicação das equações de similaridade, pois a identificação da corrente de

³Método estatístico que reduz as dimensões da matrix de um grande número de variáveis, possibilitando interpretar a combinação linear entre elas, aplicando principais componentes.

meteoroides é sensível à escolha deste valor. Quanto mais perturbada for a evolução orbital da corrente maiores deverão ser os valores usados.

Assim, dependendo do critério e valor de corte adotado, pode haver ou não o agrupamento de órbitas de meteoros em famílias de radiantes e/ou corpos parentais. Estes valores podem variar de acordo com o autor considerado e seu foco de estudo. O trabalho de Dumitru (2018), por exemplo, aprofunda a crítica sobre a diversidade de valores, mostrando o efeito de enviesamento conforme a escolha de corte.

Em Lindblad (1971) define-se uma equação empírica para a escolha de um limite de corte razoável,

$$D_c = 0.80 \times N^{-0.25} \quad (2.13)$$

, onde N é o número amostral de órbitas.

Uma simplificação do critério D_{SH} desenvolvido por Steel et al. (1991) é também aceito para o estudo do parentesco entre correntes de meteoroides e NEO, sendo dada por

$$D^2 = \left(\frac{a_1 - a_2}{3} \right)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + \{2 \times \sin(i_1 - i_2)/2\}^2 \quad (2.14)$$

, onde a , ϵ , i são o semi-eixo maior, a excentricidade e a inclinação, enquanto que os índices 1 e 2 se referem ao meteoróide e ao de NEO, respectivamente.

Asher et al. (1993) usam o valor de $D_c = 0.20$ como limite superior, para encontrar associações de asteroides com chuvas ligadas ao complexo das Taurids (TC). Nesta mesma linha de pesquisa, Porubčan et al. (2006) usa como métrica um valor não superior a $D_c = 0.3$ na determinação de progenitores, no TC.

Rudawska et al. (2012) usam dois critérios, D_{sh} e D_h para estabelecer o valor limite máximo de 0.084 e 0.077, respectivamente, enquanto Šegon et al. (2014) encontraram o valor de cut off menor que 0.15 para associações com asteroides cuja inclinação seja menor que 15° .

Quanto menor o valor de corte, maior a probabilidade de ocorrência de uma conexão verdadeira. Como exemplo, em Ryabova (2016), foi demonstrado que o valor ideal para considerar associações de órbitas de meteoroides com a chuva Geminids deve ser menor que 0.2.

Em Šegon et al. (2015) e Roggemans et al. (2023) são definidos limites de

thresholds criando margens de associações entre corpos parentais, chuvas e meteoros, por métodos de critérios de dissimilaridades mais aceitos. Na tabela 2.3 resumimos tais limites.

Tabela 2.3: *Thresholds* dos principais métodos de aplicação de critérios de dissimilaridades

Probabilidade de associação	D_{sh}	$D_{(Dour)}$	D_H
baixa	< 0.25	< 0.10	< 0.25
média baixa	< 0.20	< 0.08	< 0.20
média alta	< 0.15	< 0.06	< 0.15
alta	< 0.10	< 0.04	< 0.10
muito alta	< 0.05	< 0.02	< 0.05

Na etapa (c), os critério de similaridade, D_c (D-criterion), são combinados na análise estatística de grupos para definir se um conjunto de meteoros observados compartilham de características orbitais semelhantes para serem considerados oriundos do mesmo corpo progenitor, ou seja, comparando-se as órbitas de meteoros individuais com a órbita média de uma chuva conhecida, cometa, asteroide ou NEO.

À partir da aplicação de critérios de dissimilaridades, pode-se definir a corrente de meteoroides de mesma origem parental, conforme o autor Jopek (2011):

“[...] um grupo de meteoroides onde uma significativa concentração de parâmetros dinâmicos é observada, ou de forma simplificada uma corrente de meteoroides consiste de orbitas concentradas em torno de uma órbita média.”

De acordo com a discussão no artigo deste mesmo autor, é importante frisar que o uso de critérios de associação tem problemas, tais como : Qual o melhor método de análise de cluster? Qual o valor ideal de ” *threshold*”? Quais parâmetros orbitais mais indicados a cada problema?

2.7 Complexos asteroides-meteoroides

Complexos são grupos de corpos parentais e correntes de meteoroides dinamicamente associados, envolvendo múltiplos corpos progenitores e múltiplas correntes. Conforme já discutido nas seções anteriores a desintegração de cometas e asteroides leva à produção de enxames ou fluxos de meteoroides que orbitam em torno do Sol,

talvez o caso mais conhecido de fragmentação de um NEA produzindo uma chuva seja o asteroide 3200 Phaethon (Jopek and Jenniskens, 2011).

Os processos termais levam à produção de grãos e ou poeira, como o stress material, colisões e instabilidade rotacional em asteroides podendo também ocasionar correntes ou fluxos de meteoroides, como discutido nas seções anteriores. A existência de tais fluxos dá origem dos chamados complexos asteroides-meteoroides (Kasuga and Jewitt, 2019), como, por exemplo, o complexo Phaethon-Geminids e o complexo Icarus.

Neste tipo de associação, mais de um NEO pode estar associado á uma chuva de meteoros, e a compreensão desta conexão pode ajudar na distinção entre um corpo cometário, inativo ou dormente, e um asteroide. A distinção entre corpos progenitores cometários e asteroides ajuda na compreensão da formação dos complexos e sua tipificação, através da análise de suas dinâmica, em virtude de insuficiente medidas de suas propriedades físicas, tais como composição, albedo, dimensões e tipos espectroscópicos.

Até o momento são identificados de 6 complexos, discriminados na tabela 2.4, cujas principais características são apresentadas abaixo.

2.7.1 Complexo Geminids - (3200) Phaethon

A associação entre Geminids #4 e o NEO Phaethon 3200 já é bem estabelecida na literatura especializada (Whipple, 1983; Spurný, 1993; Jenniskens, 2006). Essa chuva é uma das mais ativas com uma crescente taxa zenital horária até o 2050 quando deverá atingir ZHR 190, quando a Terra estará atravessando a parte mais densa do núcleo do enxame (Jenniskens, 2006).

Ohtsuka et al. (2008) sugerem a existência de complexos de meteoroides Geminids-Phaethon por conta da existência de um grupo de fragmentos dinamicamente associados, tendo como origem Phaeton e os NEOS (155140) 2005 UD e (225416) 1999 YC.

O NEA associado, (3200) Phaethon, tem seus elementos orbitais bem próximos à chuva associada e uma distância periélica $q = 0.14$ U.A. o que aponta processos termais intensos em sua superfície (chegando $\approx 1\ 000$ K) (Ohtsuka et al., 2009). A espectroscopia dos meteoros Geminids mostra abundância da linha Na e estudos

Tabela 2.4: Elenco de complexos asteroides - meteoroides

Complexo	Código da Chuva	Objeto	T_j^1
Geminids	#4	(3200) Phaeton	4.509
		(155140) 2005 UD	4.504
		(225416) 1999 YC	4.114
Quadrantids	#10	(196256) 2003 EH1	2.065
		96P/Machholz 1	1.939
Capricornids	#1	169/NEAT	2.887
		P/2003 T12	2.894
		2017 MB1	3.071
Taurids	*	2P/Encke	3.025
Taurids-Perseids	*	1566 Icarus	5.296
		2007 MK6	5.284
Phoenecids	#254	2003 WY25 ²	2.816

Nota:

1 - Valores retirados de Kasuga and Jewitt (2019) com o parâmetro de Tisserand calculado em relação a Júpiter.

2 - Reclassificado como cometa 289 P/Blanpain.

* Estes complexos não possuem numeração de catálogo.

indicam que a perda desse elemento pode estar ligada a processos termais recorrentes em 3200 Phaethon (Trigo-Rodríguez et al., 2004).

3200 Phaethon possui um tamanho entre 5 a 6 km de diâmetro, com espectro de reflexão do tipo B, diferenciando-o da maioria dos asteroides e núcleos cometários. A espectroscopia de (155140) 2005 UD indica cores próximas ao azul e (225416) 1999 YC mais neutra (Kasuga and Jewitt, 2008).

As hipóteses levantadas para explicar o processo gerador de atividades e produção de grãos de poeira em Phaethon, ao ponto de criar um enxame de meteoroides, envolvem causas como colisões catastróficas, disrupção rotacional e fraturas por ação termal.

Recentes observações tem mostrado perda de massa quando o objeto faz passagens próximas ao periélio com um aumento de brilho e detecção de cauda linear (Kasuga and Jewitt, 2008). Entretanto, a perda de massa observada é 10^7 vezes menor do que o esperado para uma corrente de massa de meteoroides que produzem chuva, algo em torno de 30 a 300 $kg\ seg^{-1}$. Vale ressaltar, entretanto, que o limite ótico da cauda de Phaethon, $\leq 3 \times 10^{-9}$ é consistente com o esperado

para a poeira cometária entre $10^{-9} - 10^{-8}$ (Ishiguro et al., 2009; Jewitt et al., 2018).

2.7.2 Complexo Quadrantids - (196256) 2003 EH1

Esta associação já foi mencionada na 2.2.2, e a conexão com o objeto (196256) 2003 EH1 envolve características peculiares como a formação de dois principais ramos de enxames, com uma idade de ejeção recente, entre 200 a 500 anos atrás, enquanto o background de grãos indica idades mais antigas, $\approx 3\ 500$ anos ou mais (Kaňuchová and Neslušan, 2007; Abedin et al., 2015).

Além da associação com o progenitor (196256) 2003 EH1, este complexo pode estar associado a outro formado pelo cometa 96 P/Macholz, sendo a fonte de grãos e fragmentos mais antigos. Isso levanta a hipótese de que ambos objetos fariam parte de um corpo maior que se partiu há cerca de 9 500 anos atrás (Sekanina and Chodas, 2005). As propriedades de cor ótica de (196256) 2003 EH1 aproxima-se de asteroides tipo C (Kasuga and Jewitt, 2015), porém estudos dinâmicos recentes apontam sua provável origem com um fragmento de um núcleo extinto já que três critérios de dissimilaridade (Sekanina and Chodas, 2005), D_{sh} , D_D e D_j convergem para mínimos na mesma época da previsão da ruptura do cometa original Kokhirova and Babadzhanov (2023).

Estudos teóricos de estruturas filamentosas de meteoroides indicam mais chuvas pertencendo a este complexo: daytime Arietids (#0171), Southern (#05) e Northern(#26) δ – Aquarids (além da Quadrantids); com a previsão de mais 4 chuvas (Neslušan et al., 2013a; Babadzhanov et al., 2017).

2.7.3 Complexo Capricornids - 169 P/NEAT

A chuva α -Capricornids pode estar associada o corpo parental 169 P/NEAT, identificado por simulações numéricas (Jenniskens and Vaubaillon, 2010). Inicialmente classificado como o NEA 2002 EX12 foi posteriormente reclassificado como cometa, após a detecção da coma. Possui um diâmetro de 4 km, e deve ser um cometa praticamente dormente da família de Júpiter com pouca perda de massa (cerca de $10^{-2} \text{ Kg seg}^{-1}$) a cada passagem periélica. Outro fato importante diz respeito à existência de um chuva irmã diurna a Capricornids-Sagittarids (Jenniskens, 2006).

Outros candidatos, como o cometa P/2003 T12 pode ser originada de uma antiga ruptura de 169 P/NEAT há cerca de 2 900 anos atrás (Sosa and Fernández,

2015), também o NEO 2017 MB1 foi apontado como, possivelmente ligado a este complexo (Wiegert et al., 2017).

2.7.4 Complexo Taurids

Este complexo é conhecido por produzir fireballs, sendo ativo de setembro a dezembro de cada ano e provavelmente composto por muitos corpos parentais. Esse complexo possui dois ramos principais, o Norte e o Sul (Vaubailon et al., 2019), sendo provável que um corpo grande, de ≈ 40 km de diâmetro, seja o progenitor original das Taurids, tendo se fragmentado há 10 000 anos atrás. O corpo parental principal é o cometa 2P/ Encke.

Caracteriza-se por órbitas de baixas inclinações e periélio entre 0.2 a 0.5 U.A.. Devido a essas baixas inclinações, muitas associações espúrias podem ocorrer, com base nos cálculos de dinâmica orbital e critérios de dissimilaridade. A espectroscopia de meteoroides Taurids indicam características carbonáceas (Borovička et al., 2007; Matlovič et al., 2017), sendo que a baixa resistência material (0.02 a 0.10 MPA) e dispersão de linhas de Fe sugerem que os meteoros sejam de origem cometária.

2.7.5 Complexo Taurids - Perseids

Trata-se de um enxame de meteoroides associado aos asteroide (1566) Icarus e 2007 MK6, pertencentes a primeira família encontrada na região dos NEA (Ohtsuka et al., 2007) e que dá origem à chuva de meteoros diurna Taurid-Perseid (Sekanina, 1973).

O NEO (1566) Icarus foi descoberto em 1949, tendo $q = 0.19$ e $i = 23^\circ$, um diâmetro de ~ 1 km, um albedo entre 0.3 a 0.5 e um período rotacional de 2.273 horas (Harris and Lagerros, 2002). Seu tipo espectral é próximo de Q ou V (Hicks et al., 1998). Provavelmente, devido a stress termal (~ 900 K, em regiões próximas de seu periélio) e à proximidade de um período rotacional crítico, ocasionou a ruptura de (1566) Icarus, dando origem ao NEA 2007 MK6, descoberto em 2007 (Jewitt and Hsieh, 2022).

2.7.6 Complexo Phoenecids - 2003 WY25(Cometa 289/P Blanpain)

A potencial associação entre a chuva de meteoros Phoenecids # e o cometa D/1819 W (Blanpain) foi proposta no artigo de Ridley and Hartree (1957). O NEA 2003 WY25 descoberto em 2003 foi identificado como sendo o próprio cometa, ou parte de seu núcleo (Foglia et al., 2005; Micheli, 2005, 2013).

Estudos do objeto 2003 WY25 realizados por Jewitt (2006) mostram a existência de um coma, entretanto estimativas de perda de massas, $\sim 10^{-2} \text{ Kg S}^{-1}$, com um total estimado de $\sim 2 \times 10^{10} \text{ kg}$, estão bem abaixo do esperado para a produção de enxames de meteoroides (10^{11} kg) numa escala $\leq 10\,000$ anos. Por este motivo, o autor levantou a hipótese de haver um corpo parental muito maior.

2.7.7 Complexo Andromedis - Cometa 3D/Biela

O cometa Biela foi descoberto em 1789 (Hawkins et al., 1959), pertencendo ao tipo JFC. Sofreu desintegração, em 1842, subitamente desaparecendo em 1852, e estudos de dinâmica associam-no à chuva (#8) Andromedids (Olivier, 1925; Cook, 1973). Sua chuva é intermitente, tendo sido detectada por radar (Wiegert et al., 2013).

Capítulo 3

Associação entre ACO e chuvas ou complexos

3.1 Introdução

Os ACO (Asteroids on Cometary Orbits) são asteroides inativos com critério de Tisserand $2.0 < T_j < 3.0$, (Kim et al., 2014). Corpos inativos podem ser também cometas que já perderam todo seu material volátil (Fernández et al., 2001). Como a separação física entre asteroides e cometas ainda é discutida, estabelecer os limites entre estes dois tipos de objetos enseja estabelecer critérios em uma zona difusa de caracterização, pois alguns objetos asteroidais podem apresentar atividade cometária enquanto que cometas extintos aparentam ser asteroides (Ye, 2018).

Neste aspecto, é importante determinar se os ACO são cometas ou asteroides que por algum processo dinâmico saíram do CP para órbitas cometárias típicas, de maior inclinação e excentricidade (Martino et al., 2019).

À partir do modelo cometário (Whipple, 1963), chegou-se a conclusão que um cometa poderia se tornar extinto: (a) quando já extinguiu todo seu material volátil, após o término de sua vida útil, (b) dormiente quando é coberto por uma crosta de grãos e poeira que impede a sublimação de gelos (Rickman et al., 1990; Ye et al., 2016) e (c) inativo quando está numa parte da órbita onde a perda de voláteis é muito reduzida, não havendo a observação de coma ou cauda (Weissman et al., 2002).

A aparência indistinguível, em observações astronômicas, de um cometa inerte confunde-se com asteroide (Chandler et al., 2024), p.ex., 28P/Neujim 1 após exaurir suas reservas de voláteis se tornou um objeto de aparência estelar, duas semanas após sua passagem periélica. Kresak (1987) em seu artigo sobre cometas inativos,

aponta evidências da fase dormente durante o envelhecimento de cometas periódicos.

Como vimos no Capítulo 1 asteroides são corpos rochosos ou gelados, entre Marte e Júpiter, inativos, compostos de um conjunto complexo de minerais refratários enquanto os cometas são corpos ricos em gelos com misturas complexas de materiais voláteis e refratários, que apresentam, coma e cauda, a medida que se aproximam do Sol. Observacionalmente, a diferença entre asteroides e cometas se dá pela ausência de perda de massa detectável.

No fundo, os pequenos corpos atuais têm composições que incluem materiais voláteis em quantidades que variam de nulas a consideráveis, dependendo de sua região de acreção original e toda evolução térmica, dinâmica e colisional que tenha sofrido. Asteroides e cometas não são categorias binárias e mutuamente exclusivas, de modo que não faz muito sentido procurar critérios absolutos para distingui-los.

Objetos ativos no Sistema Solar são relativamente raros e representam um desafio para sua identificação. Como os asteroides ativos, resultando em atividade “comet-like”, visto na subseção 2.2.4, há outros objetos que podem apresentar atividade, como os centauros, quasi-Hilda ativos (QHAs) e JFC.

A evolução dinâmica de um cometa de curto período pode exceder sua vida ativa, sobrevivendo à desintegração completa após a depleção de seus voláteis, persistindo em órbita, como um corpo inativo que pode ser confundido com um NEA. Portanto, identificar suas principais características físicas e dinâmicas serve de base para entender a vida útil de cometas e ajuda na modelagem de regiões de fonte cometárias, bem como amplia o conhecimento de corpos progenitores de chuvas de meteoros.

Dessa forma, a investigação de objetos ativos no Sistema Solar, fornecem informações cruciais sobre a formação do Sistema Solar e potencialmente sobre a origem da água na Terra. A identificação desses objetos é desafiadora, mas fundamental para a compreensão de sua natureza e papel no Sistema Solar.

Como vimos, certo número de pequenos corpos pode estar na zona difusa de classificação entre cometas e asteroides. A pesquisa de corpos parentais investigando a conexão entre ACO e chuvas de meteoros pode identificar pistas sobre o histórico de ejeções episódicas e melhor determinar suas causas, ajudando na compreensão da linha divisória entre asteroides e cometas.

É importante ressaltar que a identificação de objetos inertes, tipo asteroidal em trajetórias tipo cometária, como é o caso dos ACO e Damocloides¹, permite o estudo dos limites em relação tempo de vida de Cometas (Jewitt e Hsieh, 2023).

Outro ponto importante se refere à presença de corpos dormentes entre a população de NEOs (Mommert et al., 2015) que podem ser tipo PHAs, com probabilidades de impacto, além de ajudar na estimativa de população que poderia ter contribuído na acreção terrestre de água e materiais orgânicos, como aminoácidos e bases.

Neste Capítulo vamos explorar a conexão entre ACO e potenciais associações com correntes de meteoroides, ou seja explorar dados que ajudem a identificar objetos ativos na população de ACO entre os NEO.

3.1.1 ACO e o limite superior T_J

Em geral, asteroides estão dinamicamente desconectados de Júpiter, enquanto cometas estão acoplados ou intersectam a órbita do planeta joviano e tem uma evolução dinâmica marcada por encontros próximos (Martino et al., 2019), com este planeta.

Tanto os asteroides quanto os cometas podem evoluir física e dinamicamente transformando-se um em outro objeto, há corpos que tem características de asteroide, mesmo sendo cometa. Além disso, a evolução de órbitas cometárias para asteroides parece possível. No trabalho de Hsieh and Haghighipour (2016) é apontado que objetos JFC podem atingir órbitas do tipo CP em integrações numéricas de 2 milhões de anos, com características de alta inclinação e excentricidades.

Assim, asteroides e cometas não devem ser separados através de um limite tão exato quanto $T_J = 3$, como vimos na seção 1.2.5. Um valor mais relaxado é usado por autores como Tancredi (2014); Jewitt et al. (2015) que utilizam faixa de valores entre $3.05 \leq T_J \leq 3.08$.

Neste trabalho usamos o limite superior $T_J = 3.05$, para diferenciar um objeto tipo ACO de um cometa, o mesmo usado por Tancredi (2014). Este valor limite considera encontros próximos com Júpiter, levando-se em conta ajustes na equação de Tisserand (eq.1.4), com a substituição de semi-eixo maior pela distância heliocêntrica, considerando encontros planetários e a distância mínima de 2 a 3

¹Corpos com similaridades dinâmicas à JFC, que podem ser cometas inativos ou extintos.

esferas de Hill aos planetas gigantes, aos quais podem gerar mudanças significativas na órbita cometária (Martino et al., 2019).

Tancredi (2014) vai mais além, com aplicação adaptada do critério de Tisserand, estabelecendo uma classificação detalhada, para distinção entre cometas e asteróides e os casos limites dos ACO. Usando limite superior de $T_J = 3.05$, MOID (Minimum Orbital Intersection Distance) em relação a planetas gigantes, informações de distâncias periélicas, afélicas e a localização de ressonâncias. Neste esquema, são criadas quatro classes de cometas periódicos:

- Halley type comets: $T_J < 2$ e $a < a_{Net}$.
- JFC : $2 < T_J < 3.05$ e $q < Q_{Jup}$.
- Cometas em órbitas asteroidais (CAOS) : $T_J > 3.05$ e $q < Q_J$.
- Cometas centaurus : $T_J > 2$, $T_{min} < 3.05$ e $Q_J < q < a_{ura}$.

E os ACO são agrupados em 3 categorias:

- ACO - Jupyter family types (AJF) : $2 < T_J < 3.05$ e $q < Q_J$. Não estão em ressonância e possuem MOID baixo em relação aos planetas gigantes.
- Centaurus asteroids (CAS) : $T_J > 2$ e $Q_J < q < a_{ura}$.
- ACO-Halley type (AHT) : $T_J < 2$,

onde T_{min} é o valor Tisserand mínimo de cada planetas gigante, q é o periélio do objeto, Q_J é o afélio de Júpiter, a_{Ura} é o semi-eixo maior de Urano e a_{Net} é o semi-eixo maior de Netuno.

No que se segue, vamos primeiro discutir os tipo NEO e ACO e suas implicações.

3.2 ACO e JFC entre os NEO

Conforme visto no Capítulo 1, NEA são objetos com $q < 1.3$ UA e se tem parâmetro de Tisserand $2 < T_j < 3$ são classificados como ACO. A existência de ACO na população de NEO, pode indicar a presença de cometas dormentes. Binzel and Lupishko (2006) determinaram que entre 5 a 9% dos NEO podem ser dormentes, tipicamente em órbitas JFCs e albedo escuro. Esses objetos podem também ser classificados como cometas se houver uma conexão com fluxos de meteoroides,

originários de atividades anteriores.

Alguns NEA tem sido associados à chuva de meteoros, como (5496) 1973 NA ($T_J = 2.53$), (4015) Wilson-Harrington ($T_J = 3.08$) que exibiu pela última vez atividade em 1949 (Fernandez et al. 1997) e 3200 Phaethon, associado à chuva de meteoros Geminids.

Casos como 3552 Don Quixote e P/2006 HR30, corpos inicialmente classificados como asteroides, o primeiro tendo apresentado atividade cometária, vários anos após sua descoberta (Mommert et al., 2014) e o segundo reclassificado como cometa, em órbita tipo - Halley (Lowry et al., 2006; ?), apontam a possibilidade de NEA ativos serem núcleos de cometas antigos ou dormentes, principalmente aqueles que estejam em órbitas tipo cometária.

Além da relevância quanto à distinção entre NEA ativos e cometas dormentes, o estudo da atividade destes objetos é importante para entender a origem dos voláteis, nos planetas terrestres, devido à possibilidade de fornecimento de água e matéria orgânica, nas fases primordiais da Terra (Morbidelli et al., 2000; Izidoro et al., 2013).

Os cometas ao extinguiem seus componentes voláteis ao longo de suas vidas, tornam-se objetos inertes tipo asteroidal com albedo escuro e numa trajetória cometária. Destes, os ACOS podem ser núcleos cometários, pois já não possuem atividade ou sua atividade é tão fraca que está abaixo dos limites observáveis.

Fernández et al. (2001, 2005) encontraram objetos com $T_J < 3$ e albedos substancialmente mais baixos que objetos com $T_J > 3$, sendo que 30% dos NEO estariam com órbitas $T_J < 3$. Por outro lado, Binzel and Lupishko (2006) determinaram uma população NEO com propriedades dinâmicas e características físicas consistentes com cometas extintos ou dormentes, correspondendo a estimativas de cerca de 15% dos NEO.

Também, deve-se em consideração objetos com $T_J > 3$ associados a chuvas de meteoros, pois eles podem ter sofrido interações gravitacionais com planetas terrestres ou sofrido acoplamento com o planeta Júpiter no espaço próximo à Terra com $T_J > 3$ podem ser perturbados levados à $T_J < 3$.

Uma forma de separar objetos ACO e casos limites é a investigação de fluxos de meteoroides associados a corpos parentais, já que ejeções antigas desses objetos podem produzir chuvas de meteoros (Ye, 2018). Binzel et al. (2002) consideraram que

candidatos a cometas na população de NEO devem satisfazer as seguintes condições:

1. baixo albedo, e classificação taxonômica D-,P-,C-type;
2. taxa rotacional menor do que a taxa média de rotação dos NEO;
3. órbitas não-estáveis e estar associados a fluxos de meteoros.

3.3 Estudo das Associações com Corpos Parentais - Metodologia

A detecção de meteoros associados a objetos parentais podem evidenciar a produção de grãos e poeira recentes desses corpos, como atividades intermitentes, ex. Cometa 3D/Biela ou *outburst* da chuva June α -Virginids, em 2005, possivelmente associada ao NEO 2001 ME1 139359 (Ye, 2018). Portanto, neste trabalho vamos investigar riantes de chuvas de meteoros associadas a corpos parentais tipo ACO o que permite revelar o histórico de ejeções periódicas de corpos atualmente inativos.

Nesta investigação vamos usar uma metodologia combinando dois métodos, à partir de uma grande amostragem de órbitas de meteoros e de riantes teóricos (ou sintéticos). Na primeira etapa usamos a metodologia de Micheli (2013), diversa da tradicional abordagem de agrupamentos em critérios de dissimilaridade (ver subseção 2.6.1, Capítulo 2). Utilizando distribuições estatísticas referentes a um espaço, onde os parâmetros orbitais dos riantes sintéticos de NEO são usados como ponto de partida, para se chegar a possíveis associações de riantes, evitando, assim, o bias de *threshold* de critérios de dissimilaridade.

Lembrando que os métodos de critérios de dissimilaridade usam valores de *threshold* D_c (D-criterion) de separação de agrupamentos em famílias, conforme descrito na subseção 2.6.1, comparando dois conjuntos de quantidades, numa métrica padrão: de um lado os riantes observados de meteoros, suas velocidades e tempos medidos, convertidos em elementos keplerianos, e, de outro, as órbitas do corpo parental.

Na segunda etapa aplicamos a metodologia de separação de órbitas por riantes sintéticos, apresentada em Guennoun et al. (2019). Portanto, a nossa nova abordagem que combina os dois métodos representa uma metodologia que diminui problemas de bias de criterios de dissimilaridade e aprimora o uso de parâmetros.

Para realizar essas análises, adaptamos um código em FORTRAN 77 que gera riantes sintéticos e desenvolvemos uma série de códigos em linguagem PYTHON para separar banco de dados, gerar listas de ACO, chuvas e órbitas de meteoros e aplicar ao nosso modelo. A seguir, vamos explicar como utilizamos os dois métodos para encontrar possíveis associações entre ACOs e chuvas de meteoros, através dos códigos desenvolvidos.

3.3.1 Primeira Etapa: o Método de Micheli (2013) ‘*Match*’

Este método, que se segue chamaremos de “*Match*”, utiliza o cálculo de riantes teóricos para determinar possíveis associações de objetos parentais com chuvas do banco de dados da IAU Meteor Data Center (MDC IAU)². É usada uma lógica estatística de espaço de fase de elementos orbitais e a probabilidade do corpo progenitor de ser um falso-positivo (maiores detalhes da técnica estão descritos no apêndice C).

Usamos o programa compilado do fortran “dosmeth.exe” detalhadamente descrito pelo seu criador em Neslušan et al. (1998). Este procedimento reúne os elementos mais atuais das órbitas dos objetos de pesquisa, no caso NEO e ACO, nos cálculos usados dos riantes, através da assunção de seis métodos que modificam a órbita, alterando a sua forma e “forçando” o MOID.

Essa análise é feita para ambos os nodos orbitais que por sua vez criam dois riantes distintos, sendo cada riante tratado de forma separada (há casos de encontros próximos em ambos os nodos, p.ex, Chuva Orionids e η -Aquiariids, as duas são originadas da ejeção de detritos do cometa Halley). Se um dos riantes está muito longe para gerar uma chuva de meteoros na Terra é descartado no processo de investigação.

Para realizar esta análise adaptamos o código-fonte em FORTRAN 77 original, para ser aplicado, como um pipeline a uma lista de objetos previamente definidos. A seguir vamos detalhar o algoritmo que gera os riantes teóricos, bem como as etapas de separação desses resultados intermediários.

²https://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2022/Roje/roje_lista.php?corobic_roje=0&sort_roje=0

Os cálculos de Radiante Sintético

O método computacional que calcula um radiante teórico com base na órbita de um NEO (asteroide ou cometa) foi desenvolvido em dois artigos por Svoren et al. (1993, 1994) e transformados em um programa por Neslušan et al. (1998). Nestes é estudada, a relação entre um radiante teórico de um possível corpo progenitor e uma chuva de meteoros, aplicando cálculos de radiantes sintéticos, obtidos por 6 diferentes métodos descritos a seguir:

- Variação de periélio “q – adjustments” (Hasegawa, 1990): método Q.
- Variação de periélio e excentricidade (Svoren et al., 1993): método B.
- Variação do argumento de periélio (Steel and Baggaley, 1985): método W.
- Variação da linha dos Apsides (Svoren et al., 1993): método A.
- Variação do argumento de periélio e inclinação (Hasegawa, 1990): método H.
- Desvio paralelo do vetor velocidade (Porter, 1952): método P.

As modificações são realizadas para ajustar a órbita do corpo progenitor até que um dos nodos atinja $r = 1$ U.A, através de variações na forma e orientação do plano orbital (métodos Q, B e W) e na orientação da órbita (métodos A, H e P). Cada método usado no programa vai gerar uma opção, resultando em seis resultados teóricos e o melhor será aquele que menos modificou a órbita, caracterizado pelo valor *threshold* mais baixo Dsh_c entre a forma da órbita atual e as geradas teoricamente.

Basicamente, este procedimento, realizado pelo programa 'dosmeth.exe' compilado em FORTRAN 77 (Neslušan et al., 1998), modifica a órbita do corpo parental ajustando-a à órbita média de uma chuva, onde, ao menos um nodo atravessa o caminho da Terra. Como há a possibilidade da órbita modificada passar duas vezes pelo trajeto orbital do planeta, podem existir dois enxames de meteoros originados de um mesmo corpo parental, como as chuvas η -Aquadrids e Orionids. Dessa forma a órbita do progenitor é dividida em dois arcos: pré e pós-periélio, com aproximação ao arco orbital da Terra considerado em separado.

O critério utilizado que testa o ajuste entre a órbita teórica do corpo parental com um nodo atravessando o caminho da Terra é o D_{sh} , já discutido na seção 2.6.1. O menor valor é o escolhido para classificar a melhor órbita.

O resultado final será constituído por duas tabelas, a primeira delas contém as coordenadas equatoriais e velocidades geocêntricas e heliocêntricas, longitude solar e data do potencial máximo da chuva. Na segunda tabela constam os elementos orbitais do radiante sintético, além da distância entre o progenitor e a Terra nessa data, e o intervalo de tempo entre a passagem do local mais próximo à órbita terrestre e o período da máxima atividade, mostrando também a distância entre um dado arco do corpo parental e a órbita terrestre.

Para separar os raios teóricos ou sintéticos reais daqueles que sejam irrealísticos, o programa 'dosmeth.exe' usa o mesmo critério D_{sh} , como uma boa aproximação. Dessa forma valores abaixo de 0.5 podem ser considerados como potencialmente reais, e valores de até 0.3 como bons indicativos, mas se o valor estiver abaixo de 0.1 o desvio do radiante observado (o caso p.ex. de uma chuva existente) com um teórico será menor que 5° e ele pode ser considerado realístico.

Assim, cada método usado no programa vai gerar uma opção, resultando em seis resultados teóricos e o melhor cálculo será aquele que menos modificou a órbita, caracterizado pelo valor *threshold* mais baixo D_{sh} entre a forma da órbita atual e as geradas teoricamente. Para fins deste trabalho, denominamos o método de cálculo do radiante sintético como “método Neslusan”.

Outro fator determinante da qualidade dos resultados é a distância mínima entre o progenitor e a órbita terrestre, quanto menor a distância mais baixo é o valor de D_{sh} como mostrado na tabela 3.1 abaixo, que mostra dados comparativos:

Tabela 3.1: Dados Comparativos de distância mínima e critério D_{sh} (retirados de Neslusan et al. (1994)).

Corpo Parental	Nome da Chuva	Distância (U.A.)	D_{sh}
1P/Halley	η -Aquarids	0.066	0.112
	Orionids	0.155	0.262
3200 Phaeton	Geminids	0.022	0.032
55P/Tempell-Tuttle	Leonids	0.003	0.025
C/1861 G1 Thatcher	Lirids	0.002	0.004
109P/ Swift-Tuttle	Perseids	0.001	0.002

O passo seguinte é a comparação com a lista atualizada de chuvas de meteoros publicada periodicamente no sitio da MDC IAU. Neste trabalho usamos a listagem atualizada de 22 de maio de 2023.

Assim realizamos a comparação dos riantes teóricos gerados com a listagem de chuvas conhecidas, estabelecidas e aquelas em observação (*working list*), fornecidos pelo banco de dados do MDC IAU, usando método '*Match*'. Para tanto, não só adaptamos scripts de coleta de dados dos riantes como também de pequenos corpos nos diversos bancos de dados disponíveis na literatura (vide B.1), que foram utilizados neste trabalho.

A metodologia de “*Match*”

Conforme descrito na seção 2.6.1, o uso de critérios de dissimilaridade varia conforme o problema enfrentado. Para evitar o bias de incertezas no uso desse critério, usamos a linha adotada por Micheli (2013), pois quando se classifica chuvas mais fracas ou que tenham cálculos com alta incerteza nos parâmetros dos riantes, não gerando associações precisas de órbitas de meteoros, o resultado de classificação de dissimilaridades pode sofrer altos erros. Assim, usamos filtros estatísticos levando em consideração coordenadas equatoriais e velocidades geocêntricas dos riantes, estabelecendo uma distribuição de incertezas para cada parâmetro.

Numa segunda etapa desse '*Match*' é feito um teste estatístico para determinar a probabilidade da associação ser mero acaso, levando-se em consideração um mesmo espaço de fase de distribuição de órbitas em comum de cada chuva e a possibilidade do corpo parental estar num grupo de objetos com características orbitais próximas, ocupando assim o mesmo 'espaço'.

É considerado mera coincidência se determinado potencial progenitor está na mesma região de espaço de fase de elementos orbitais de grande número de pares de associação de uma chuva. Calcula-se a proporção de total de NEO caindo na mesma região considerada, multiplicando esse fator proporcional ao número total da amostra (em nosso caso mais de 63 mil objetos). Assim, é possível determinar a significância dessa associação, se ela é espúria ou não. A esta significância denominamos de 'fator de confusão', que aponta um escala percentual de falsos-positivos.

Igualmente à Micheli (2013) usamos um fator de corte de 20% aplicados as associações (NEO e chuvas) resultantes, ou seja, acima desse limite não consideramos a associação. Em seu trabalho, Micheli usa uma amostra de 8 800 NEO, cerca de 7 vezes menor que a aplicada em nossa pesquisa e um número menor de chuvas do banco de dados da MDC IAU, órgão ligado a comissão de meteoros e meteoróides da UAI (União Astronômica Internacional), e elenca cerca de 1710 chuvas e suas soluções, sendo que apenas 110 chuvas destas estão oficialmente

aprovadas (Hajduková et al., 2023) (em dezembro de 2023).

No total de nossa amostra de NEO, constam MCA e NEA, esse conjunto é o ponto de partida dos cálculos de ‘*Match*’, ao longo das seções seguintes será explicado toda a parte de análise, resultados e conclusões.

O levantamento de associações entre corpos parentais e Chuvas

O procedimento descrito acima é replicado na listagem de ACO, para obtenção dos radiantes teóricos associados, pois a partir dos resultados da amostragem inicial fazemos um corte pelo critério de Tisserand para coletar associações de NEA tipo ACO. Da listagem resultante encontramos uma relação de ACO e suas possíveis correspondências entre as chuvas da MDC IAU.

Além disso, para uma relação mais confiável de associações, reduzindo a possibilidade de agrupamentos espúrios, aplicamos aos resultados finais, quando cabíveis, a metodologia do autor Guennoun et al. (2019) que separa associações de órbitas de meteoros e NEO. Isso possibilitou um corte mais confiável nas possíveis ligações, quando existem órbitas de meteoros associadas a algum ACO, reduzindo o efeito de mera flutuação estatística devido ao grande número de amostras usadas.

3.3.2 Segunda Etapa: aplicação da metodologia de Guennoun (2019)

Basicamente este procedimento limita a busca em órbitas de meteoros que tenham os parâmetros dinâmicos em relação ao corpo parental abaixo de valores previamente definidos, tais como: diferença de longitude solar e AR e DEC menores que 8° , distância do radiante menor que 2° e *thresholds* fixos em 5% de variação para velocidades geocêntricas (Guennoun et al., 2019).

Uma primeira aplicação deste método foi realizada para análise de possíveis associações do objeto binário 2017 YE5, um provável cometa dormente, em órbita asteroidal, com alguma família de meteoros. Os resultados dados em Monteiro et al. (2021) (vide seção A.2 do apêndice A), mostram a eventual associação de 18 órbitas de meteoroides com este corpo. Vale ressaltar que naquele estudo não aplicamos a metodologia de Micheli (2013), explicada na seção anterior.

Esta segunda etapa somente é aplicada se há separação de meteoros e respectivo ACO da listagem da tabela 3.4.

Levantamento de órbitas de meteoros nas redes de observação

Neste trabalho foram utilizadas 4 fontes, dadas em bancos de dados de órbitas das redes de detecção por videomonitoramento de meteoros, SONOTACO, EDMOND e EXOSS (Kornoš et al., 2014; De Cicco et al., 2018; SonotaCo et al., 2021; Koukal et al., 2024), totalizando mais de 646 000 meteoros, abrangendo registros de Jan/2007 à Dez/2022 . Estas órbitas serão utilizadas na aplicação do método de Guennoun et al. (2019)

Neste conjunto aplicamos filtros de qualidade de medição para ter um conjunto amostral de boa precisão e medidas dos parâmetros, usando o procedimento detalhado por Kornos et al. (2013) que explica a aplicação de filtros para falsas e menos precisas órbitas. Desta forma, chegamos a um conjunto de mais de 590 000 órbitas.

Testes estatísticos

Entretanto, ainda resta uma questão a ser enfrentada: associações encontradas são mero acaso devido a um grande número de órbitas? São flutuações estatísticas? Para responder a essa questão usamos o mesmo processo de análise descrito em Guennoun et al. (2019), com alterações dadas em Ye et al. (2016) usando órbitas sintéticas de meteoros para determinar a probabilidade de alinhamento entre dois corpos: um meteoróide e um ACO.

Após a coleta de associações entre meteoros e riantes sintéticos de corpos parentais testados, primeiro separamos a amostra de N_m órbitas observadas, referentes à faixa de longitude solar mínima e máxima que corresponde ao meteoros associados. Em seguida, aplicamos o critério D_{sh} para cada associação e os contabilizamos em ordem crescente:

$$D_{sh}^{obs1} < D_{sh}^{obs2} < \dots < D_{sh}^{obsN_m} \quad .$$

Usando um código em PYTHON adaptado de Vida et al. (2017), então geramos órbitas sintéticas para servir de amostra na análise de probabilidades de agrupa-

mento aleatório de amostragem de órbitas. Este utiliza um método multivariado de estimativa de densidade de Kernel e cuja confiabilidade foi confirmada por Jopek (2021) ao comparar cinco métodos estatísticos.

Com os resultados obtidos dessa amostra de órbitas sintéticas ou artificiais, de $N_m^{sin} = N_m$ órbitas, então separamos em ordem crescente de D_{sh} as associações artificiais com o corpo parental testado:

$D_{sh}^{sin1} < D_{sh}^{sin2} < \dots < D_{sh}^{sinN_m^{sin}}$. Por fim, se a seguinte ordem é verdadeira:

$D_{sh}^{sin1} < D_{sh}^{obs1}, D_{sh}^{sin2} < D_{sh}^{obs2}, \dots, D_{sh}^{sinN_m^{sin}} < D_{sh}^{obsN_m}$, então uma “falsa chuva” é contabilizada.

Estes passos são repetidos $N = 1\ 000$ vezes, e se N_f é o número de falsas chuvas, então o cálculo de probabilidade aleatória será de PCO (do inglês, Probability of Chance Occurrence):

$$PCO = N_f/N. \quad (3.1)$$

3.3.3 Coleta de dados de NEA e Cometas

Scripts foram usados para fazer o download de objetos constantes no banco de dados de pequenos corpos, e também a listagem de chuvas (maiores detalhes e descrição do código pode ser acessado no apêndice B, seção B.1).

Utilizando um código em PYTHON, que acessa o banco de dados do Small Bodies Data Base do JPL, através de ‘queries’ obtemos a lista de objetos com a seguinte classificação:

- PAR: cometas de órbitas parabólicas.
- COM: cometa que não se enquadra numa classificação definida.
- ETc: cometas Encke-type, ($T_J > 3$, $a < a_J$).
- JFC: cometas da família de Júpiter, com $P < 20$ anos.
- JFc: cometas da família de Júpiter classificados como $2 < T_J < 3$

- IEO: NEA tipo Atira.
- ATE: NEA tipo Atena.
- APO: NEA tipo Apolo.
- AMO: NEA tipo Amor.
- MCA: Asteroides cruzadores de Marte.

O Apêndice D contém o quadro descritivo de cada uma das classificações conforme a versão 1.5 dos valores de query para consulta do banco de dados do site https://ssd-api.jpl.nasa.gov/sbdb_query.api.

Após alterações no código-fonte FORTRAN ‘methods_v.f’ (Nesusan, 1998) introduzindo uma nova forma de gerar radianes sintéticos para uma listagem pré-formatada de objetos-alvo, gerados pelo código PYTHON , sendo possível adaptá-lo para pipelines de pós-processamento de redução de dados, a descrição e os procedimentos para o uso dos códigos é dada no apêndice B.

Dessa forma, a lista gerada de objetos oriundos do banco de dados do SBDB, conforme descrito acima, tem a seguinte distribuição:

- MCA - 40%,
- APO - 30%,
- AMO - 19% e,
- restante correspondendo a 11%.

Na figura 3.1 podemos ver o número de objetos por classes, nesta primeira etapa, aqui não foi preciso fazer o corte por critérios de Tisserand, sendo geradas uma lista mais completa de associações, obedecendo um limite de periélio menor que 3 U.A.. Isto para não haver excesso de tempo de processamento de cálculo, com número excessivo de objetos fora da amostra de nosso trabalho.

Após o resultado do algoritmo de Micheli (2013), é feita a triagem separando-se apenas os respectivos ACO, chuvas associadas e as probabilidades envolvidas. Do resultado intermediário, acima, procedemos com filtro por falsos-positivos $\leq 20\%$, separando apenas as classes de NEA e MCA dentro da tipificação de ACO.

O trabalho de Micheli (2013) usa o corte de 20%, encontrando 50 corpos parentais com associações a chuvas periódicas. Nosso resultado ultrapassou este valor com

um número total de 723 associações possíveis. À partir desse conjunto de dados, separamos as associações somente com ACO mais prováveis (353 no total), e desta última amostra, separamos de cada ACO com mais de uma associação, aquelas que apresentam o menor valor de probabilidade de falso-positivo (67 objetos).

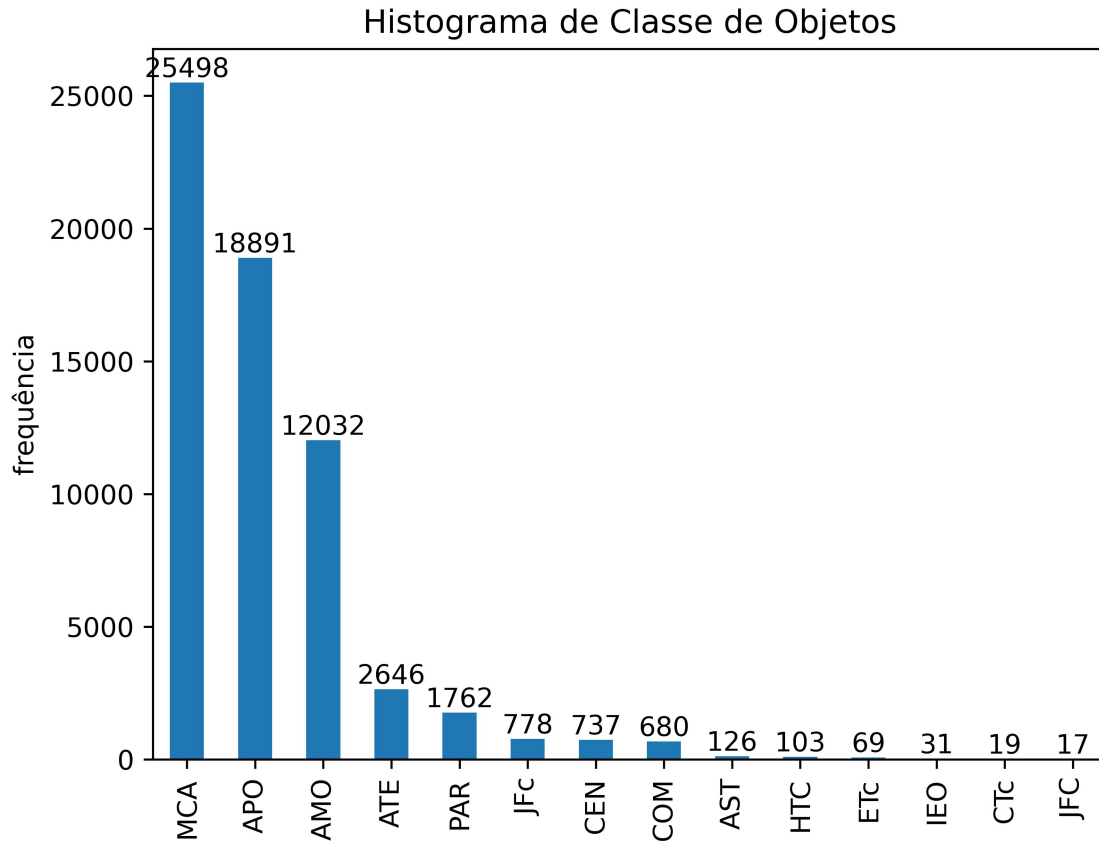


Figura 3.1: Histograma da classe de objetos selecionados para o cálculo de raiantes sintéticos.

3.3.4 Comparação de ACO e lista de chuvas

Lembrando que a finalidade deste estudo é levantar conexões entre objetos tipo ACOS e os corpos parentais de chuvas de meteoros assim como a possibilidade de composição em complexos asteroides-meteoroides, usamos a listagem mais recente publicada pelo MDC IAU, contendo mais de 1 700 .

Diferentemente do estudo de Micheli (2013) usamos a listagem mais atual e com várias correções revisadas das chuvas de meteoros. Vale notar que antes da revisão de outubro de 2022, a listagem continha uma série de inconsciências, tais como uso de épocas distintas, às vezes B.1950 e, outras J2.000, diferentes tipos de velocidades, V_g ou V_{inf} , e diferentes modos de se calcular valores dos parâmetros,

médias aritméticas, medianas, etc. As modificações introduzidas na atual lista, incluem mais informações, como o parâmetro $\lambda_G - \lambda_S$ e a quasi-invariante θ (197, 1976; Valsecchi et al., 1999), cujas aplicações evitam a duplicidade de chuvas existentes.

3.3.5 Validação do algoritmo “Match”

Usamos os NEO 2003 EH1, Phaethon e o cometa 109P/Swift-Tuttle como testes de validação para a metodologia utilizada neste trabalho e para testar a consistência do algoritmo em PYTHON “*Match*”.

Nosso objetivo sendo verificar se a metodologia separa as conexões, já bem estabelecidas: 2003 EH1 com Quadrantids (QUA), 3200 Phaethon com Geminids (GEM) e Swift-Tuttle com Perseids (PER). A nomenclatura das chuvas permite a sua representação por um código com três letras (Jenniskens, 2007b; Rudawska et al., 2023).

A ligação de QUA, GEM e PER atingiram altos valores no score de associação, dentre as amostras estudadas neste trabalho (abaixo do threshold de 20%), com 0.86%, 1.9 % e 0.2% respectivamente, de possibilidade de falso-positivo, demonstrando a aplicabilidade do nosso código.

Fizemos também uma comparação com a listagem original do trabalho de Micheli (2013) contendo mais de 50 objetos associados, embora, usando um número bem inferior na amostra de NEO (8 800) em relação a presente pesquisa (mais de 63 000) e sem a limitação da classificação de tipos ACO. Mesmo assim encontramos 3 NEO tipo ACO com idênticas associações e um ACO com associação a chuva diversa, porém o nosso resultado vai além e confirma a ligação de 2009 WN25 com November Draconids (NED #0753) já encontrada por Šegon et al. (2015).

Também, foram recuperados 5 NEA tipo asteroides, com a mesma classificação do trabalho de Micheli (2013), porém com scores diferentes. A tabela 3.2 mostra que estes valores divergiram, muito provavelmente, devido ao número maior de objetos da nossa amostra, o que afeta a pontuação de penalização durante a coleta de rankings feita pelo algoritmo.

Tabela 3.2: Associações de objetos encontradas na validação do algoritmo “*Match*”

associações		scores	
Objeto	Chuva	Micheli (2013)	Validação
<i>Tipo Asteroides</i>			
2009 SB170	Southern delta-Cancrids (SCC#097)	8.4%	11.29%
(2102) Tantalus	c-Velids (CVE#0304)	3.70%	0.88%
	lambda-Velids (LVL#0303)	3.70%	2.7%
(184990) 2006 KE89	June theta-Serpentids (JTS#0683)	17.10%	9.4%
2007 PR25	lambda-Aquariids (LAQ#0473)	12.2%	18.46%
(225416) 1999 YC	Daytime Sextantids (DSX#0221)	14.00%	10.4%
<i>Tipo ACO</i>			
2004 HA1	alpha-Bootids (ABO#138)	4.80%	14.58%
(399457) 2002 PD43	sigma-Arietids (SSA#237)	5.90%	8.83%
(664220) 2008 GV3	alpha-Ursae Majorids (AUM#385)	8.10%	6.35%
2009 WN25	November i-Draconids (NID#392)*	13.00%	4.26%

Nota:

*A associação encontrada neste trabalho corresponde à chuva November Draconids (NED #0753), confirmando o resultado de Šegon et al. (2015).

O Contraexemplo do NEO (3552) Don Quixote

Uma outra forma de testar a validade do algoritmo “*Match*” é analisar um NEO elencado como um ACO para conferir com os resultados obtidos de Micheli (2013) ao analisar este mesmo objeto. O candidato foi o NEO (3552) Don Quixote que apresenta atividade e se encontra numa órbita tipo cometária ($T_J = 2.31$).

O (3552) Don Quixote foi descoberto em 1983 e nunca havia sido observado qualquer tipo de atividade até o trabalho de Mommert et al. (2014) que indica a presença de moléculas de CO_2 na banda de $4.5 \mu m$, através de observações com o telescópio espacial *Spitzer Space Telescope*. Com um diâmetro de $18_{-0.4}^{+0.3}$ km, albedo de $0.03_{+0.02}^{-0.01}$ e tipo D na classificação de Tholen .

Este objeto pode ser considerado um cometa dormente já que, de acordo com Mommert et al. (2015, 2020), ainda não está claro se esta fraca atividade é contínua ou esporádica.

O trabalho de Rudawska and Vaubaillon (2015), usando cálculos de dissimilaridade e integração numérica de órbitas, mostram que o NEO está associado a K Lyrids (#464, KLY) e August μ Draconids (#470, AMD). Entretanto nossos resul-

tados não mostraram associação de qualquer chuva com este NEA, confirmando, inclusive, resultado encontrado por Micheli (2013). Em relação à K Lyrids (#464, KLY), nossos cálculos não apontam nenhum NEO associado, dentro do *threshold* de 20%. Porém, associados à chuva AMD o algoritmo separou potenciais ACO, que serão discutidos, na próxima seção.

A seguir discutiremos os resultados obtidos, sobre as possíveis associações entre ACOs e enxames de meteoros. Também serão analisadas as conexões dos principais resultados com as órbitas de meteoros separadas pelas metodologias explicadas nas seções anteriores entre os riantes sintéticos dos corpos parentais e as implicações e contribuições para o estudo dos complexos asteroides (NEA) - meteoroides.

3.4 Resultados

Após aplicação do método de “*Matches*”, do total de mais de 63 000 objetos, obtivemos a catalogação de 723 objetos, tipo ACO ou não e associados a alguma chuva listada na MDC IAU, com a probabilidade de falso-positivo $\leq 20\%$. A tabela 3.3 apresenta o número de NEO por faixa de probabilidades.

Tabela 3.3: Discriminação de objetos tipo NEO por faixa de falso-positivos

	Falso-Positivos %			
	(0,5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]
NEO	240	175	179	129
Total:	723			

Dos mais de 63 000 objetos utilizados, apenas cerca de 1.15% (723 objetos) foram associados a alguma chuva abaixo do limite de corte. Muitos fatores levam a este baixo resultado, entre os quais podemos citar: (a) tempo de duração de uma chuva típica, em torno de 1 000 a 10 000 anos, ocasionando a perda progressiva de seus laços parentais e, (b), perturbações sofridas pelos objetos, como encontros próximos com Marte e Terra, os quais acabam modificando sua órbita e dificultando a aplicação de critérios de dissimilaridades e técnicas de agrupamento.

Como o foco desse estudo está em separar ACO com alta probabilidade de estarem associados a algum enxame de meteoroides, a seguir vamos destacar somente os objetos com maiores chances de associação com chuvas e que se

enquadram como ACO.

Na tabela 3.4 listamos os resultados obtidos com nosso algoritmo, ordenado pelo valor de falso-positivo crescente. Na tabela o nome do objeto segundo o MPC-IAU é seguido do número sequencial spkid dado pelo JPL³.

A tabela separa cada objeto por grupo dinâmico (grupo), critério de Tisserand (T_J), magnitude absoluta (H), código da chuva associada (Chuva), numeração da chuva (IAU #), percentual do score final (% falso positivo), número de soluções atribuídas a cada chuva, por publicação (soluções) e indicação se a referida associação do corpo parental já esta listada no site do MDC (IAU MDC).

Como podemos observar obtivemos um total de 67 objetos associados a alguma chuva, correspondendo a 0.12% do total da amostra pesquisada de objetos. Destes 52 são do grupo APO, 11 AMO e 4 MCA.

Outro ponto importante diz respeito à seleção de objetos na lista, para evitar que se tornasse confusa e extensa, elencamos os ACO de cada chuva separado pela maior probabilidade. Assim, outros ACO não listados aparecem em nossas análises à seguir quando pertinente à análise, como é o caso do NEO 2002 GJ8 estudado na subseção 3.5.1, em conjunto com mais três ACO que não estão na tabela 3.4, mas se associam com scores abaixo de 20% a mesma chuva.

Tabela 3.4: Resultados obtidos utilizando a metodologia descrita na subseção 3.3 .

<i>Início da Tabela</i>									
Objeto ¹	grupo	T_J	H	Chuva	IAU#	% falso positivo	Soluções	#	IAU MDC
1. (2002 GJ8) 3120892	AMO	2.61	19.57	AMD	470	0.40	8		
2. (2022 JX) 54278256	APO	2.14	23.31	OCE	153	1.45	6		
3. (2008 GV) 3408130	AMO	2.89	23.2	POD	754	1.62	2		listado
4. (2008 EC69) 20484517	AMO	2.93	16.19	EUM	186	1.75	1		
5. (2013 JA36) 3638572	APO	2.29	21.2	PSI	1186	1.87	1		
6. (2020 BU13) 3989305	APO	2.44	21.27	SMV	750	2.15	1		
7. (2012 US68) 3613388	APO	2.44	18.33	SGM	610	2.38	2		
8. (2017 TC1) 3782059	APO	2.42	20.84	SFG	1211	2.66	2		
9. (2019 JZ6) 3841897	APO	2.45	21.2	AQI	1111	2.80	1		
10. (2018 SA1) 3830850	AMO	2.80	21.05	NDR	220	3.20	3		
11. (2023 RO) 54380568	MCA	2.98	21.08	NDR	220	3.52	3		

³<https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/>

<i>Continuação da Tabela</i>									
Objeto	grupo	T_j	H	Chuva	IAU#	% falso positivo	Soluções #	IAU	MDC
12. (2022 RX3) 54302657	APO	2.34	17.70	SCO	771	3.56	1		
13. (2011 LD19) 3567994	AMO	3.00	17.92	PPH	769	3.85	1		
14. (2011 YX62) 3591888	APO	2.58	22.98	ACZ	604	4.02	1		listado
15. (2009 WN25) 3478247	AMO	1.96	18.40	NED	753	4.26	1		listado
16. (2022 JX) 54278256	APO	2.14	23.31	SZC	165	4.28	2		
17. (2019 UJ12) 3888753	APO	2.55	22.48	JLL	644	4.60	2		
18. (2011 HG5) 3564132	MCA	2.77	17.86	ZDR	73	4.62	2		
19. (2020 FD2) 54016249	APO	2.34	25.70	MKA	128	5.04	6		
20. (2021 CM7) 54117581	APO	2.99	21.21	EVI	11	5.32	3		
21. (2019 GQ2) 3840812	APO	2.42	19.02	NZC	164	5.36	1		
22. (2011 BT59) 3557636	APO	2.54	20.83	AAL	448	5.49	1		
23. (2022 MD4) 54289649	APO	2.69	19.18	TSR	361	5.68	2		
24. (2014 JO25) 3670721	APO	3.05	18.03	SIA	3	5.74	5		
25. (2020 DD) 3991608	APO	2.52	23.56	ESL	1127	6.12	1		
26. (2015 GD) 3715404	MCA	2.79	17.6	AMD	470	6.16	2		
27. (2022 AU1) 54235529	APO	2.50	19.98	FFL	1125	6.20	1		
28. (2008 GV3) 3408588	APO	2.49	18.45	AUM	385	6.35	1		
29. (2018 XQ3) 3836885	AMO	2.65	22.7	PUV	255	6.50	1		
30. (2010 JG87) 3522125	APO	2.33	19.2	NCQ	1085	6.52	3		
31. (2010 MU111) 3536126	APO	2.98	18.41	SND	1038	7.53	1		listado
32. (2001 ME1) 20139359	APO	2.67	16.53	JXS	861	7.62	2		listado
33. (2017 MM7) 3776128	APO	2.84	21.11	NCQ	1085	8.65	3		
34. (2002 PD43) 20399457	APO	2.44	19.30	SSA	237	8.83	2		
35. (2013 JA36) 3638572	APO	2.29	21.20	JLC	921	9.28	2		
36. (2015 KR154) 3720545	AMO	2.90	21.7	JBO	170	9.37	3		
37. (2015 CG13) 3710215	APO	2.62	24.10	USG	809	9.63	3		
38. (2017 SR17) 3781910	APO	2.62	18.80	FFA	538	9.68	1		
39. (2016 BY14) 3740927	APO	2.51	23.90	SOP	150	9.69	1		
40. (2022 DQ) 54248185	APO	2.50	26.07	NSE	1060	10.03	1		
41. (2017 AF5) 3766364	APO	2.50	17.78	KVI	509	10.10	1		
42. (2008 HW1) 20465402	APO	2.40	17.38	EPS	660	10.29	1		
43. (2022 UU14) 54321815	APO	2.83	24.49	NTA	17	10.44	5		
44. (2019 QK4) 3843641	APO	2.64	20.70	SMA	156	10.66	1		
45. (2018 LF5) 3825227	AMO	2.73	20.20	FTD	1041	10.84	1		listado
46. (2002 TW55) 20196068	APO	2.94	18.13	ZAN	778	11.21	1		
47. (2017 MM7) 3776128	APO	2.84	21.11	NDA	26	11.37	4		
48. (2017 MM7) 3776128	APO	2.84	21.11	TPI*	508	11.50	3		
49. (2018 BT6) 3798985	APO	3.05	21.30	SSS	168	12.09	1		listado
50. (2003 BL) 3147318	MCA	2.54	16.51	VEL	93	12.87	1		

<i>Continuação da Tabela</i>										
Objeto	grupo	T_j	H	Chuva	IAU#	% falso positivo	Soluções #	IAU	MDC	
51. (2018 SA1) 3830850	AMO	2.80	21.50	NDR	220	12.99	3			
52. (2015 KK) 3719244	APO	2.87	25.10	OER	338	13.11	2			listado
53. (2005 UN157) 20504033	APO	2.58	18.26	GSE	772	13.35	1			
54. (2004 HA1) 3180146	APO	2.87	21.70	ABO	138	14.58	1			
55. (2017 MM7) 3776128	APO	2.84	21.11	AIC	505	16.75	1			
56. (1998 QS52) 20016960	APO	3.00	14.42	NOA	25	17.23	2			
57. (1999 LT1) 3019646	AMO	2.59	17.83	MED	1037	17.40	1			listado
58. (2020 DD) 3991608	APO	2.52	23.56	EVI	11	17.43	4			
59. (2009 HE21) 3457844	APO	2.87	24.50	DLI	47	17.81	1			
60. (2023 HV4) 54356837	APO	2.96	24.71	SCA	179	17.92	1			
61. (2016 TA) 3760061	APO	2.79	26.30	ZPE	172	18.02	2			
62. (2017 MM7) 3776128	APO	2.84	21.11	SCQ	1086	18.04	1			
63. (2022 HR4) 54277095	APO	3.00	24.36	NIA	33	18.24	4			
64. (2020 FO5) 54016377	APO	2.31	20.55	OAV	651	18.37	1			
65. (2013 UP8) 20507716	APO	2.79	16.39	FFD	1039	18.64	1			listado
66. (2016 TA) 3760061	APO	2.79	26.3	NPS	627	19.47	1			
67. (2023 CF) 54340713	APO	2.94	24.96	XLI	140	19.51	1			

Fim da Tabela

Notas:

¹ Após a nomenclatura do NEO segue-se sua numeração spkid.

* Chuva retirada após a revisão de Novembro de 2023 (seção 3.5.2 para maiores detalhes), por ser considerada uma duplicata da chuva NDA.

As propriedades físicas dos ACO listados foram pesquisadas nos bancos de dados de <https://neo.ssa.esa.int/advanced-search>, https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#, M4AST tool, <http://smass.mit.edu/smass.html> e em diversas referências no astrophysics data system (ADS Harvard). Infelizmente foram encontrados poucos dados.

Para os objetos 2014 JO25, 2017 AF5 e 2018 BT6 foram determinados os períodos rotacionais de 4.53 h, 49.68 h e 16.89 h, respectivamente. O objeto 1998 QS52 tem classificação taxonômica tipo Sq, <http://smass.mit.edu/smass.html> (Bus and Binzel, 2002a) e 2010 MU111 apresenta albedo geométrico de 0.015 e diâmetro aproximado de 1.947 km. Os demais ACO listados na tabela não apresentam nenhuma caracterização física referenciada, até a data deste trabalho.

Nas próxima seção vamos analisar e discutir os principais resultados, primeiro

mostrando o panorama geral dos objetos desta lista, destacaremos a conexão de cada ACO elencado com a distribuição de meteoros ligados à chuva e por fim as associações que se destacam pela possibilidade de aprofundamento de suas ligações, como partes de complexos e propriedades físicas disponíveis.

3.5 Discussão dos resultados obtidos

No gráfico da figura 3.2 estão representados todos os ACOs da lista da tabela 3.4, com círculos normalizados⁴ proporcionalmente a inclinação de cada um, mostrando a distribuição em a - e , com linhas sólidas de T_J e q .

A análise do gráfico acima, mostra plots de ACO entre $2 \leq T_J \leq 3.05$, com diversidade de inclinações e uma discreta tendência de aumento de objetos quando a excentricidade aumenta e a inclinação diminui. As altas inclinações não tem excentricidades elevadas e na região de maiores excentricidades não há grandes inclinações, o que pode representar a separação de duas populações diversas, ensejando futuras investigações mais detalhadas.

Uma falha de objetos entre $0.7 \lesssim e \lesssim 0.8$ pode ser notada. Verifica-se, também, maior agrupamento em $q \leq 0.50$ U.A. versus $2 \leq a \leq 3$ U.A.. Nota-se maior concentração de ACO em e entre 1 e 0.8, na zona entre $2 \leq T_J \leq 3.05$, diminuindo bastante, à medida que as inclinações aumentam.

Os objetos abaixo da curva de NEOS ($q > 1.30$ U.A.) são quatro MCA e os objetos 2023 RO, 2011 HG5, 2015 GD e 2003 BL com $T_J = 2.98, 2.77, 2.79, 2.54$, respectivamente. Visualmente apenas dois estão visíveis por causa das proximidades de valores de a , os plots acabam se sobrepondo.

À seguir análise das associações mais relevantes para este estudo, que podem constituir complexos asteroides-meteoroides.

⁴A normalização foi feita usando a seguinte fórmula genérica:

$$peso = \frac{a - a_{min}}{a_{max} - a_{min}}$$

$$norm = i * peso + \text{fator de escala}$$

onde a é o semi-eixo maior, i é o valor de inclinação de cada ACO e o fator de escala determinado para garantir a visibilidade dos círculos plotados.

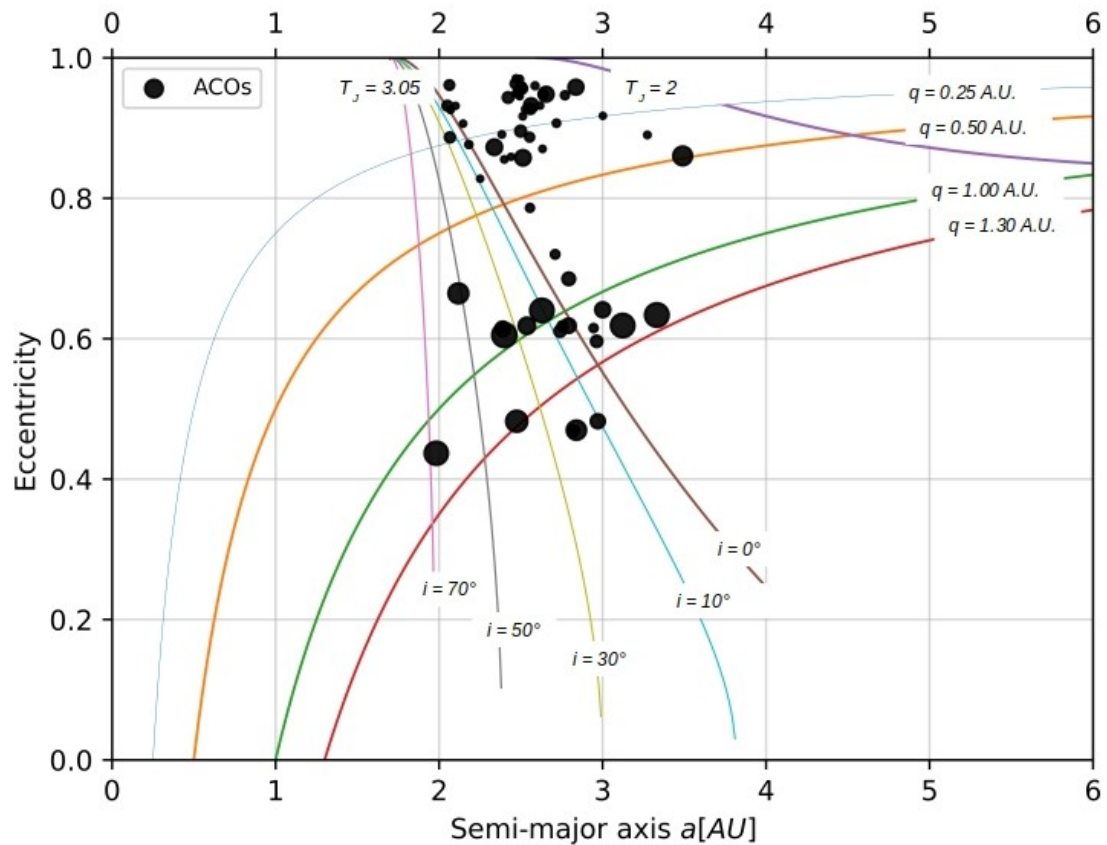


Figura 3.2: Distribuição de corpos parentais tipo ACO (círculos pretos) da tabela 3.4, no espaço de semi-eixo maior versus a excentricidade, e linhas com $T_J = 2.00$ ($i = 0^\circ$) e $T_J = 3.05$ ($i = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ e 70°). As quatro curvas que representam as distâncias periélicas $q=0.25, 0.5, 1$ e 1.3 U.A., tem as cores azul claro, laranja, verde e vermelha. O tamanho dos círculos indica a inclinação do objeto, com tamanho maior para maiores inclinações.

3.5.1 Associação: chuva August mu-Draconids (#470, AMD) e o NEA ACO (2002 GJ8)

Como primeiro item da listagem em 3.4, encontramos alta possibilidade da chuva August mu-Draconids (#470, AMD) estar associada ao ACO (2002 GJ8) com apenas 0.40% de chances de ser falso positivo. Outros objetos com valores destas probabilidade maiores associados à chuva AMD, estão relacionados na tabela 3.5, com 2008 ED69, 2020 HU6 e 2015 GD.

Tabela 3.5: Chuva #470 AMD e suas probabilidades de associação

Probabilidades de Associação		
NEO	n ^o sequencial (spkid)	Falsos-positivos%
2002 GJ8	<u>3120892*</u>	0.40, 0.62, 4.2
(361861) 2008 ED69	20361861	1.08
2020 HU6	54016767	1.90
2015 GD	3715404*	6.16, 14.38

* A chuva #470 AMD apresenta até 3 soluções de órbitas, por isso a possibilidade de mais valores de falsos-positivos.

Notadamente, o algoritmo recuperou também a conexão entre o ACO 2008 ED69 ($T_j = 2.60$) e a chuva AMD, hipótese já aventada por Jenniskens and Vaubaillon (2008); Jenniskens et al. (2016) e ao estudar um grupo de riantes em torno da chuvas Kappa Cygnids (#12, KCG). Importante ressaltar que num trabalho de revisão de chuvas menores Jenniskens et al. (2016) identificaram também outros pequenos enxames como, August Draconids (#197, AUD) e i-Draconids (#703, IOD) que podem estar interrelacionados com AMD. Estas teriam sido originadas pela disrupção de um objeto maior, sendo também 2008 ED69 parte desses fragmentos.

Tabela 3.6: Parâmetros médios das coordenadas equatoriais geocêntricas e seus respectivos elementos orbitais das chuvas AMD, KCG,AUD e IOD (J.2000).

	sol ^o	ra ^o	de ^o	vg(km/s)	a(UA)	q(UA)	e	peri ^o	node ^o	incl ^o
AMD	149.00	256.40	62.50	21.30	2.87	1.01	0.65	175.50	149.50	33.80
KCG	142.37	283.26	53.65	22.77	3.19	0.98	0.69	199.03	142.03	34.83
AUD	144.63	272.08	61.91	19.80	2.45	1.01	0.55	186.30	144.50	32.33
IOD	157.00	232.30	53.30	17.80	2.93	0.99	0.66	161.50	157.20	26.10

Na figura 3.3 plotamos a distribuição de meteoros por cada chuva, e onde verifica-se que AUD, KCG e IOD se misturam, na faixa de longitude solar que vai

de 120° a 160° . Seus picos de máxima atividade estão bem próximos, indo de 142° a 149° , como dado na tabela 3.6. Na figura 3.4 é possível notar a dispersão de meteoros por faixa de longitude solar entre $120^\circ - 160^\circ$, e a posição de cada radiante das quatro chuvas, se alinhando ao longo da longitude de periélio (π).

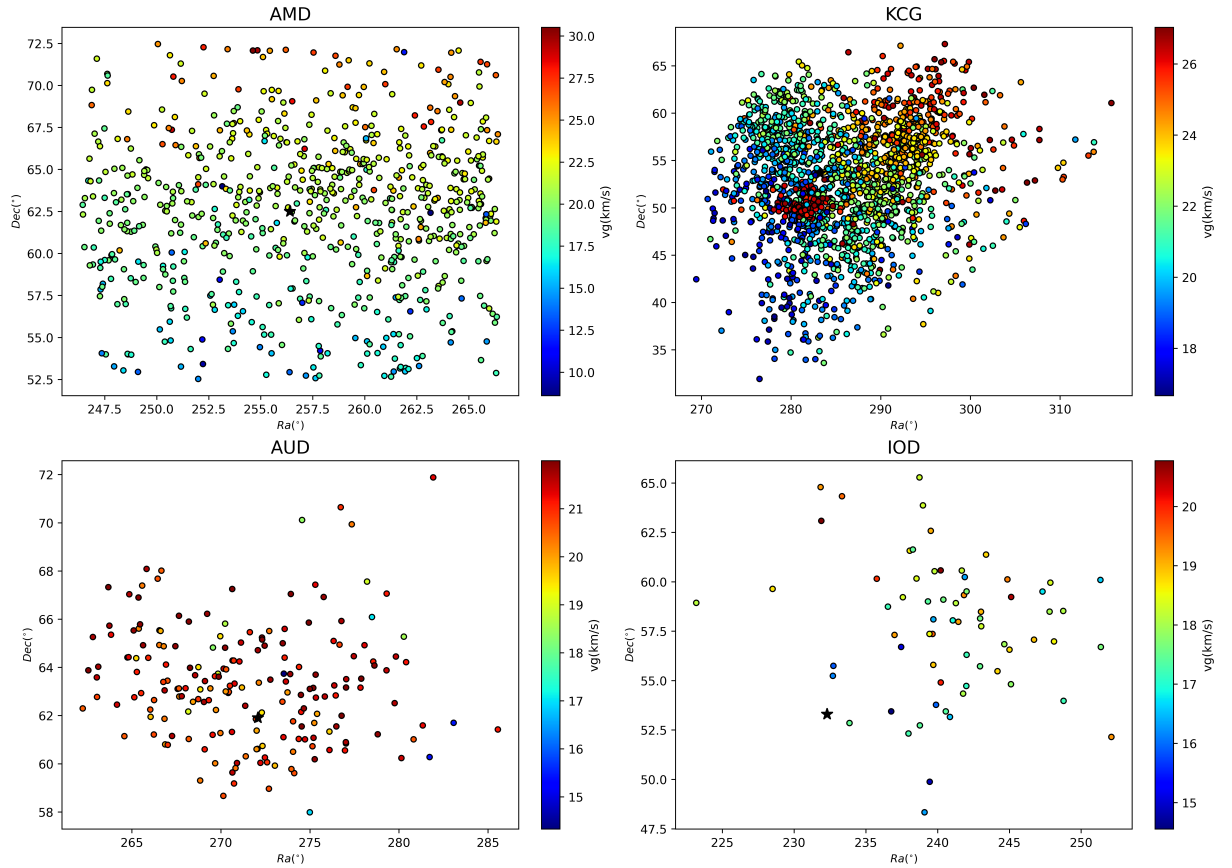


Figura 3.3: Distribuição de órbitas de meteoros por faixa de λ_\odot : (a) August mu-Draconids $\lambda_\odot = 145^\circ - 158^\circ$, (b) Kappa Cygnids período $\lambda_\odot = 120^\circ - 160^\circ$, (c) August Draconids período $\lambda_\odot = 125.27^\circ - 169.82^\circ$, (d) December alpha-Draconids período $\lambda_\odot = 154^\circ - 162^\circ$. A variação de cores representa a velocidade geocêntrica do meteoro.

A nossa investigação de meteoros associados, usando o método de Guennoun et al. (2019), não encontrou nenhuma conexão com 2002 GJ8, 2015 GD e 2008 ED69, porém foram encontrados 30 meteoros (vide a tabela 3.7) com $PCO = 37.3\%$ ligados ao ACO 2020 HU6 e plotados na figura 3.5. Levando-se em conta os critérios adotados, conforme dados na seção 3.3.2, este percentual representa uma baixa probabilidade de conexões das órbitas de meteoros estarem ligadas ao ACO por mera chance de ocorrência, portanto estes resultados reforçam a possível

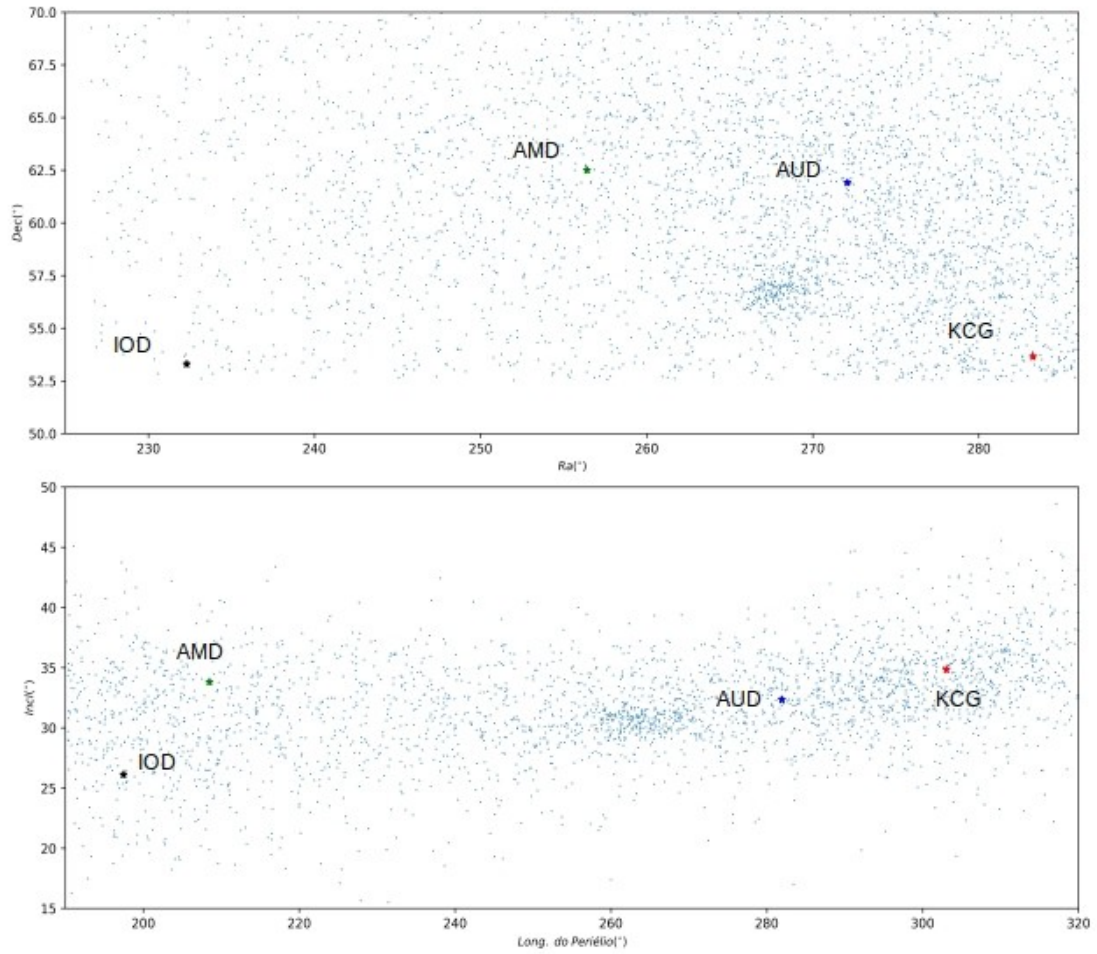


Figura 3.4: Contra um fundo de meteoros na faixa de λ_{\odot} entre 120° - 160° , plotamos na figura superior, posição dos radiantes, por ra-dec, e na figura inferior, diagrama π -i. Cada simbolo marca a posição de IOD, AMD, AUD e KCG.

ligação de 2020 HU6 com a chuva AMD.

Tabela 3.7: Sumário de parâmetros de radiante e órbita (J.200) de 30 meteoros conexos a 2020 HU6.

ACO (2020 HU6)													
Shower	Dcrit	(timeUT)	sol(°)	ra(°)	de(°)	q(UA)	a(UA)	incl(°)	e	peri(°)	node(°)	vg(km/s)	jd
KCG	0.015	2010-08-25 12:52:14	152.077	255.790	63.913	1.009	3.163	35.471	0.681	174.810	152.077	22.414	2 455 434.036 000
AMD	0.023	2016-08-25 23:02:37	152.924	259.733	64.081	1.009	3.140	34.005	0.679	174.253	152.924	21.659	2 457 626.460 000
KCG	0.024	2012-08-26 15:17:28	153.609	254.475	63.739	1.008	3.242	35.428	0.689	173.998	153.609	22.468	2 456 166.137 000
AMD	0.032	2016-08-24 19:04:50	151.800	258.448	63.638	1.009	2.957	35.099	0.659	174.325	151.800	22.064	2 457 625.295 000
AMD	0.038	2011-08-25 19:01:57	152.075	255.489	61.446	1.008	3.139	33.351	0.679	173.458	152.075	21.337	2 455 799.293 000
AMD	0.042	2012-08-21 18:53:29	148.932	257.803	62.010	1.010	3.178	34.382	0.682	175.422	148.932	21.849	2 456 161.287 000
AMD	0.044	2016-08-25 22:25:59	152.779	257.404	63.701	1.008	2.882	34.361	0.650	173.169	152.779	21.644	2 457 626.310 000
AMD	0.049	2011-08-27 19:49:55	154.038	259.346	63.369	1.008	2.827	34.553	0.643	174.191	154.038	21.677	2 455 801.326 000
KCG	0.050	2020-08-26 15:33:12	153.572	257.538	61.655	1.010	2.994	33.448	0.663	176.837	153.572	21.226	2 459 088.148 000
KCG	0.054	2013-08-26 16:30:04	153.406	257.449	63.845	1.009	2.777	34.740	0.637	175.646	153.406	21.705	2 456 531.188 000
AMD	0.054	NaN	150.229	257.017	64.388	1.008	3.138	35.465	0.679	172.704	150.229	22.423	2 454 336.350 000
spo	0.056	2014-08-20 13:14:32	147.249	258.514	63.578	1.011	3.380	35.679	0.701	177.075	147.249	22.627	2 456 890.052 000
AMD	0.057	2016-08-28 21:14:19	155.749	258.346	63.857	1.007	2.885	34.080	0.651	173.049	155.749	21.514	2 457 629.385 000
KCG	0.058	2013-08-25 14:28:58	152.360	260.309	63.218	1.010	2.775	34.515	0.636	177.834	152.360	21.561	2 456 530.103 000
AMD	0.059	2016-08-24 21:44:22	151.907	258.548	64.564	1.008	2.757	34.197	0.634	173.313	151.907	21.437	2 457 625.406 000
AMD	0.060	2008-08-24 21:50:04	151.962	254.926	63.714	1.006	3.058	33.641	0.671	171.099	151.962	21.471	2 454 703.410 000
AMD	0.065	2015-08-29 20:42:39	155.980	253.970	63.662	1.004	2.861	33.733	0.649	170.381	155.980	21.380	2 457 264.363 000
AMD	0.074	2016-08-27 19:59:19	154.732	257.359	63.075	1.007	4.013	35.886	0.749	173.411	154.732	23.162	2 457 628.333 000
AMD	0.075	2016-08-30 02:31:37	156.929	254.894	63.277	1.006	3.474	32.342	0.710	172.568	156.928	21.092	2 457 630.605 000
spo	0.075	2012-08-28 19:01:10	155.690	254.024	63.959	1.007	2.681	34.389	0.624	173.293	155.690	21.472	2 456 168.292 000
AMD	0.078	2016-08-28 20:08:24	155.705	257.870	63.691	1.007	2.650	34.373	0.620	172.658	155.704	21.440	2 457 629.339 000
AMD	0.083	2012-08-28 20:51:24	155.764	257.743	64.256	1.006	2.618	33.900	0.616	172.255	155.764	21.176	2 456 168.369 000
AMD	0.085	2015-08-31 19:27:57	157.863	258.649	62.599	1.007	2.812	34.214	0.642	173.884	157.863	21.512	2 457 266.311 000
spo	0.087	NaN	151.598	256.266	64.268	1.008	2.566	34.659	0.607	172.509	151.598	21.485	2 455 068.281 000
AMD	0.088	2010-08-28 23:48:40	155.412	253.642	62.255	1.005	4.091	33.106	0.754	171.042	155.412	21.851	2 455 437.492 000
spo	0.095	2010-08-29 15:11:52	156.032	257.861	63.807	1.009	2.594	34.337	0.611	175.651	156.031	21.317	2 455 438.133 000
spo	0.105	2021-08-31 18:34:49	158.274	254.959	63.642	1.007	2.616	34.139	0.615	173.654	158.273	21.275	2 459 458.274 000
spo	0.124	2019-09-01 19:22:28	158.803	259.626	62.223	1.009	2.746	33.688	0.633	177.225	158.803	21.131	2 458 728.307 000
spo	0.125	2013-08-17 20:06:26	144.883	256.959	64.926	1.009	3.492	36.254	0.711	173.202	144.883	23.044	2 456 522.338 000
spo	0.127	2016-08-31 15:58:41	158.438	257.499	64.486	1.008	2.475	34.582	0.593	174.936	158.438	21.321	2 457 632.166 000

Da relação de meteoros classificados como AMD, o maior valor D_{SH} foi 0.088 e o menor valor 0.023, 6 meteoros apresentam $D_{SH} \leq 0.05$ e 9 entre 0.05 a 0.10, indicando associações altamente possíveis.

Associado à KCG, 3 meteoros apresentam $D_{SH} \leq 0.05$, quer dizer uma possibilidade muito alta de ligação, e 2 meteoros com alta probabilidade ($D_{SH} < 0.1$).

Na tabela 3.8 apresentamos um quadro comparativo de elementos orbitais com os dados do radiante da chuva AMD #470 e os riantes sintéticos dos três objetos potencialmente associados, conforme nossa metodologia e também o NEA 2008 ED69. O radiante sintético de 2002 GJ8 obteve as menores alterações de parâmetros orbitais comparados com sua órbita atual, pelo método Q de Neslusan e o menor D_{SH} , entre os outros objetos, e igual a 0.019.

Como os resultados de *Match* apontam maior probabilidade do ACO 2002 GJ8 estar ligado parenteralmente à chuva AMD #407, como também os outros NEO elencados acima, abre-se então a possibilidade destes asteroides serem oriundas

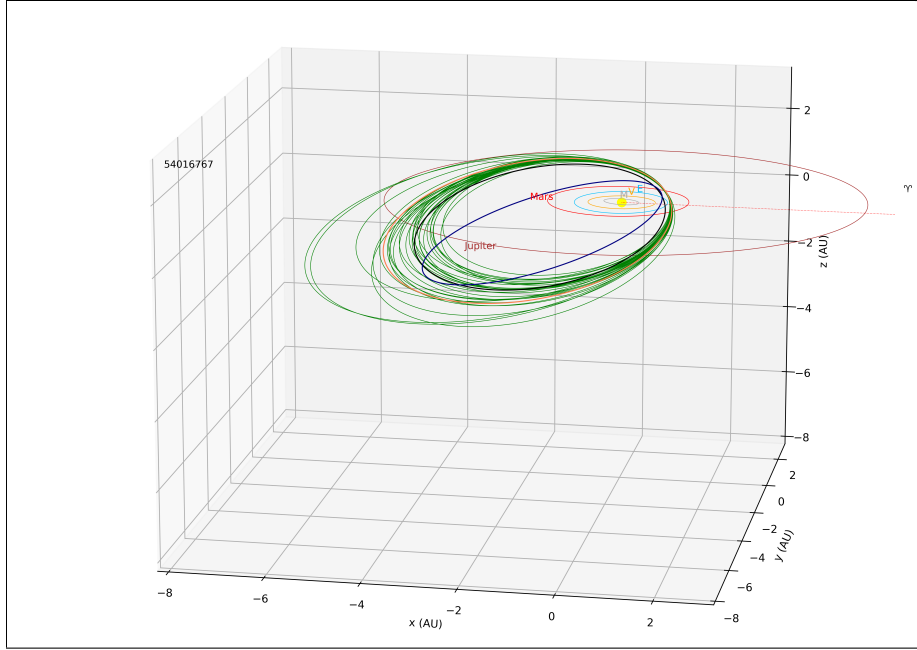


Figura 3.5: Diagrama das órbitas de meteoros conexos ao ACO 2020 HU6. Em azul escuro a órbita média de 2020 HU6, as órbitas verdes representam os 30 meteoros e as cores preta e laranja representam as órbitas dos riantes sintéticos, J2000xJ2000.

Tabela 3.8: Quadro comparativo de elementos orbitais (J2000) dos ACO relativos ao radiante da chuva AMD #470 e riantes sintéticos.

Dados da Chuva AMD #470											
Nome	$\langle a \rangle$ [U.A]	$\langle q \rangle$ [U.A]	$\langle e \rangle$	$\langle peri \rangle$ [°]	$\langle node \rangle$ [°]	$\langle incl \rangle$ [°]	$\langle Vg \rangle$ [km/seg]	$\langle Ra \rangle$ [°]	$\langle De \rangle$ [°]	$\langle L_{\odot} \rangle$ [°]	Solutions #
August mu-Draconids ¹	2.870	1.009	0.648	175.500	149.500	33.800	21.3	256.4	62.5	149.0	3
Dados do Radiante Sintético											
Nome	a [°]	q [U.A]	e	peri [°]	node [°]	incl [°]	Vg [km/seg]	Ra [°]	De [°]	L_{\odot} [°]	
(2002 GJ8) 3120892	n.a	1.0104	0.6817	174.5	144.8	30.1	19.70	249.0	58.9	144.80	
(2008 ED69) 20361861	n.a.	1.0084	0.7400	173.3	149.50	36.4	23.32	252.9	64.2	149.5	
(2020 HU6) 54016767	n.a.	1.0099	0.6852	176.0	151.5	34.9	22.12	256.8	63.0	151.5	
(2015 GD) 3715404	n.a	1.0123	0.5618	176.3	140.70	31.9	19.67	255.7	63.5	140.7	
Elementos orbitais do ACO²											
Nome	a [°]	q [U.A]	e	peri [°]	node [°]	incl [°]					
(2002 GJ8) 3120892	3.23	1.029	0.68	174.51	144.83	30.13					
(2008 ED69) 20361861	2.911	0.759	0.739	173.29	149.51	36.35					
(2020 HU6) 54016767	2.79	0.88	0.685	175.96	151.50	34.87					
(2015 GD) 3715404	3.026	1.32	0.56	176.29	140.74	31.90					

Notas:

1 - Parâmetros retirados de Rudawska and Jenniskens (2014)

2 - consulta do banco de dados de JPL HORIZONS

https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html

de disrupção, criando um complexo de pequenas chuvas, onde a principal seria a antiga Kappa Cygnids (#12), conforme discutiremos a seguir.

Outro ponto importante a ressaltar refere-se ao ACO 2015 GD, classificado

dinamicamente como um MCA, e de cuja atividade foi investigada por Martino et al. (2019) não apresentando qualquer tipo de atividade cometária observável.

Consequentemente, para verificar se em algum momento de sua vida este objeto pode ter pertencido à classe de NEO, efetuamos integrações numéricas⁵ retroagindo 5 500 anos, estas integrações numéricas (usadas em todas as análises desta seção 3.5) aplicam o integrador REBOUND IAS-15 que usa o método Runge-Kutta 15^a ordem, com passos adaptativos envolvendo forças conservativas e não consideramos outros efeitos como pressão de radiação, relativísticos, etc.

Constatamos que por mais de 90% deste período o objeto pertenceu às classes Amor e Apolo. Em outra integração usamos 100 clones distribuídos igualmente no parâmetro anomalia verdadeira (f), confirmando a variação secular de q entre 1.4 a ~ 0.8 U.A..

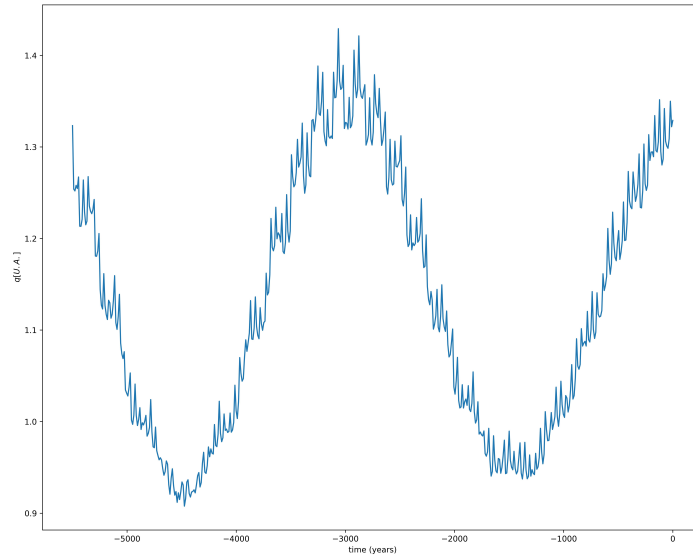
Na figura 3.6 mostramos os resultados que demonstram a permanência dele como um NEO, durante a maior parte do período integrado. Portanto, não descartamos este ACO de nossa investigação, em virtude dele pertencer a maior parte de seus últimos 5 500 anos entre os NEO.

Procedendo à integração numérica dos quatro objetos a partir de 01.12.2023 00:00:00 UT, para verificar similaridades em suas evoluções orbitais ao longo de uma linha de tempo de 6 000 anos, calculado pelo maior período orbital, multiplicado por 1 000 anos, verificamos que os 3 ACO seguem proximamente as variações seculares de q , i e a , com exceção de 2002 GJ8 que sofre perturbações gravitacionais por encontros próximos com Júpiter. Na figura 3.7 a-d, são apresentados graficamente estes resultados.

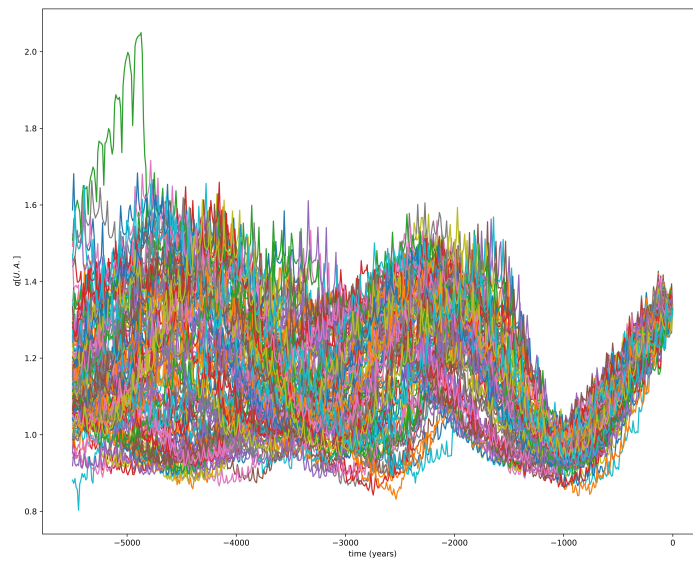
O semi-eixo maior mostrou-se mais estável para os ACO 2015 GD, 2008 ED69 e 2020 HU6, à exceção de 2002 GJ8 que sofreu grandes variações no período aproximado de -5 000 anos até pouco antes de -1 000 anos, figura 3.7a, o periélio, vide figura 3.7b, também sofre grandes variações, no mesmo período das variações de a . Ao longo da integração todos os ACO tiveram variações em suas inclinações, à exceção de 2002 GJ8 que durante o período entre - 5 000 a pouco antes -1 000 anos manteve-se estável.

Babadzhanov et al. (2017) ao investigar a relação parental entre o cometa

⁵O pacote de integração usado é o REBOUND, distribuição em PYTHON, mais detalhes sobre sua aplicação são fornecidos no Capítulo 4, onde estudamos o caso de um bólido rasante tipo ACO.

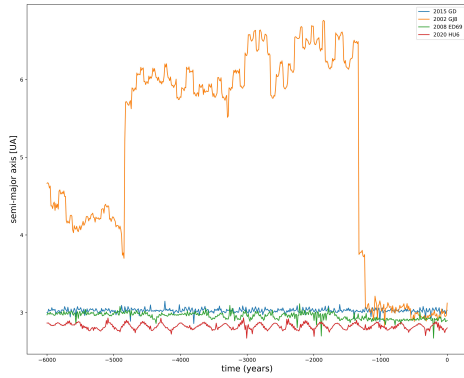


(a) Periélio

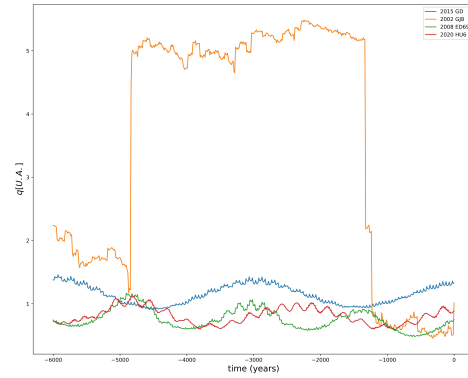


(b) Semi-eixo

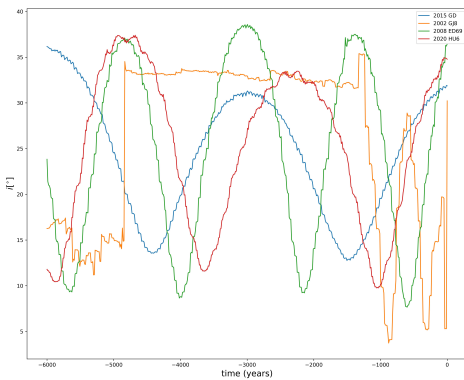
Figura 3.6: Evolução dos elementos orbitais de 2015 GD. (a) Periélio, (b) Curva de Semi-eixo maior, com 100 clones.



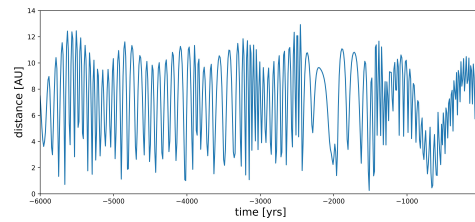
(a) Variação de semi-eixo maior



(b) Periélio



(c) Inclinação



(d) Encontros próximos de 2002 GJ8 com Júpiter

Figura 3.7: As quatro figuras de a-d acima representam as variações seculares do periélio, (a) semi-eixo maior, (b) periélio e (c) inclinação de 2015 GD, 2008 ED69, 2020 HU6 e 2002 GJ8. Na figura (d) mostramos os resultados das integrações para trás no tempo de 2002 GJ8, com encontros próximos com Júpiter.

96P/Machholz 1 e o NEO (196256) 2003 EH1, usando critérios de dissimilaridades, determinou a possível conexão destes dois objetos a uma possível ruptura de um cometa original, ligados ao enxames de meteoróides conhecidos como Quadrantids.

Seguindo esta mesma linha de raciocínio, aplicando o critério D_{sh} na combinação de todos os ACO estudados nesta seção podemos verificamos que em torno de 5 000 anos atrás este critério atinge um valor mínimo para associação parental entre 2008 ED69, 2020 HU6 e 2015 GD, o que pode indicar a ocorrência da fragmentação de um cometa parental, estes resultados podem ser visualizados na figura 3.8.

No que se refere ao ACO 2002 GJ8 fica evidente que as perturbações causadas por encontros próximos com Júpiter acabaram por alterar sua dinâmica orbital dificultando uma conclusão mais clara quanto à sua associação genética com os demais asteroides.

As possíveis ligações de similaridades orbitais de 2002 GJ8 com 2015 GD, 2008 ED69 e 2020 HU6 (representadas no gráfico da figura 3.8 na cor azul, vermelha e lilás, respectivamente) divergem acima do valor de *threshold* > 1.0, antes de 5 000 anos atrás. Mas, a exceção da associação com 2015 GD (linha azul), os demais convergem abaixo de 0.05 um pouco antes de 1 000 anos atrás.

Entretanto, ponto fundamental da análise do comportamento do critério D_{sh} para a combinação de pares dos ACOs refere-se de fato de que pouco antes de 5 000 anos atrás, os pares 2008 ED69 - 2020 HU6, 2015 GD - 2020 HU6 e 2015 GD - 2008 ED69 apresentam valores abaixo de 0.05, o que pode ser considerado como uma estimativa altamente provável (vide a tabela 2.3) de uma origem comum.

As estimativas de tamanho retirada do banco de dados de <https://neo.ssa.esa.int/search-for-asteroids?tab=physprops&des=>, em dez de 2023, mostram: 2002 GJ8 (H = 19.45) entre 300 a 800 m, 2008 ED69 (H = 16.94) entre 1 100 a 2 400 m, 2015 GD (H = 17.55) entre 800 a 1800 m e 2020 HU6 (H = 19.34) entre 400 a 800 m.

Levando-se em conta as faixas de tamanho, os asteroides 2002 GJ8 e 2015 GD poderiam fornecer massa suficiente para formar corrente de meteoroides numa chuva. A estimativa de tamanho de 2020 HU6 já o descarta como uma possível fonte de chuvas, mas conforme os estudos apresentados aqui, a associação com 30 meteoros e variações de critério de dissimilaridade, com 2008 ED69, 2002 GJ8 e 2015 GD, fortalecem a idéia de que este objeto possa fazer parte de um conjunto

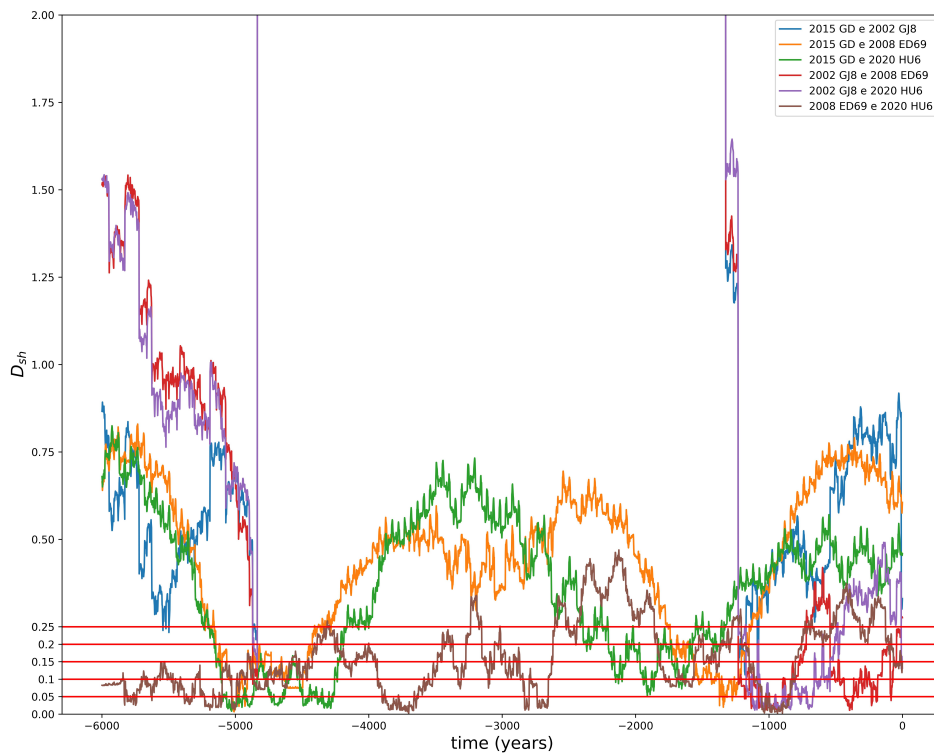


Figura 3.8: Aplicação do critério D_{sh} nas órbitas de 2015 GD, 2002 GJ8, 2008 ED69 e 2020 HU6. Nota-se uma região de convergência de valores abaixo de 0.20 para todos os pares combinados, pouco antes de 5 000 anos atrás. As combinações parentais 2008 ED69 - 2020 HU6, 2015 GD - 2020 HU6 e 2015 GD - 2008 ED69 mostram valores abaixo de 0.05 em torno de 5 000 anos atrás. As cores das linhas representam cada par combinado, descritos na legenda da figura, acima à direita.

oriundo da fragmentação de um corpo maior.

Assim, se pensarmos nas associações parentais de 2002 GJ8, 2015 GD, 2020 HU6 e 2008 ED69 com o sistema de chuvas que compõe KCG: AUD, IOD e AMD, pode indicar a existência de um complexo asteroide-meteoroides : o Kappa Cygnids, que detalharemos adiante.

Um complexo Kappa Cygnids - meteoroides:

A chuva Kappa Cygnids (#12, KCG) foi inicialmente identificada em 1874 (Denning, 1877) sendo atualmante considerada composta de vários filamentos e que vem sendo confirmado ao longo de vários trabalhos (Jenniskens and Vaubaillon, 2008; Rudawska and Jenniskens, 2014; Jenniskens et al., 2016; Sergienko et al., 2020).

Embora atualmente esta chuva seja fraca, com características de um enxame antigo, agora disperso ao longo do Nodo, ela apresenta um pico em $\Omega \approx 145^\circ$, espalhando-se em torno de 22° , com uma inclinação variando de 28° a 38° . Isto pode representar sua antiga ligação parental com um corpo cometário grande (Jenniskens and Vaubaillon, 2008). Em 1993 ocorreu um pico, havendo vários registros de aumento de atividade localizada em 2002-2004 e 2007 (Jenniskens and Vaubaillon, 2008), o que pode indicar a existência de um progenitor próximo às órbitas dos meteoróides.

A possibilidade de existir um complexo de meteoroides envolvendo esta chuva foi amplamente discutida no estudo de Jones et al. (2006) que relacionou dois NEA tipo Apolo: como possíveis corpos progenitores, 2001 MG1 e 2004 LA12, este último um ACO ($T_j \approx 2.78$) através de estudos de dinâmica e aplicações de critérios de dissimilaridades, mas sem qualquer confirmação em trabalhos posteriores.

Sergienko et al. (2020) discutem a ligação parental de 2008 ED69, que possui $H = 16.94$ e seu nodo está próximo da órbita de Júpiter. Isto faz com que seu periélio, longitude do periélio e seus nodos movam-se em relação à linha de apsides num período de 1 800 anos, possibilitando que em alguns séculos seu q atinja 0.97 U.A e seus elementos orbitais muito parecidos com KCG, conforme os resultados de integração numérica de Jenniskens and Vaubaillon (2008).

Além do mais, os objetos coletados pelo "Match", apresentam órbitas bem similares à chuva AMD, que compõe um dos filamentos de KCG, que pode estar ligada também August Draconids (#197, AUD) e i-Draconids (#703, IOD). Isso

nos leva a concluir de fato possa haver um complexo envolvendo meteoróides.

Os ACOs 2008 ED69, 2020 HU6, 2002 GJ8 e 2015 GD podem ser partes de um corpo cometário maior que se fragmentou, há cerca de 5 000 anos atrás, criando vários filamentos ao longo dos séculos. Existe também a possibilidade de alguns deles apresentar atividades esporádicas, resultando nos picos recentes registrados. Abaixo mostramos um diagrama que resume as conexões sugeridas aqui.

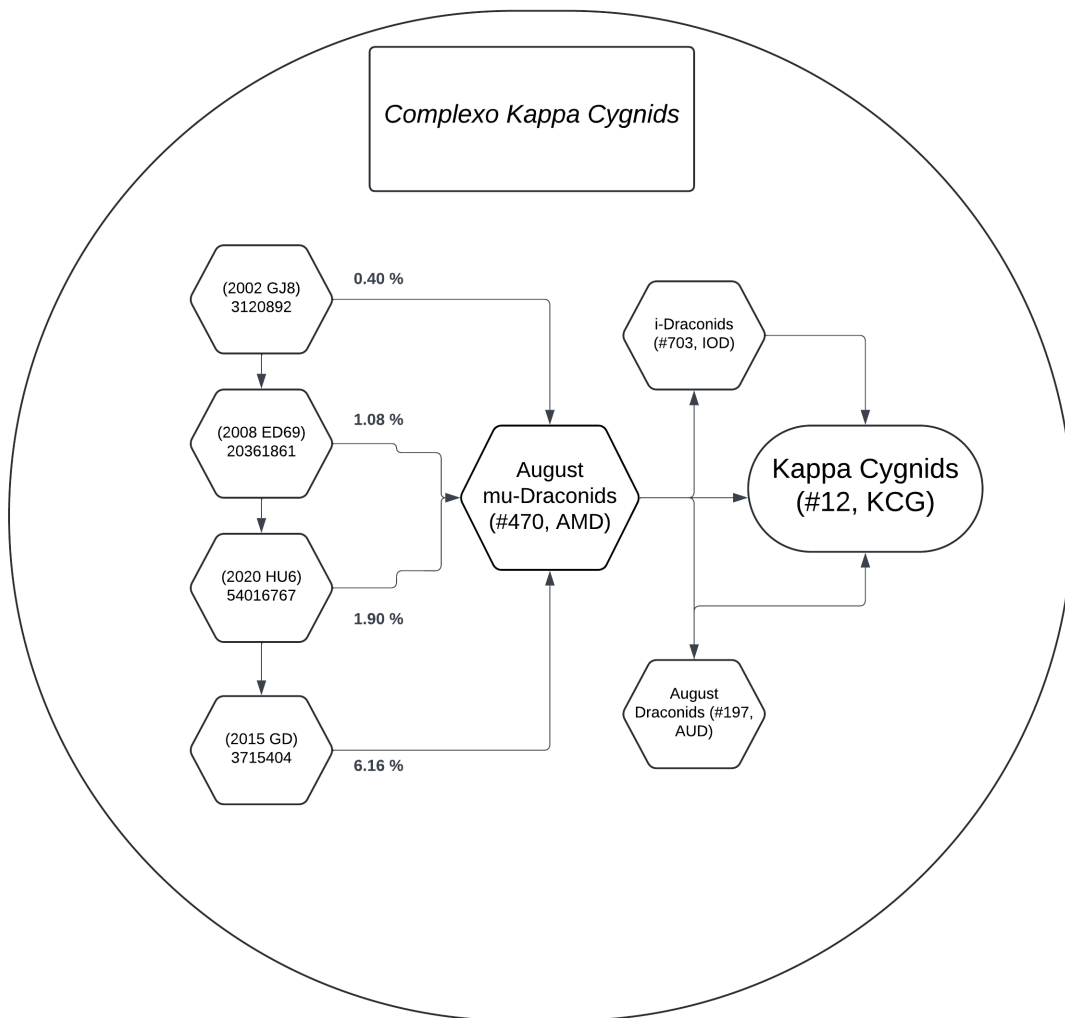


Figura 3.9: Diagrama do esquemático do complexo Kappa Gygnids, contendo os ACO propostos e as chuvas associadas, com os valores de *Match* de cada NEA.

3.5.2 Associação do ACO 2017 MM7 com o complexo Quadrantids (#010 QUA) - NEO (196256) 2003 EH1

Na figura 2.1, foi apresentado o diagrama da órbita de (196256) 2003 EH1 associado às órbitas de meteoros da chuva #10 Quadrantids. Este NEO tem um tamanho de aproximadamente 4 km, descoberto em 6 de Março de 2003, do tipo Amor e até a data de Dez/2023 engloba 113 observações com um arco orbital de 6 103 dias.

Embora sua conexão com a chuva Quadrantids (#10 QUA) (Jenniskens and Marsden, 2003; Williams et al., 2004; Babadzhanov et al., 2017) seja bem conhecida, ainda está em discussão sua origem cometária ou asteroidal. Este objeto apresenta órbita cometária tipo JFC ($T_j = 2.065$), mas não mostra nenhum tipo de atividade observada. Autores como Jenniskens (2004) e Koten et al. (2006) sugerem que (196256) 2003 EH1 seria um cometa em estágio dormente, confirmado por estudos de dinâmica de Babadzhanov et al. (2017) comparando três critérios de dissimilaridade distintos, D_{sh} , D_r e D_N .

Na subseção 2.7.3 enumeramos complexos NEA-meteoroides estudados até agora, sendo o conjunto 2003 EH1 - Quadrantids um dos mais debatidos. Neslušan et al. (2013b) ao estudar dinamicamente filamentos deste complexo, identificaram 8 chuvas associadas (sendo 4 não totalmente definidas), como se segue: daytime Arietids (#0171, ARI), Southern (#05, SDA) e Northen(#26, NDA) δ – Aquarids (além da Quadrantids) as quais estariam interceptando o nodo ascendente e a órbita terrestre.

No trabalho de Abedin et al. (2018), as 4 chuvas ainda em discussão foram apontadas como 4 filamentos de características pouco determinadas: Ursids⁶, daytime lambda-Taurids (DLT #0325), kappa-Velids (KVE #0784), theta-Carinids (TCD #785), num movimento de intersecção do nodo descendente com a órbita da Terra.

Objetivando identificar corpos parentais que possam estar potencialmente ligados a este complexo e à chuva Quadrantids, coletamos, em nossos resultados o ACO 2017 MM7, tipo Apolo, com 11.37 % de chances de ser falso-positivo associado à chuva Northen δ -Aquarids (NDA #026). Também forma encontradas associações com as chuvas: Northern χ -Aquariids (NCQ #01085) - 8.65 %, theta-Piscids ⁷(TPI# 0508) - 11.50 %, August ι -Cetids (AIC #00505) - 16.7 % e

⁶Possivelmente associada com November i-Draconids (NID #0392) ou com Dezembro α -Draconids (DAD #0334).

⁷Esta chuva foi retirada na última atualização da listagem MDC IAU, em novembro de 2023,

Southern chi-Aquariids (SCQ #01086) - 18.64 %. Logo a seguir, vamos discutir estas quatro potenciais associações.

A chuva NDA foi descoberta através de observações fotográficas (Wright et al., 1957, em duas seções de fotografias em 1952 e 1953), possuindo elementos orbitais muito similares à Southern delta-Aquariids, indicando pertencerem ao complexo formado pelo cometa 96P/ Machholz (suas inclinações e periélios mudam bastante, mas as longitudes do perinodos permanecem, devido a rotação da linha dos nodos⁸). Posteriormente, Holman and Jenniskens (2012) confirmaram a existência desse enxame, como filamento separado, além de o associarem aos cometas C/2009 U10 e C/1997 H2.

A lista da MDC IAU coloca seu período de atividade entre $\lambda_{\odot} = 118.4^{\circ} - 169.29^{\circ}$, consideradas as 11 soluções, e estando ativa de fins de Julho até fim de Agosto. Jenniskens (2006) considera seu pico em torno de 140.0° , próximo do valor $\lambda_{\odot} = 139.0^{\circ}$ encontrado como pico pelo projeto Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR) (Brown et al., 2010; Abedin et al., 2018).

A chuva AIC pode ser um ramo gêmeo de NDA (Holman and Jenniskens, 2012; Andreić et al., 2013). Yasuo (2022) encontrou resultados similares apontando esse ramo como um verdadeiro “espelho”. Seus meteoroides podem ter evoluído ao longo de ciclos de nutações, sendo que a posição do radiante no meio de sua atividade ($\lambda_{\odot} = 145.4^{\circ}$) está em $\alpha = 356.80^{\circ}$, $\delta = -9.6^{\circ}$ com $V_g = 37.2$ km/s e seu máximo está em torno de $\lambda_{\odot} = 155^{\circ}$ (27 de Agosto), sendo ativa entre $128^{\circ} - 164^{\circ}$, o que corresponde ao início de Agosto até 6 de Setembro. Logo, sua atividade interpenetra com o período de NDA, estando a posição dos α desses riantes bem próximas, com uma diferença média de 13° , e seus δ não ultrapassam a diferença média de 12° . Andreić et al. (2013) descartaram uma possível ligação com a chuva SDA ou a um corpo parental em comum, já que suas órbitas médias são bem distintas.

A chuva SCQ e NCQ ainda são pouco estudadas e estão classificadas como “Working list” da MDC IAU. Entretanto, Ye (2018) o associou a chuva ao NEA do tipo Apolo (455426) 2003 MT9 que tem $T_j = 2.59$, um tamanho estimado de 0.685 km e um albedo de 0.137.

por ser considerada uma duplicata da chuva NDA.

⁸Os fluxos de meteoróides se alinham num ciclo de nutação, ocasionando oscilações grandes em q e i , enquanto a linha nodal gira.

Na figura 3.10 mostramos a distribuição de meteoros das chuvas, NDA, AIC, PCE e NIA. E na figura 3.11, se pode notar a dispersão de meteoros por faixa de longitude solar entre entre $110^\circ - 200^\circ$, e a posição de cada radiante das quatro chuvas, se alinhando ao longo da longitude de periélio (π).

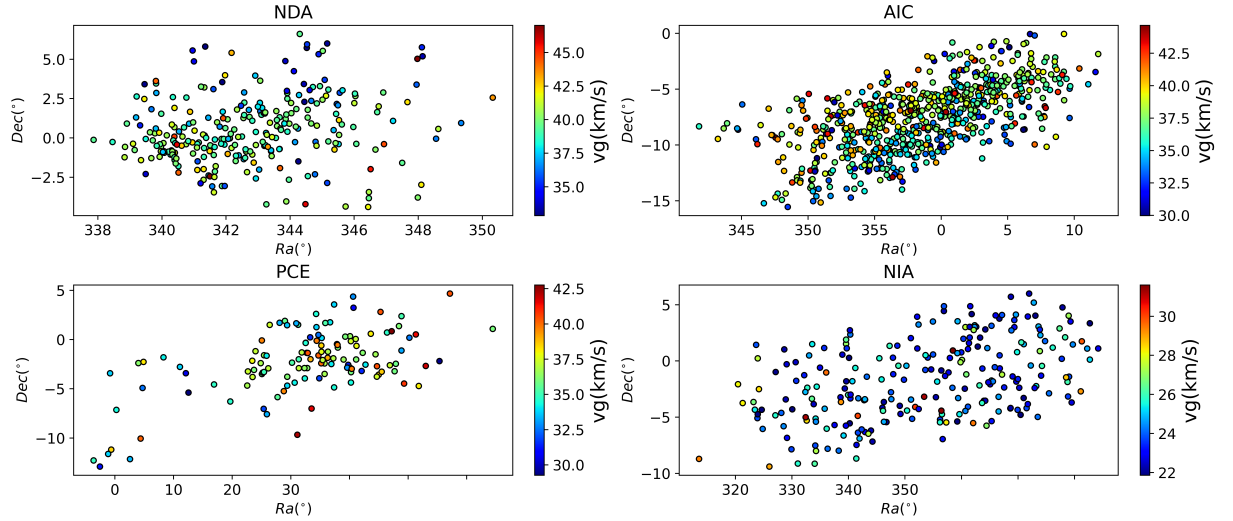


Figura 3.10: Distribuição de órbitas de meteoros por faixa de λ_{\odot} : (a) Northern δ -Aquariids (NDA, #026) $\lambda_{\odot} = 118.40^\circ - 169.29^\circ$, (b) August ι -Cetids (AIC, #00505) $\lambda_{\odot} = 140.27^\circ - 168.92^\circ$, (c) phi-Cetids (PCE, # 642) $\lambda_{\odot} = 156.00^\circ - 172.00^\circ$, (d) North iota-Aquariids (NIA, #033) $\lambda_{\odot} = 140.86^\circ - 189.62^\circ$.

Os resultados e parâmetros orbitais envolvendo este complexo estão resumidos na tabela 3.9. Comparando-se os elementos que compõem as órbitas de (196256) 2003 EH1 e 2017 MM7, nota-se formatos bem distintos e os seus radianes sintéticos não apresentam qualquer similitude. E o menor valor de D_{SH} dos radianes sintéticos destes dois ACO, pela aplicação do método B de Neslusan, é o calculado para 2017 MM7 ($D_{SH} = 0.116$).

Mas as similaridades vem à tona se consideramos a associação com NDA e NCQ, principalmente a proximidade de valores de a , q e e com o respectivo radiante sintético de 2017 MM7. Sua inclinação sendo o parâmetro que mais se afasta, embora o valor osculatório de i esteja mais próximo, medindo 23.18° , quando NDA tem 21.70° .

Aventamos a hipótese de que o ACO 2017 MM7 possa estar ligado geneticamente à chuva NDA e possivelmente a AIC, pelas similaridades apontadas acima. Uma

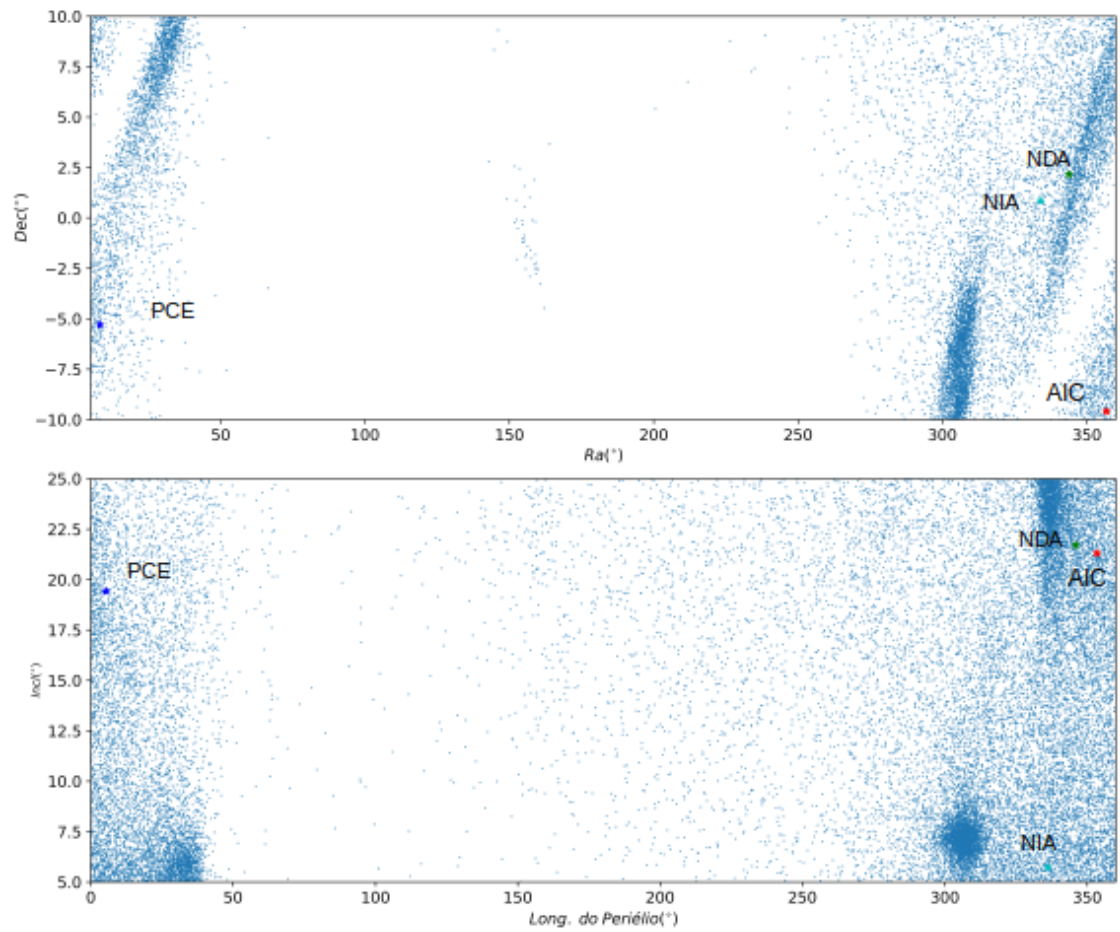


Figura 3.11: Contra um fundo de meteoros na faixa de λ_{\odot} entre 110° - 200° , plotamos na figura superior, posição dos radiantes, por ra-dec, e na figura inferior, diagrama π -i. Cada simbolo marca a posição de PCE, NIA, NDA e AIC.

Tabela 3.9: Quadro comparativo de elementos orbitais (J2000) com os dados de riantes das chuvas e riantes sinteticos.

<i>Dados da Chuva</i> ⁽¹⁾											
	$\langle a \rangle$	$\langle q \rangle$	$\langle e \rangle$	$\langle peri \rangle$	$\langle node \rangle$	$\langle incl \rangle$	$\langle Vg \rangle$	$\langle Ra \rangle$	$\langle De \rangle$	$\langle L_{\odot} \rangle$	Solutions #
	[U.A.]	[U.A.]		[°]	[°]	[°]	[km/seg]	[°]	[°]	[°]	
Quadrantids (QUA, #010)	3.11	0.98	0.68	169.95	283.25	71.8	41.20	230.85	+49.00	283.20	8
Northern δ -Aquiriids (NDA, #026)	2.10	0.10	0.96	329.62	140.14	21.70	38.55	343.88	+2.15	140.15	11
Northern chi-Aquiriids (NCQ, #1085)	2.37	0.09	0.96	329.40	150.70	16.0	39.10	355.70	+3.60	150.70	1
Southern chi-Aquiriids (SCQ, #1086)	2.50	0.06	0.98	154.30	323.90	16.60	40.8	354.80	-6.90	143.90	1
August iota-Cetids (AIC, #505)	1.83	0.11	0.94	148.20	325.40	21.30	37.24	356.80	-9.60	145.40	1
phi-Cetids (PCE, #642)	2.25	0.14	0.93	140.80	341.10	19.40	36.50	8.20	-5.30	161.00	1
North iota- Aquiriids (NIA, #033)	1.68	0.26	0.84	308.35	156.03	5.72	29.90	334.0	+0.84	156.22	6
<i>Dados do Radiante Sintético</i>											
	a	q	e	peri	node	incl	Vg	Ra	De	L_{\odot}	
	[U.A.]	[U.A.]		[°]	[°]	[°]	[km/seg]	[°]	[°]	[°]	
(20196256) 2003 EH1	n.a	0.98	0.62	171.30	283.00	70.90	40.23	229.9	49.5	283.0	
(3776128) 2017 MM7	n.a	0.08	0.96	151.50	328.90	4.40	38.47	357.39	-2.60	148.9	
<i>Elementos orbitais do ACO</i>											
	a	q	e	peri	node	incl	T_j				
	[U.A.]	[U.A.]		[°]	[°]	[°]					
2003 EH1	3.12	1.19	0.62	171.30	282.99	70.86	2.065				
2017 MM7	2.06	0.08	0.96	231.25	250.02	23.18	2.842				
<i>Elementos orbitais do Cometa</i>											
96P/Machholz 1	3.04	0.12	0.96	14.79	94.25	58.14	1.943				

Nota:

(1) - valores médios de soluções retirados de https://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2022/Roje/roje_lista.php?corobic_roje=0&sort_roje=0 [em Dez 2023]

possível ligação do ramo de NCQ e NDA também poderia ser investigado, pois as médias de atividade estão próximos (λ_{\odot} : 140.15° e 150.7°, respectivamente) e ambos se conectam com probabilidade alta a este ACO.

Ao investigar a associação de meteoros com este ACO, usando o método de Guennoun, foram coletadas 8 órbitas dadas na tabela em 3.10. Embora este seja um número relativamente baixo de órbitas, para descartar a probabilidade de mero acaso, fizemos o cálculo de Probabilidade de Ocorrência Aleatória - PCO (Probability of Chance Occurrence), o resultado é $PCO = 18,1\%$, demonstrando a relativa baixa possibilidade de um evento aleatório.

Na figura 3.12 estão plotados todos os meteoros associados ao ACO 2017 MM7. A órbita de maior alongação de em semi-eixo maior corresponde a um esporádico com $a = 6.591$ U.A.. que destoa das demais entre 1.089 a 3.092 U.A.. Entretanto, seu D_{sh} é 0.156, mostrando boa similaridade. A órbita em preto corresponde ao ACO e a azul ao seu radiante sintético, que usando o método B do algoritmo de Neslusan, foi modificada para uma inclinação menor, correspondente a 4.40°.

Dado que as órbitas associadas tem um valor baixo de mero acaso, passamos

Tabela 3.10: Sumário de parâmetros de radiante e órbita (J.200) de 8 meteoros conexos a 2017 MM7.

ACO 2017 MM7 (3776128)														
Showers	ACO(spkid)	Dcrit	(timeUT)	sol(°)	ra(°)	de(°)	q(UA)	a(UA)	incl(°)	e	peri(°)	node(°)	vg(km/s)	jd
PCE	3776128	0.056	2012-08-23 22:53:51	151.021	357.443	-2.277	0.102	2.408	6.191	0.958	146.958	331.021	38.175	2 456 163.454 063
AIC	3776128	0.069	2012-08-26 18:00:18	153.718	358.401	-1.671	0.119	2.415	2.352	0.951	144.089	333.722	37.324	2 456 166.250 210
AIC	3776128	0.081	2016-08-23 00:00:42	150.070	358.971	-2.064	0.071	2.650	8.504	0.973	152.359	330.070	40.265	2 457 623.500 495
AIC	3776128	0.096	2015-08-16 03:32:42	142.766	355.923	-3.512	0.047	1.829	9.319	0.974	158.821	322.767	39.882	2 457 250.647 715
spo	3776128	0.131	2015-08-29 03:38:36	155.293	358.877	-1.680	0.149	3.092	4.229	0.952	138.469	335.297	37.108	2 457 263.651 814
NIA	3776128	0.138	2018-08-26 15:06:35	153.081	356.396	-1.003	0.127	2.725	1.304	0.953	322.327	153.075	37.513	2 458 357.129 570
spo	3776128	0.156	2014-08-30 01:24:09	156.421	358.964	-2.898	0.149	6.591	7.102	0.977	136.362	336.422	39.038	2 456 899.558 438
spo	3776128	0.174	2013-08-29 01:40:05	155.706	357.109	-1.716	0.162	3.564	2.023	0.954	135.919	335.705	37.030	2 456 533.569 505

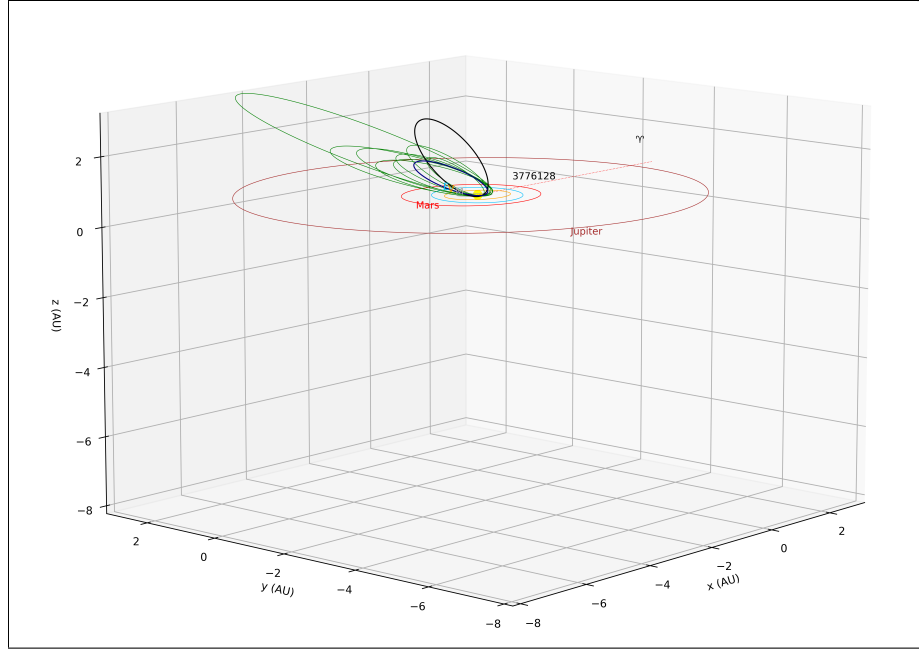


Figura 3.12: Diagrama da órbitas, em cor verde, dos 8 meteoros conexos ao ACO 2017 MM7 (n° sequencial spkid 3776128), a órbita de cor preta corresponde ao objeto e a azul ao radiante sintético, , J2000xJ2000.

a analisar a tabela: das 8 órbitas coletadas 3 estão associadas com chuvas, sendo AIC (3), PCE (phi-Cetids, 642) (1) e NIA(North iota-Aquariids, #033) (1), e as outras 3 classificadas como esporádicas⁹. Os quatro valores mais baixos de critério D_{sh} , estão ligados a PCE, 0.056, e AIC, 0.069, 0.081, 0.096, respectivamente.

Portanto, 4 órbitas de meteoros tem valor de $D_{sh} < 0.1$, mostrando alta probabilidade de associação verdadeira. Outros apresentando $D_{sh} < 0.15$, enquadrando-se como média alta e últimos dois (catalogados como esporádicos) com $D_{sh} < 0.2$, representando chance de associação média baixa.

A chuva NIA é classificada como um enxame já estabelecido, contendo 6 soluções, enquanto a PCE está em fase de se tornar também estabelecida, mas permanece na "working list". É importante salientar que a chuva NDA pode contaminar os meteoros de NIA, pois ela aparece logo ao seu sudeste depois da $\lambda_{\odot} = 150.0^{\circ}$ (Molau et al., 2012; Yasuo, 2022), ou seja, o meteoro classificado pode pertencer a NDA.

O autor Yasuo (2022), que investigou as chuvas de meteoros nos período de 2007 a 2020, com base em video observações da rede SONOTACO, propôs que

⁹Essa classificação foi feita pelo software UFOOrbit suite versão V2 v3.03, usando o catálogo de J_14_202208.jx.csv

PCE é a mesma chuva AIC, pois, na verdade ela corresponderia a fase terminal desta. Assim, as classificações dos enxames AIC, PCE e NIA, demonstram (1), a possível contaminação cruzada entre NIA e NDA à partir de $\lambda_{\odot} = 150.0^{\circ}$ (indicando possíveis superposições) e, (2), a provável duplicidade entre PCE e AIC (um possível ramo espelho de NDA).

Realizamos integração numérica retroagindo 10 000 anos, a partir de 01.12.2023 00:00:00 UT, comparando as variações de D_{SH} entre 2003 EH1 e 2017 MM7, ao longo desse período. A análise tem como objetivo identificar similaridades da vida orbital destes dois objetos, podendo indicar alguma relação parental.

Aplicamos a mesma metodologia da seção anterior ao investigar esta variação, na figura 3.13, apresentamos as variações de valores de D_{sh} abaixo de 0.25, 0.2, 0.15, 0.1 e 0.05. Não podemos afirmar somente com base em variações deste critério, se eles teriam alguma origem comum, pois verificamos apenas duas regiões de convergência abaixo de 0.05, em torno de mil e dois mil anos passados, mas no cômputo geral os valores ao longo do tempo foram bem acima do critério razoável de similaridade.

Estudamos também as variações de inclinação, q e a , entre os dois objetos, mas não foi possível identificar similaridades orbitais suficientes para indicar alguma relação parental. Na figura 3.14 são dados os gráficos mostrando os resultados das integrações.

2003 EH1 apresenta variações pequenas em seu semi-eixo maior, em torno de 3 U.A. com exceção num curto período de aproximadamente - 5 000 anos atrás, quando dá um salto até 4 U.A., voltando ao patamar anterior, com novas variações em torno de -4 200 anos e pouco depois de - 2 000 anos, da mesma forma seu periélio sofre variações durante toda a integração, indo de pouco abaixo de 0.2 U.A., em torno de -4 300 anos e -1 800 anos, até quase 1.6 U.A., e cerca de - 6 200 anos e em torno de -3 000 anos.

2017 MM7 mantém estável em a , com algumas reduções, sendo a queda maior em torno de -700 anos. Seu periélio cresce em torno de -10 000 anos até cerca de 0.58 U.A. e depois segue uma curva descendente à partir de próximo à -6 000 anos, atingindo cerca de 0.08 U.A., no início da integração para trás.

A inclinação de 2003 EH1 varia fortemente indo de cerca de 70° a próximo de 10° em duas épocas, pouco depois de -5 000 anos e cerca de -1 500 anos.

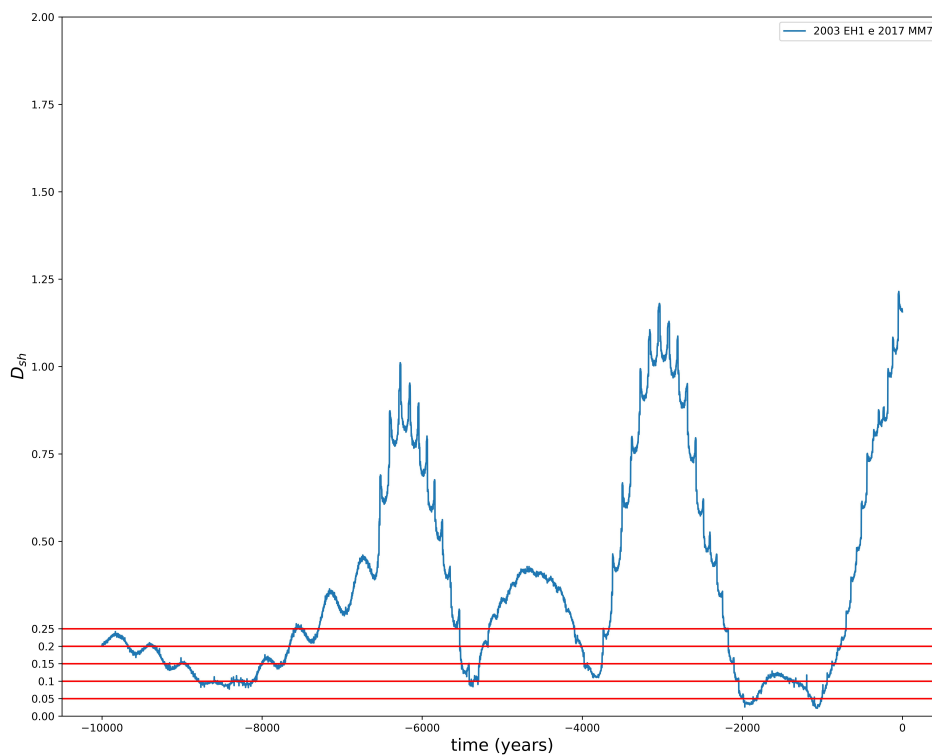


Figura 3.13: Variação do critério D_{sh} das órbitas de 2003 EH1 e 2017 MM7, dentro de um período de 10 000 anos. Nota-se uma região de convergência de valores abaixo de 0.05, há cerca de 1 000 e 2 000 anos atrás.

Enquanto a inclinação de 2017 MM7 cresce paulatinamente de aproximadamente 55° atingindo um máximo de 60° , em torno de -5 500 anos, e vai decrescendo até aproximadamente 23° , até chegar aos dias atuais.

Em resumo, os ACO estudados em conexão com o complexo Quadrantids apresentam resultados interessantes relativos a associação de chuvas, mas suas integrações numéricas não mostram qualquer indicação de parentesco entre os NEOS. Seriam necessários mais análises detalhadas de dinâmica e observação de suas propriedades físicas.

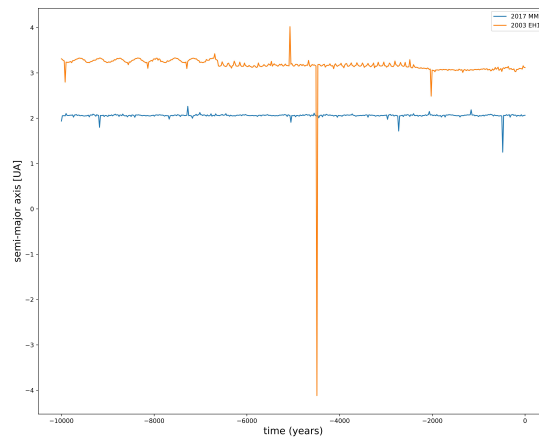
A pesquisa das propriedades físicas do ACO 2017 MM7 pode ajudar a esclarecer a sua distinção entre um asteroide ou cometa, caso venha a ser confirmado, poderia ser parte do núcleo de um corpo maior, ou um cometa tipo curto-período *Sungrazer* ou mesmo *Sunskirting*, dado ao seu periélio ser 0.08 U.A.. Este periélio acarretaria a extinção do seu material volátil em poucos séculos de órbitas em torno do Sol, como parte, por exemplo, do complexo cometário 96P/Machholz (Abedin et al., 2018).

Na figura 3.15 mostramos, em forma de diagrama, as relações entre as chuvas que podem formar um complexo junto com 2017 MM7 e 2003 EH1. Através dele resumimos como as associações propostas com as chuvas NDA, AIC, PCE e NIA, podem indicar a existência de um corpo parental em comum, podendo ser o ACO 2017 MM7. Este objeto, embora de dimensões insuficientes e sem registro ou observações de qualquer tipo de atividade, pode ter pertencido a um corpo maior.

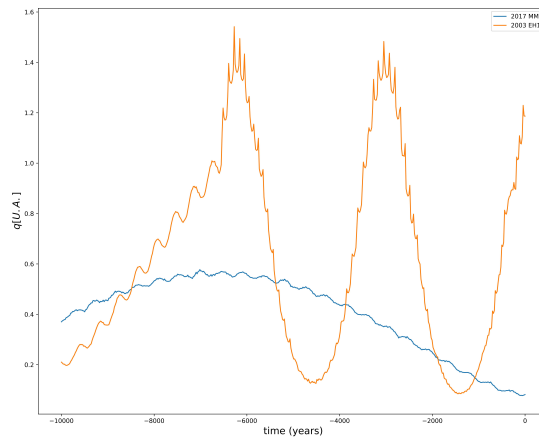
3.5.3 O caso do NEA 2009 WN25

2009 WN25 é um NEA tipo ACO, com $T_j = 1.96$, $H = 18.40$, tamanho estimado entre 600 a 1 300 m, tipo taxonomico D (Ieva et al., 2019). Esses parâmetros indicam ser um um objeto primitivo, possivelmente um pequeno cometa (ou pedaço de núcleo cometário) extinto ou dormente, a sua órbita bem inclinada indica que ele poderia pertencer à JFC.

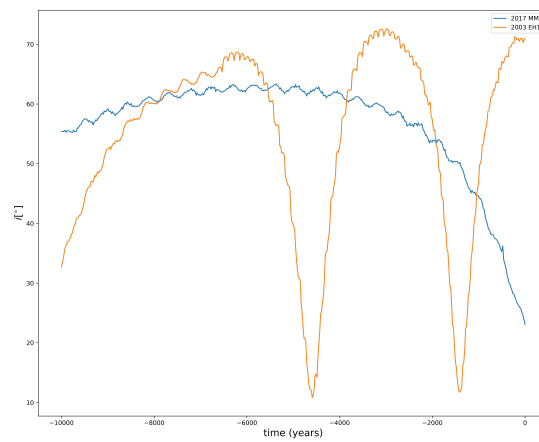
No trabalho de Micheli (2013) aplicando o algoritmo "Match" foi identificada a conexão entre o NEA 2009 WN25 e a chuva iota-November Draconids (#392, NID), com 13.0 % de ser falso-positivo. Entretanto, os nossos resultados, item 15 da tabela 3.4, apontam a associação deste NEA com a chuva November Draconids (# 0753, NED) e 4.26 % de probabilidade em ser uma associação espúria. O que



(a) Variação de semi-eixo maior



(b) Periélio



(c) Inclinação

Figura 3.14: As três figuras de a-c acima representam as variações seculares do periélio, semi-eixo maior e inclinação de 2003 EH1 e 2017 MM7, respectivamente.

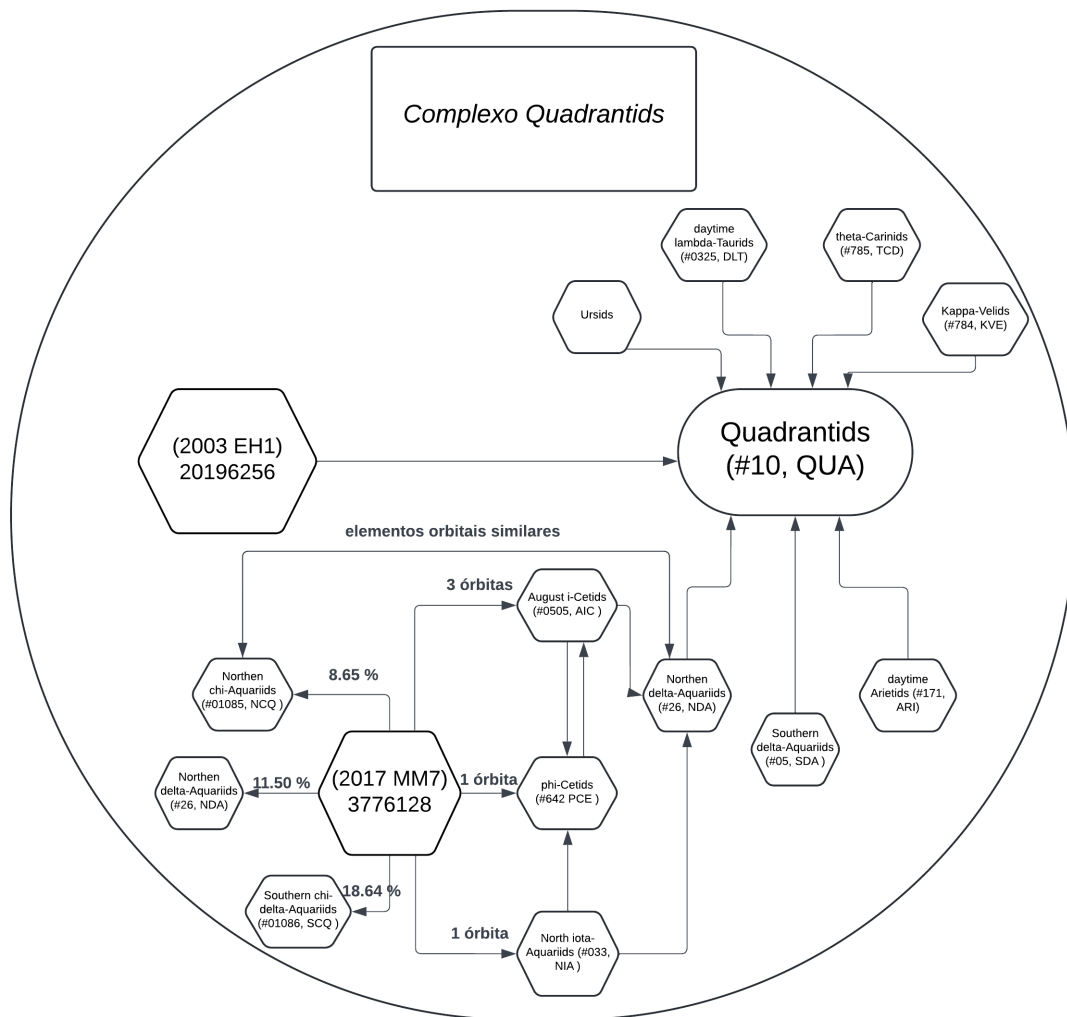


Figura 3.15: Diagrama complexo Quadrantids, contendo os ACOs propostos e as chuvas associadas, com os valores de *Match* de 2017 MM7 e as órbitas associadas.

poderiam ser resultados conflitantes, eles acabaram por mostrar convergências, que passaremos a analisar.

Tabela 3.11: Sumario de parametros de riantes e órbitas de 15 meteoros conexos a 2009 WN25 (J.200).

ACO 2009 WN25													
Shower	Dcrit	(timeUT)	sol(°)	ra(°)	de(°)	q(UA)	a(UA)	incl(°)	e	peri(°)	node(°)	vg(km/s)	jd
spo	0.034	2021-11-14 16:43:52	232.234	198.931	68.944	0.989	2.542	69.874	0.611	181.682	232.234	39.534	2 459 533.197
spo	0.050	2020-11-12 15:49:51	230.439	193.878	69.401	0.989	2.954	72.747	0.665	182.946	230.439	41.334	2 459 166.160
spo	0.051	2022-11-16 18:06:35	234.046	197.274	67.257	0.989	2.459	71.710	0.598	180.643	234.046	40.308	2 459 900.255
NID	0.068	2010-11-16 01:45:23	233.442	202.124	67.822	0.989	2.750	68.386	0.641	177.101	233.441	39.088	2 455 516.573
spo	0.095	2011-11-15 19:42:28	232.924	197.141	67.181	0.989	3.449	73.782	0.713	179.141	232.924	42.238	2 455 881.321
NID	0.097	2014-11-17 04:52:26	234.550	197.488	66.664	0.989	2.188	70.392	0.548	179.968	234.550	39.280	2 456 978.703
NID	0.107	2015-11-13 17:39:38	230.803	197.580	67.084	0.987	2.383	72.630	0.586	172.978	230.803	40.639	2 457 340.236
spo	0.113	2007-11-19 19:56:03	236.996	198.553	68.438	0.986	2.828	70.965	0.651	186.043	236.996	40.405	2 454 424.331
DAD	0.116	2011-11-20 23:59:11	238.146	201.431	68.249	0.988	2.771	68.885	0.644	182.347	238.146	39.369	2 455 886.499
NID	0.121	2022-11-09 19:17:32	227.054	194.006	69.929	0.990	2.195	70.282	0.549	180.211	227.054	39.181	2 459 893.304
DAD	0.138	-	236.604	194.539	67.822	0.985	2.235	70.829	0.559	188.030	236.604	39.567	2 455 519.711
NID	0.145	2007-11-07 11:14:34	224.553	194.063	70.091	0.991	2.413	70.810	0.590	177.441	224.553	39.772	2 454 411.968
NID	0.156	-	237.586	195.089	68.564	0.983	2.358	70.077	0.583	189.919	237.586	39.414	2 455 520.684
NID	0.158	2013-11-07 19:57:50	225.384	201.348	69.363	0.989	2.553	68.226	0.613	174.102	225.384	38.751	2 456 604.332
NID	0.173	2022-11-09 17:39:24	226.986	202.489	68.511	0.988	3.828	70.446	0.742	173.829	226.986	40.874	2 459 893.236

Na figura 3.16 estão plotados os 15 meteoros associados à órbita de 2009 WN25, e dados na tabela 3.11. A órbita em preto corresponde ao ACO e a azul ao seu radiante sintético, que usando o método B do algoritmo de Neslusan, sofreu pequeno ajuste no seu periélio de 1.22 U.A. para 0.98 U.A., mantendo-se praticamente inalterados os outros parâmetros, vide a tabela 3.12.

Das órbitas coletadas, 2 meteoros estão classificados como DAD, seus D_{SH} são relativamente altos, indicando média chance de associação, com 0.116 e 0.138, 8 meteoros são da chuva NID, e apresentam variações D_{SH} entre 0.068 a 0.173, mostrando altas chances de associação, sendo 6 meteoros abaixo de 0.1. Os 5 meteoros restantes são esporádicos. Nossos cálculos de PCO apontam 21.4 % de chance que as associações aqui elencadas sejam meramente ao acaso. Mais adiante vamos discutir a possibilidade das chuvas DAD e NED serem parte do mesmo enxame de meteoroides.

É importante frisar que a mesma associação 2009 WN25 - NED foi encontrada por Šegon et al. (2015) utilizando critérios de dissimilaridade, além de constatar o pico máximo desta chuva em torno da data 16/11, muito próximo da chuva December alpha-Draconids (#334, DAD).

Jenniskens et al. (2016) ao analisar esta chuva DAD, conclui que o pico dela ocorre em $\lambda_{\odot} = 265.5^{\circ}$, muito próximo do máximo da chuva December kappa-Draconids (#0336, DKD) em $\lambda_{\odot} = 250.2^{\circ}$. Mas, com outra chuva também ocorrendo

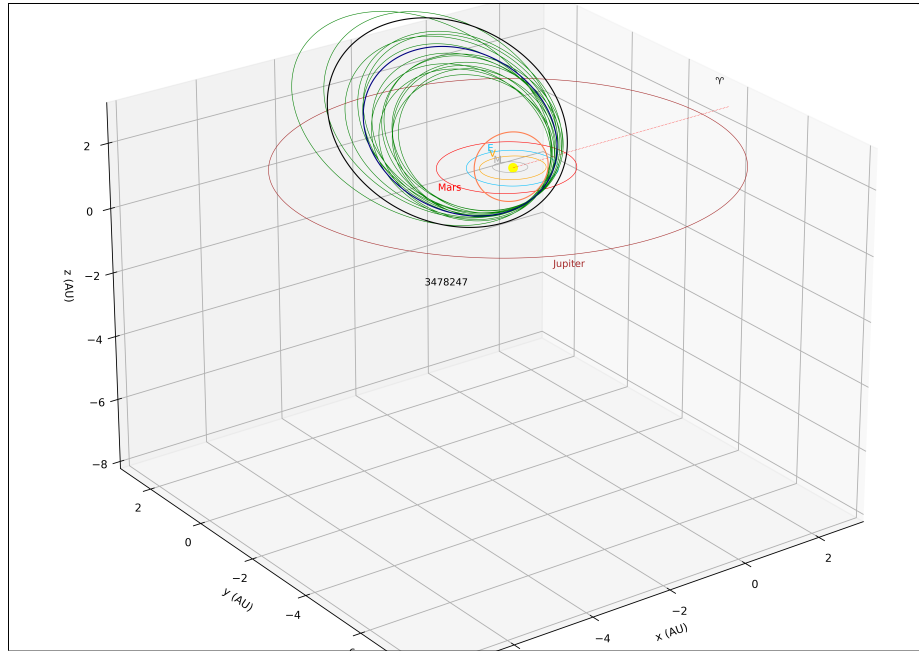


Figura 3.16: Diagrama das órbitas, em cor verde, dos 15 meteoros conexos ao ACO 2009 WN25 (n^o sequencial spkid 3478247), a órbita de cor preta corresponde ao objeto e a azul ao radiante sintético, J2000xJ2000.

nas proximidades, a própria NID em $\lambda_{\odot} = 241.0^{\circ}$.

Aprofundando a questão da associação com NID, Micheli et al. (2016) mostrou a existência de um complexo difuso de chuvas fracas, composto de subradiantes, com DAD e kappa-Draconids (#0380, KDR). Aplicou também métodos de integração numérica com modelagem de ejeção de meteoroides em cada passagem periélica de 2009 WN25, assumindo o melhor resultado com partículas de cerca de $30 \mu m$, expulsas há cerca de cem anos atrás.

Porém, a modelagem de Micheli (2013) não conseguiu demonstrar a posição calculada do radiante parental e nem convergiu para encontros como os nodos. Entretanto, da análise de integrações orbitais do NEA foi possível constatar a alternância de extremos entre inclinações e excentricidades, devido à ocorrência de um ciclo de Kozai, em andamento, que diminui valor do periélio o que poderia causar a extinção de voláteis durante a fase de alta excentricidade, tornando este ACO inativo ou extinto.

Yasuo (2022) mostrou que a chuva NED poderia ser, na realidade, a parte inicial da chuva DAD e NID correspondendo à sua primeira metade. Na figura 3.17 mostramos a distribuição dos meteoros de cada chuva, dos banco de dados utilizados neste trabalho, sendo possível constatar que NID, NED e DAD estão bem

próximos. Na figura 3.18 é então dada dispersão de meteoros em torno das três chuvas, na faixa de longitude solar entre $220^\circ - 270^\circ$, onde é visível a proximidade destes enxames, corroborando o possível “parentesco” entre elas.

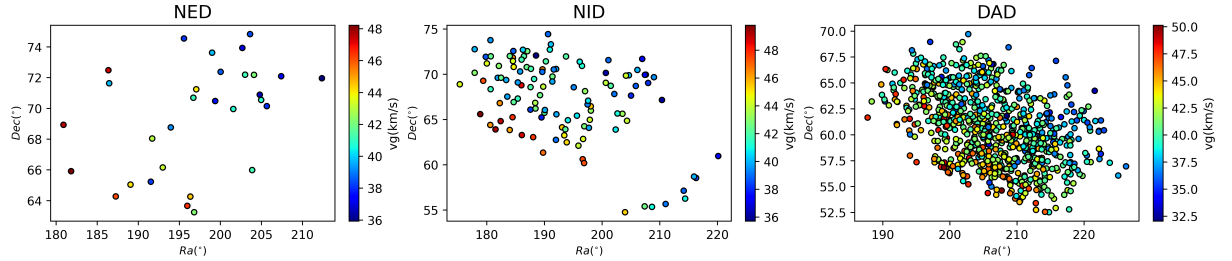


Figura 3.17: Distribuição de órbitas de meteoros por faixa de λ_\odot . (a) November Draconids período $\lambda_\odot = 225^\circ - 238^\circ$, (b) November i-Draconids período $\lambda_\odot = 221^\circ - 268^\circ$, (c) December alpha-Draconids período $\lambda_\odot = 230^\circ - 265^\circ$.

Nossos cálculos de radiante teórico para 2009 WN25 mostraram o melhor método -B que aponta a menor distância à órbita da Terra de 0.2318 U.A., antes da passagem do periélio. Na tabela 3.12, são dados os principais parâmetros em comparação com os elementos orbitais do NEA e as chuvas aqui em discussão.

Tabela 3.12: Parâmetros médios da chuva e os elementos orbitais (J.2000) do candidato a corpo parental, inclusive seu radiante sintético.

	sol $^\circ$	ra $^\circ$	de $^\circ$	vg(km/s)	a(UA)	q(UA)	e	peri $^\circ$	node $^\circ$	incl $^\circ$
NID	241.50	198.30	66.25	42.45	3.69	0.98	0.74	187.89	247.70	73.90
NED	232.80	194.20	68.60	42.00		0.99	0.70	183.7	232.8	73.5
DAD	253.45	206.90	60.45	41.00	2.59	0.98	0.62	181.60	252.85	72.35
Radiante Sintético	231.9	197.4	68.6	40.36	n.a	0.9893	0.6336	181.2	231.9	71.2
2009 WN25		*** n.a ***			3.33	1.22	0.63	181.23	231.86	71.22

Analisando os valores de longitude solar do radiante teórico e da chuva NED, constatamos suas similaridades, $\lambda_{\odot NED} = 232.80^\circ$ e $\lambda_{\odot rad} = 231.9^\circ$, enquanto a chuva NID possui valor médio de $\lambda_{\odot NID} = 241.5^\circ$. Outros valores discrepantes são a declinação, $de_{NID} = 66.26^\circ$ e $node_{NID} = 247.70^\circ$, contra valores mais próximos entre NED e o radiante teórico de 2009 WN25.

Um complexo December alpha-Draconids (#334, DAD) - 2009 WN25 ?

Considerando (a) a existência das chuvas e valores mais similares de NED com o

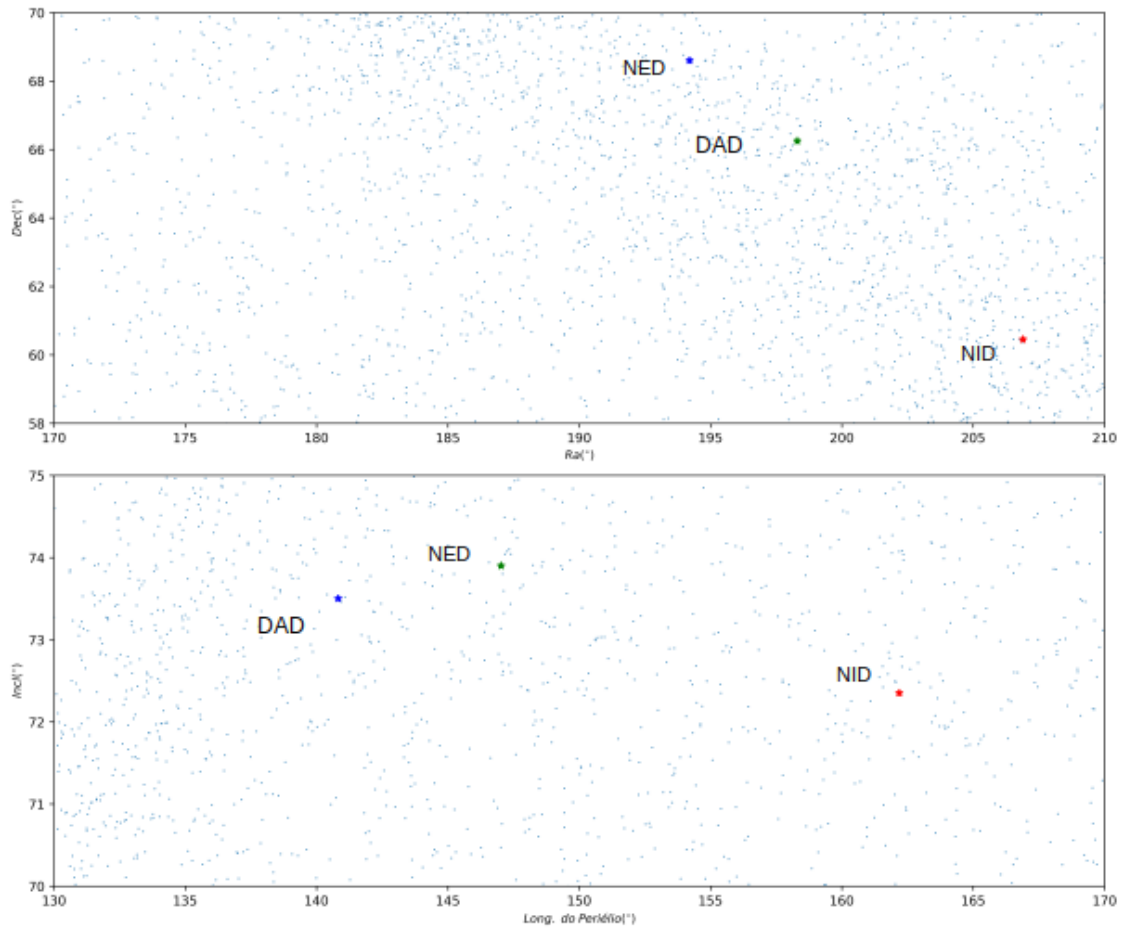


Figura 3.18: Contra um fundo de meteoros na faixa de λ_{\odot} entre 220° - 270° , plotamos na figura superior, posição dos riantes, por ra-dec, e na figura inferior, diagrama π -i. Cada simbolo marca a posição de NED, NID e DAD.

radiante teórico e (b) a provável origem cometária de 2009 WN25, com classificação taxonômica tipo D. É plausível que haja a existência de um complexo envolvendo NED, NID e DAD com relação parental ao ACO 2009 WN25.

Futuras observações deste objeto investigando mais propriedades físicas e sinais de atividade poderão elucidar se na verdade trata-se de um núcleo cometário já extinto ou de um pequeno cometa em estágio dormente.

No Diagrama a seguir, figura 3.19 mostramos as relações entre as chuvas que podem formar o complexo, e como as associações propostas se conectam.

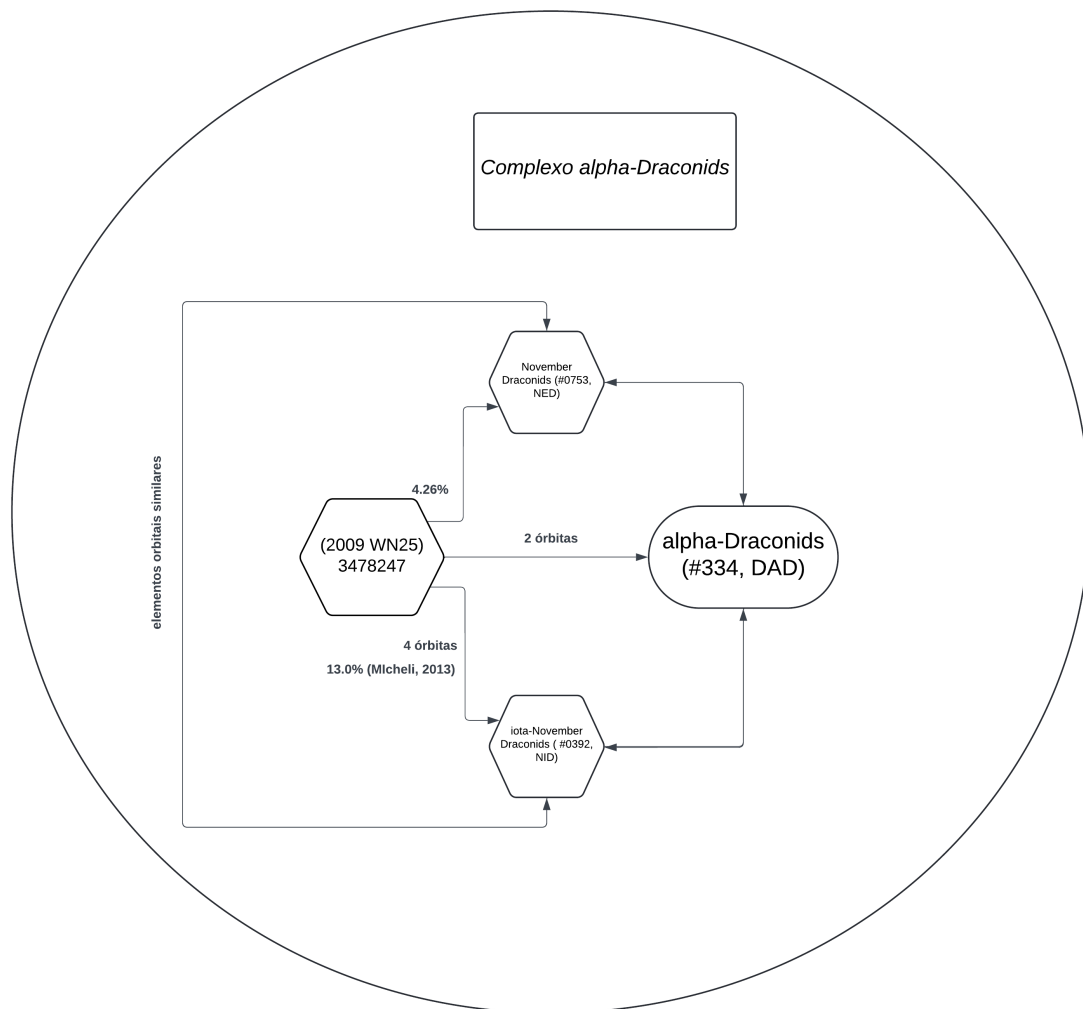


Figura 3.19: Diagrama do complexo alpha-Draconids, contendo o ACO 2009 WN25 proposto e as chuvas associadas, com os valores de *Match* e as órbitas associadas.

Capítulo 4

A recorrência de um bólido tipo rasante

4.1 Introdução

Neste Capítulo apresentamos a investigação e análise de um bólido tipo rasante. Foram aplicados dois integradores numéricos para frente e para trás no tempo e uma modelagem da perda de massa, do meteoróide EN131090 em 13 de outubro de 1990, registrado por duas estações tchecas da Rede Europeia European Fireball Network (EFN) (Borovicka and Ceplecha, 1992).

Os cálculos de encontro próximo foram implementados usando condições iniciais antes e depois do rasante, em integração retrógrada e prógrada, respectivamente. Com a aplicação de dois integradores, REBOUND em linguagem PYTHON (Rein and Liu, 2012) e um simplético de 4ª ordem (Neri, 1987; Csillik, 2004; Szücs-Csillik, 2010) em linguagem MATLAB, os resultados são comparados com a finalidade de investigar a possibilidade de captura ou colisão do meteoróide.

Os principais resultados deste trabalho envolvem a conclusão de que os dois integradores, mesmo adequados ao caso de encontros próximos, não são capazes de calcular previsões avançadas, pois o objeto rasante pode cruzar órbitas de outros corpos, sujeito à perturbações indeterminadas. É mesmo classificado dinamicamente em órbita tipo cometária, sua análise física demonstra que ele é um corpo rochoso, tipo condrito ordinário, portanto de provável origem asteroidal.

A seguir é apresentado o trabalho publicado no Romanian Astronomical Journal (2022) (De Cicco and Szücs-Csillik, 2022). Na seção 4.3, adicionamos discussão sobre a classificação dinâmica deste rasante como um possível ACO.

4.2 Artigo “EARTH-GRAZING FIREBALL’S RECURRENCE”

Este é um artigo com Open Access reproduzido sob a permissão de Creative Commons licence.

EARTH-GRAZING FIREBALL'S RECURRENCE

MARCELO DE CICCO^{1,2,3}, IHARKA SZÜCS-CSILLIK⁴

¹*Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
Av. Nossa Senhora das Graças, 50 - Prédio 6
Email: macicco@inmetro.gov.br*

²*Observatório Nacional
Rua Gal. José Cristino 77, 20921-400 Rio de Janeiro, Brazil*

³*Exoss project, press.org.exoss*

⁴*Astronomical Institute of the Romanian Academy
Astronomical Observatory of Cluj-Napoca
Ro-400487, Cireșilor 19, Cluj-Napoca, Romania
Email: iharka@gmail.com*

Abstract. Grazing meteors type is meteoroid debris that enters the planetary atmosphere with a near-horizontal path and perigee very high to the ground, having only part of their material being ablated during air interaction so the remaining could return to space at a different orbit after that brief encounter. On October 13, 1990, an Earth-grazing fireball crossed the atmosphere, with an absolute magnitude of -6 and lasting 10 seconds, with an initial velocity of $41.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. It was observed above Czechoslovakia and Poland and registered by two Czech stations of the European Fireball Network. The bolide travelled about 409 km during its luminous trajectory. The modified orbit of the remaining material was calculated using the specific method for long trajectory determination by the authors Borovicka and Ceplecha (1992). Using REBOUND's Python package, we implemented calculations for that grazing type close encounters back and forth in time, before initial conditions (IC) used for the retrograde integration and the after IC for prograde integration, then the same steps were done running the equation of motions under a fourth order Symplectic Integrator. Both results were compared in order to find out if we can obtain a capture (or a collision) in time (back or forth) simulating the Solar System. Finally, a forward and backward propagation in time of the meteoroid is presented using the described equations of motion and fourth-order symplectic Neri integrator.

Key words: Celestial Mechanics – Meteors – Orbit determination – Numerical integration.

1. INTRODUCTION

Grazing meteors are phenomena which occur when meteoroid debris from comets or asteroids that enter the planetary atmosphere with a near-horizontal path and perigee very high to the ground, having only part of their material being ablated during air interaction so the remaining might return to space at a different orbit after that brief close encounter.

In the context of this paper, the fundamental discussion can be described as

an atmospheric fly-by of a small body (a grazer), that gravitational influence of the main body (Earth) changes the orbital evolution of the former in a way that future approximations could lead to an orbit that again crosses the planet path. Interesting topics of small bodies research arise from grazing close encounter studies, such as planetary impact risks predictions, frequency of meteoroid grazers and pre/post orbital modifications that potentially can be evaluated by symplectic integrations.

Thus, in order to study the dynamic properties of a close encounter by a meteoroid that grazes the Earth's atmosphere, we have chosen the October 13, 1990 fireball EN131090 event, registered by two Czech stations from the European Fireball Network (Borovicka and Ceplecha, 1992). Upon the available data, we run two distinct symplectic integrators: a non-separable fourth-order symplectic integrator (Neri, 1987; Szücs-Csillik, 2010; Anghel *et al.*, 2021) and the 15th-order modified Runge–Kutta integrator (IAS15) from REBOUND package (Rein and Spiegel, 2015), then discussing the results in this paper.

This work is divided into four sections: in the first section, we introduce the close encounter problem, showing its importance, the role involving risks - mostly from NEOs and the Earth-grazing closing approach; in the second section, we discuss more deeply close encounters problem from grazers perspective and the trajectory results of the EN131090 fireball, presenting the purposes of our investigations; in the third section we introduce the numerical modelling equations of motion analytically, for n -body in case of REBOUND software package and perturbed two-body, for Jupiter-Sun, Saturn-Sun, Earth-Sun, Mars-Sun, Mercury-Sun and Venus-Sun pairs simulations using the Neri's fourth-order symplectic integrator, analysing the results, comparisons and comments of the figures and graphics about before and after orbits in REBOUND and Symplectic simulations for a given period close approach and distance calculations. And finally, the fourth section is dedicated to discussing the results and conclusions.

1.1. CLOSE ENCOUNTERS PROBLEM

A theory interpreting mathematical close encounters mechanisms was developed by Opik (1976), it considers two bodies solution in two parts as a piece-wise two-body approach, it combines a hyperbolic solution during the fly-by for a new elliptical heliocentric orbit. Later improvements introduced by Milani *et al.* (2000) and Valsecchi *et al.* (2003) supersede theoretical limitations related to orbits with Minimum Orbital Intersection Distance (MOID) very close to zero and the basic theory does not consider dependence of the subsequent encounters with the previous ones, thus innovating with the concept of resonant returns and keyhole mechanisms*.

*Small regions of an impact plane of a specific close encounter that if an object pass through one of them, it will hit the Earth in a subsequent return.

Two dynamic aspects have to be considered about close encounters: the sphere of influence (SOI) and MOID, as according to mutual distances temporal gravitational forces of Earth can surpass the Sun's attraction (Solar System Central Body) and the distance between the body and the planet orbit become so close that could indicate a future collision (Tommei, 2021). Those encounters have the capacity to change orbits in a way that possible subsequent encounters could not be independent of the occurrence of the previous one (resonant return).

At the early stages of our planetary system, close encounters of Giant ice planets with protoplanetary bodies and planetary migrations resonances defined some small body disk structures (Nesvorný, 2018). Many studies and numerical modelling of the initial formation and evolution of the Solar System demonstrate the protoplanetary close approaches were one of the fundamental mechanisms for the current structure of Main Belt Asteroids, Trojans and Kuiper objects, these reservoirs are responsible for near-Earth objects (NEOs) replenishing and periodic comets, respectively. Also, dynamic mechanisms involving close encounters are crucial for understanding of terrestrial planets resurfacing by intense cratering of Mercury, Venus, Moon, Earth and Mars, during Late Heavy Bombardment (Bottke and Norman, 2017).

Minor bodies as asteroids, comets and meteoroids (parts of comets/asteroids ≤ 1 m) are subject to close encounters with considerable more massive bodies (*i.e.* the planets). Investigating this mechanism is fundamental for understanding the current orbital evolution of objects such as NEOs, Jupiter family comets (JFCs), long period and hyperbolic comets that can reach out or cross Earth orbit.

1.2. EARTH IMPACTS

Our planet has experienced in recent times many considerable impacts as the Tunguska event in 1908 that devastated 80 million trees around an area of 2150 km², in the Siberian region (Boslough, 2015). This event was supposed to be caused by a small body of 40 m that disintegrated completely in the air. In 2007, the Carrancas impact created a crater of 13.5 m and a depth of 5 m, the estimated size body is "only" 2 m (Moreno-Ibanez, 2018), and the most recent case of Chelyabinsk superbolide in 2013. The latter, was caused by an asteroid with an approximate size of 20 m that crashed in the atmosphere and an air blast injured more than thousand people, causing millions of euros in damages.

Such events might take place every 50 years, so efforts have been done to develop new tools for the detection of planetary-small bodies encounters that might cause potential impacts, in a way that can be estimated and its probability calculated. In Figure 1 we show a plot of cumulative impact risks (Boslough *et al.*, 2015) by energy, NEA population, probabilities, sizes and absolute magnitude H , where the estimates of impact frequencies use a straight-line power-law population and many

catastrophic events are marked (Perna *et al.*, 2013).

Thus, early detection, accurate estimations and propagation of their states with associated uncertainties set (Chesley *et al.*, 2002) and further follow-up of NEOs and bodies of tens of meters in size are crucial. But many small bodies are still difficult to detect due to distances, proximity to the Sun glare, low albedo and higher absolute magnitude that could hit Earth without any previous warning.

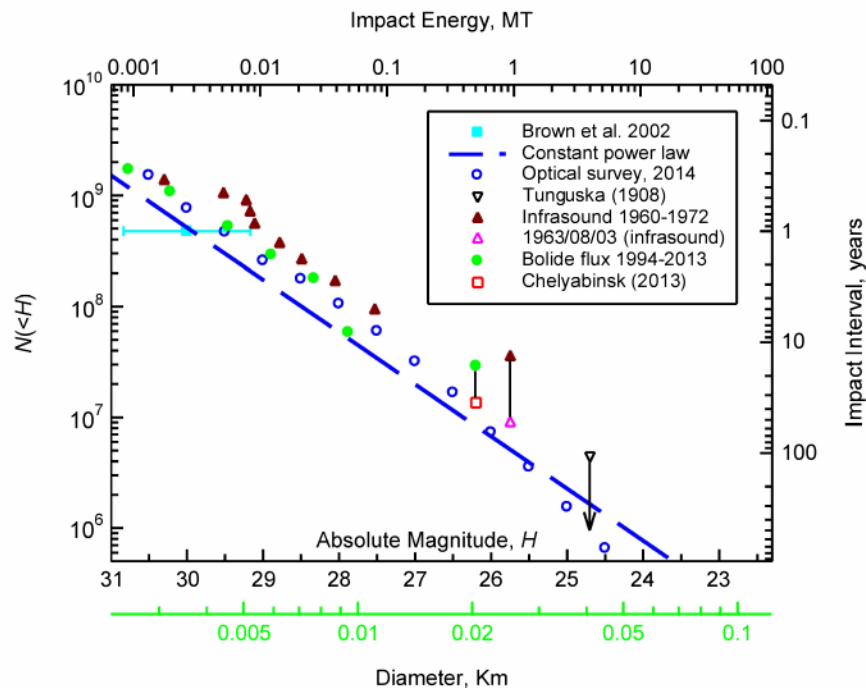


Fig. 1 – Estimated cumulative population of small NEAs The bottom scale shows the size of the objects. The left scale shows how many are that size or larger, the top scale is the energy that would be released on impact, the right scale shows the frequency with which impacts might occur.

Furthermore, NEAs ≥ 140 m with MOID ≤ 0.05 pose a serious threat, and they are massive enough to survive atmosphere penetration and cause local or regional scale destruction. These are known as PHAs (Potentially Hazardous Asteroids) and a catastrophic impact of such magnitude is expected to occur once every million years. An emblematic example is PHA (99942) APOPHIS, discovered in December 2004 with a possible impact of Torino scale 2 in 2009, however further observations excluded a collision.

1.3. EARTH-GRAZING CLOSE ENCOUNTERS

While many studies show that small kilometer to meter-size objects occasionally experience close encounters with Earth and other planets such as Mars, Venus and Jupiter, very few efforts have been made to study grazing bolides or superbolides (only 10 grazing fireballs were registered in current scientific literature). They survive atmosphere passage and return to interplanetary space, with orbital parameters changed, sending material from one part of the inner Solar System to another (Shober *et al.*, 2020). Thus, it is extremely important to understand the encounter mechanisms as it can improve our estimation of object size-flux frequency.

As meteor network monitoring systems have been expanding worldwide, an ever increasing precision in trajectory computations is allowing better constraints of dynamical and physical properties characterization, mainly when large events such as superbolides and Earth-grazings are registered. So, many citizen science projects such as MOROI, FRIPON, EXOSS and networks elsewhere (for more details see Anghel *et al.*, 2019; Colas *et al.*, 2020; De Cicco *et al.*, 2018) are playing a fundamental role in identification and orbit evaluation of potential grazing fireballs events.

2. THE EARTH-GRAZING FIREBALL PROBLEM

Meteoroids Meteoroids originate from cometary debris or dust and grains from fractured NEOs, and depending on their brightness levels during the atmospheric penetration they can be: meteors, bolides (absolute magnitude ≤ -4) or superbolides (absolute magnitude ≤ -12). Tiny meteoroids (below 0.01 m) and ones with low bulk density at height velocities, above hypersonic limits during air penetration are completely destroyed. Occasionally, parts of a hard material of meteoroids with centimeter to meter sizes can survive the ablation and leave meteorites or even return to space as grazing fireballs.

If a meteoroid has a trajectory through the Earth's atmosphere at a low-angle, almost tangentially, in a way that part of its own material survives ablation phenomena and returns to interplanetary environment we have a typical grazing fireball (bolide or superbolide type). The Figure 2 displays a graphic scheme for the geometry of a close encounter passage.

Many grazing fireballs have been registered, thanks to growing amateur citizen science projects dedicated to meteors video registering (Anghel *et al.*, 2021). However, the first scientific observation dates back to the seventies, when a daylight bolide crossed United States and Canada skies, on August 10, 1972, which trajectory was 1500 km long (usual luminous meteor track ≤ 100 km), with an estimated initial mass of 10^5 to 10^6 kg (Ceplecha, 1979).

The grazing fireball phenomena have been reported for a long time, e.g. in

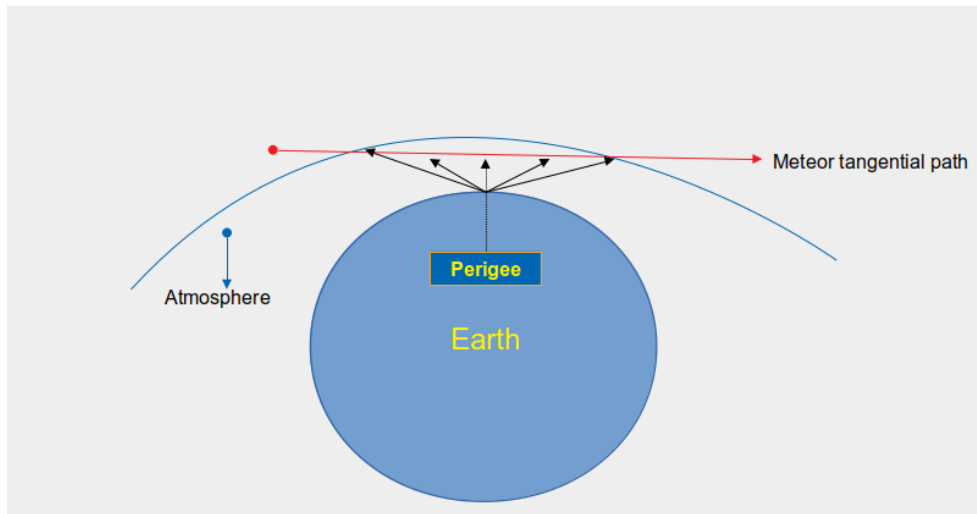


Fig. 2 – A grazing meteoroid enter tangentially in the Earth’s atmosphere and return to space.

1784 “The Great Meteor” was observed, moving in a path more than 160 km, in 1860 another grazing was observed (Olson *et al.*, 2010), last century the “Great Meteor procession” crossed North and South America continents (Chant, 1913; Denning, 1916). Shober *et al.* (2020) made a summary of Earth-grazings scientifically observed that we updated and reproduce at the following list:

- On August 10, 1972, a daylight Earth-grazing fireball crossed the United States and Canada, registered photographically (Ceplecha, 1979).
- On October 13, 1990, grazing fireball crossing East Europe (Borovicka and Ceplecha, 1992).
- On October 1992, Meteorite Peekskill, over the eastern United States (Ceplecha *et al.*, 1996).
- On 2003, Ukraine grazing meteor (Kozak and Watanabe, 2017).
- On March 29, 2006, a grazing over Japan (Abe *et al.*, 2006).
- On August 27, 2007, the grazing was observed by the European Fireball Network (Spurný *et al.*, 2008).
- On June 10, 2012, the first grazing associated with a meteor shower in the scientific literature, daytime ρ - *Perseids* shower (Madiedo *et al.*, 2016).
- On March 31, 2013, a grazing meteor over Germany and Austria (Oberst *et al.*, 2014).

- On December 24, 2014, a grazing fireball over Algeria, Spain and Portugal (Moreno *et al.*, 2016).
- July 7, 2017, the Desert Fireball Network observed a grazing fireball that travelled over 1300 km through the atmosphere above Western Australia and South Australia (Shober *et al.*, 2020)

The Earth-grazings have a luminous path of hundred to thousands of kilometers moving tangentially through the atmosphere, however, their analyses with the standard assumptions of meteor trajectory (≈ 100 km) could bring unrealistic dynamic effects. So, a special method was proposed by Borovicka and Ceplecha (1992) that can be applied to long grazing meteors such as the October 13, 1990 fireball that after an observed trajectory (> 400 km) it returned to interplanetary space.

2.1. THE EN131090 OCTOBER 13, 1990 EARTH-GRAZING FIREBALL

The second Earth-grazing fireball scientifically registered (Borovicka and Ceplecha, 1992) occurred on October 13, 1990. It was observed by three independent observers in Czechoslovakia, a radio reflection obtained in Denmark and a photographic report done by two European Fireball Network stations (denoted as bolide EN131090). An all-sky photo of the luminous track during flight is presented in Fig. 3.

This grazing meteoroid had an estimated initial mass of 44 kg, losing only 0.35 kg, with a maximum brightness of -6.45 absolute magnitude and an almost constant velocity of 41.74 ± 0.24 km \cdot s $^{-1}$, during all luminous paths it travelled about 409 km. The remaining material went out into interplanetary space with solidified fusion crust on its surface.

We developed a python code from FORTRAN program of Olson *et al.* (1991) that simulate the Earth-grazing meteoroids, during the atmospheric flight, it can predict the bolide trajectory as it goes down, reaches perigee and returns to the interplanetary environment, including gravitational attraction that bends long-duration moving on nearly-tangential paths. It was used to simulate the October 13, 1990 Earth-grazing fireball EN131090 and the outputs: relative time, ground track, height, speed, deceleration, mass loss and visual magnitude are in good accordance with the observations.

Borovicka and Ceplecha (1992) fitted 88 time marks observations of the meteoroid EN131090 inside a time interval of 6.9 seconds, hence it was possible to make precise calculations of absolute magnitude, velocities and decelerations. Since the brightness only varied from a minimum of $M: -5.96$ to a maximum of $M: -6.45$ during the perigee approach, the velocity, $V: 41.74 \pm 0.24$ km \cdot s $^{-1}$, is considered constant, and with the air drag deceleration determined at perigee point, the authors

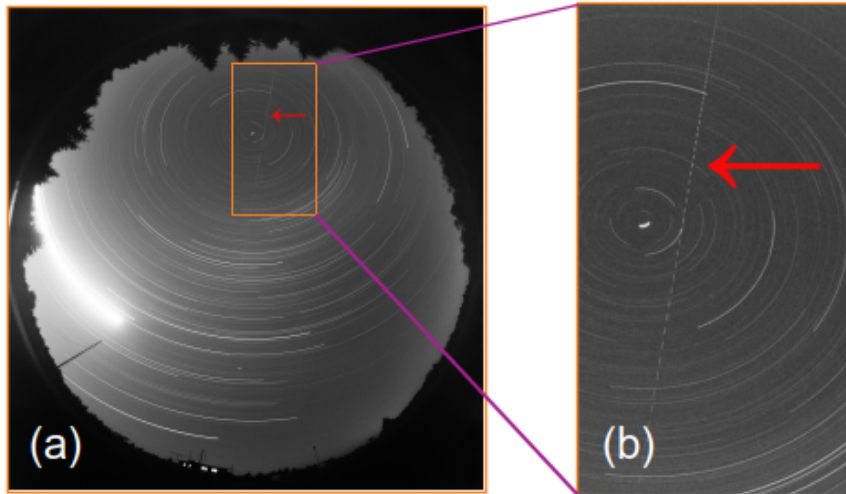


Fig. 3 – Figures: (a) An All-sky picture using a fish-eye objective Zeiss Distagon 3.5/30 mm of the grazing bolide EN131090 that flew above Czechoslovakia and Poland on October 13, 1990, and captured by the hydro-meteorological station at Červená hora, situated that time at Czechoslovakia, originally taken from a glass photographic plate. (b) The zoomed image shows the interrupted trackings by a shutter at 12.5 rps, pointed by a pos-inserted red arrow. Credits: European Fireball Network - RNDr. Pavel Spurný, CSc, Astronomický ústav AVČR.

conclude that the fireball is likely an ordinary chondrite, with an initial mass of 44 kg and a mass loss of 0.35 kg.

Using the parameters discussed above related to velocity, mass and meteoroid's most probable composition, we run the code generating outputs that describe in good agreement the brightness, heights and mass loss. Figure 4 displays two plots with physical characterization, showing that the observed luminous path of the grazer losses almost 0.2% of its mass, reaching an absolute magnitude around -6.40, during the perigee approach at height ≈ 100 km.

2.2. A SYMPLECTIC INTEGRATOR SCHEME FOR CLOSE ENCOUNTERS STUDIES

To investigate the astrodynamical characteristics of a grazer, we need to implement a numerical integration of backward and forward time that can predict the orbital parameters before/after the closest approach, in order to help to answer two main questions that emerged from this topic:

1. If a meteoroid becomes an Earth-grazing fireball (and it grazes the Earth's atmosphere), it comes back, escapes or collide with Earth in time? (The answer

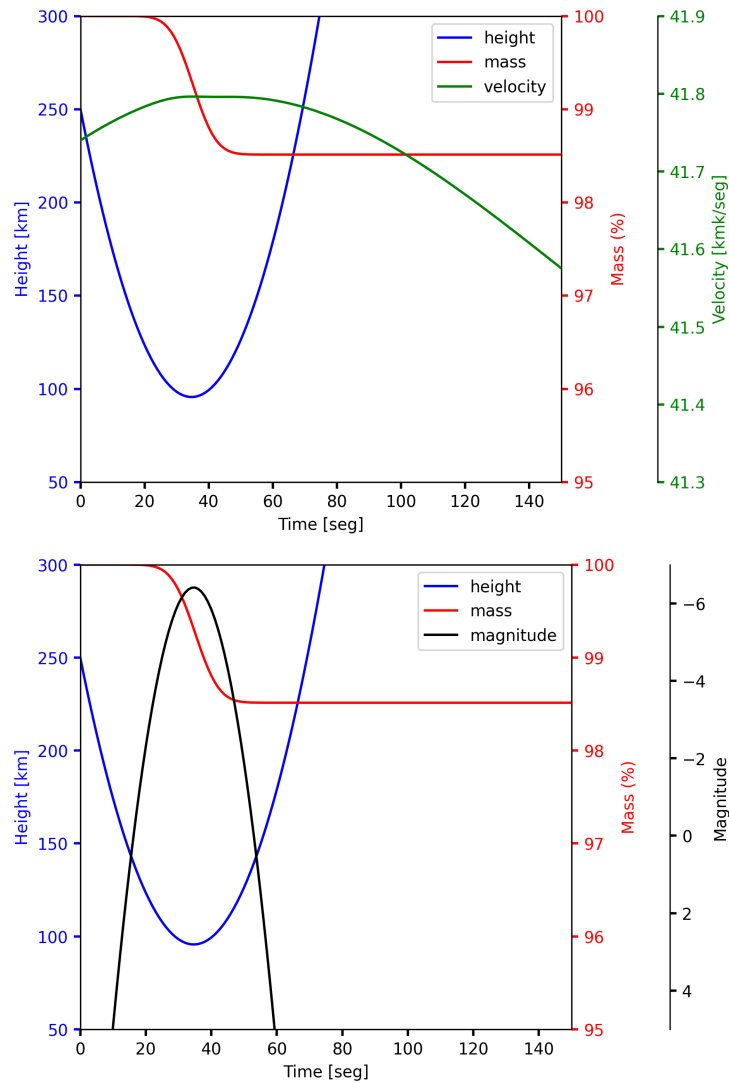


Fig. 4 – During the atmospheric path, the meteoroid EN31090 loose ≈ 0.35 kg of mass, during the 409 km of observed luminous path, then returning to space. The simulation results show in the upper plot an almost near constant velocity (green curve) with an abrupt slope (in red color) of mass around perigee point, in its descend journey (blue color). In the bottom plot the absolute magnitude (black curve) as the bolide is ablated.

depends on the meteoroid's orbit after the Earth-grazing moment).

- Analysing the meteoroid's orbit before the Earth-grazing moment, could we say if it had close encounters in the past?

Some integrators are better suited to simulate close encounters than others, for example, the non-symplectic integrator IAS15 has an adaptive timestep scheme that resolves close encounters very well (Rein and Spiegel, 2015). Whereas integrators that use a fixed time-step like WHFast are more likely to miss close encounters (Rein and Tamayo, 2015). During the close approaches to the Earth, the meteoroid’s orbit is continuously perturbed by the planet’s gravity.

At the same time, a core problem arises particularly for orbit integrations, as we observe the “hop-phenomenon” (Szenkovits *et al.*, 2002; Csillik, 2003) during a close encounter at time interval $t_1 - t_2$ when at the moment t_1 , we notice the meteoroid’s orbital parameters before the perturbation effect of the Earth and at the moment t_2 , we observe the meteoroid’s orbital parameters after the close encounter with Earth.

So, two numerical integrators to simulate the long term gravitational dynamics of a meteoroid were tested and analyzed: a non-separable fourth-order symplectic integrator (Neri, 1987; Szücs-Csillik, 2010; Anghel *et al.*, 2021; De Ciccio and Szücs-Csillik, 2022) (Neri integrator) and the implicit integrator with adaptive time stepping, 15th-order modified Runge–Kutta integrator (IAS15), incorporated in the package REBOUND (Rein and Spiegel, 2015). As it is generally known, the numerical integration methods which inherit the symplecticity of a differential equations tend to better approximate the trajectory of a symplectic differential equation.

Moreover, the fourth-order symplectic integrator scheme is time reversible because it is symmetric. It is common knowledge that time reversibility is important, it ensures the two first integrals, *i.e.* the conservation of energy and area preserving.

Therefore, in order to answer the two main questions purposed, facing the “hop-phenomenon” a study of the case of the EN131090 grazer was chosen because it has very precise trajectory values defined. Its orbital elements from Borovicka and Ceplecha (1992) listed in Table 1 show that during the approach with the Earth the semi-major axis decrease from 2.72 ± 0.08 to 1.87 ± 0.03 AU, causing a considerable reduction of the period and eccentricity (Clark and Wiegert, 2011). Thus, it is suitable to test the symplectic integrators mentioned above, applying before initial conditions (IC) for the retrograde integration and the after IC for prograde integration, analysing possible close encounters and collision studies.

2.3. THE METEOROID’S ORBIT BEFORE AND AFTER CLOSE ENCOUNTER WITH EARTH

Let us take a coordinate system x, y, z with its origin at Earth’s center. We are considering perturbations due to the oblateness of Earth, the atmospheric drag and the lunisolar attraction. The differential equations of meteoroid motion in rectangular coordinates have the form:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{\partial U}{\partial x},$$

Table 1

Elements of the EN131090 meteoroid before and after from Borovicka and Cepelcha (1992) updated for J2000.0

Heliocentric orbits parameters (J.2000.0)		
	before	after
α_G	$97^\circ.67 \pm 0^\circ.01$	$97^\circ.28 \pm 0^\circ.01$
δ_G	$-40^\circ.58 \pm 0^\circ.01$	$-36^\circ.34 \pm 0^\circ.01$
v_G	$40.22 \pm 0.17\text{km/s}$	$40.22 \pm 0.17\text{km/s}$
a	$2.72 \pm 0.08\text{AU}$	$1.87 \pm 0.03 \text{ AU}$
P	$4.5 \pm 0.2\text{yr}$	$2.56 \pm 0.06\text{yr}$
e	0.64 ± 0.01	0.473 ± 0.009
q	$0.9923 \pm 0.0001 \text{ AU}$	$0.9844 \pm 0.0002 \text{ AU}$
Q	$4.45 \pm 0.15 \text{ AU}$	$2.76 \pm 0.07\text{AU}$
ω	$9^\circ.60 \pm 0^\circ.01$	$16^\circ.60 \pm 0^\circ.02$
Ω	$18^\circ.973$	$19^\circ.672$
i	$71^\circ.39 \pm 0^\circ.02$	$74^\circ.40 \pm 0^\circ.02$

$$\begin{aligned} \frac{d^2y}{dt^2} &= \frac{\partial U}{\partial y}, \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= \frac{\partial U}{\partial z}, \end{aligned} \quad (1)$$

where,

$$U = U_{00} + U_{20} + U_{22} + U_{30} + U_{31} + U_{32} + U_{33} + U_{40} + U_{50} + U_A + U_{RP} + U_{LS}, \quad (2)$$

and the particular terms are respectively

$$\begin{aligned} U_{00} &= \frac{\mu}{r}, \\ U_{20} &= \frac{1}{2}\mu R^2 c_{20} \cdot \left(\frac{3z^2}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right), \\ U_{22} &= 3\mu R^2 \left[\left(\frac{x^2 - y^2}{r^5} c_{22} + \frac{2xy}{r^5} s_{22} \right) \cos 2s + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{2xy}{r^5} c_{22} - \frac{x^2 - y^2}{r^5} s_{22} \right) \sin 2s \right] \\ U_{30} &= \frac{1}{2}\mu R^3 c_{30} \cdot \left(\frac{5z^3}{r^7} - \frac{2z}{r^5} \right), \\ U_{31} &= \frac{3}{2}\mu R^3 \left[\left(\left(\frac{5xz^2}{r^7} - \frac{x}{r^5} \right) c_{31} + \left(\frac{5yz^2}{r^7} - \frac{y}{r^5} \right) s_{31} \right) \cos s + \right. \\ &\quad \left. + \left(\left(\frac{5yz^2}{r^7} - \frac{y}{r^5} \right) c_{31} - \left(\frac{5xz^2}{r^7} - \frac{x}{r^5} \right) s_{31} \right) \sin s \right], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
U_{32} &= 15\mu R^3 \left[\left(\left(\frac{(x^2 - y^2) \cdot z}{r^7} \right) c_{32} + \left(\frac{2xyz}{r^7} \right) s_{32} \right) \cos 2s + \right. \\
&\quad \left. + \left(\left(\frac{2xyz}{r^7} \right) c_{32} - \left(\frac{(x^2 - y^2) \cdot z}{r^7} \right) s_{32} \right) \sin 2s \right], \\
U_{33} &= 15\mu R^3 \left[\left(\left(\frac{x \cdot (x^2 - 3y^2) \cdot z}{r^7} \right) c_{33} + \left(\frac{y \cdot (3x^2 - y^2)}{r^7} \right) s_{33} \right) \cos 3s + \right. \\
&\quad \left. + \left(\left(\frac{y \cdot (3x^2 - y^2)}{r^7} \right) c_{33} - \left(\frac{x(x^2 - 3y^2) \cdot z}{r^7} \right) s_{33} \right) \sin 3s \right], \\
U_{40} &= \frac{1}{8} \mu R^4 c_{40} \cdot \left(\frac{35z^4}{r^9} - \frac{30z^2}{r^7} + \frac{3}{r^5} \right), \\
U_{50} &= \frac{1}{8} \mu R^5 c_{50} \cdot \left(\frac{63z^5}{r^{11}} - \frac{70z^3}{r^9} + \frac{15z}{r^7} \right), \\
U_A &= -\frac{1}{2} \frac{\rho C_D A}{m} v_r \bar{v}_r, \\
U_{RP} &= p \cdot \frac{A}{m}, \\
U_{LS} &= \frac{\mu'}{r'} \cdot \left(1 + \frac{r^2}{2r'^2} \cdot (3 \cos(2\psi) - 1) \right) + \frac{\mu''}{r''} \cdot \left(1 + \frac{r^2}{2r''^2} \cdot (3 \cos(2\psi) - 1) \right),
\end{aligned}$$

where μ is the gravity constant for the Solar System (in our case $\mu = 39.4732 \text{ AU}^3/\text{year}^2$), r is the distance from the center of mass to the meteoroid, R is the equatorial radius of the Earth ($R = 0.000042 \text{ AU}$), $c_{20} = -1082.4$, $c_{22} = 0.75$, $s_{22} = -0.61$, $c_{30} = 2.57$, $c_{31} = 0.87$, $s_{31} = -0.27$, $c_{32} = 0.08$, $s_{32} = -0.09$, $c_{33} = -0.07$, $s_{33} = 0.129$, $c_{40} = 2.01$, $c_{50} = 0.07$ are zonal and tesseral coefficients, s is the argument of latitude, and ρ is the atmospheric density, C_D is the drag coefficient, A/m is the cross-section to the mass of meteoroid ratio, v_r is the meteoroid velocity vector relative to atmosphere, and p is the solar light pressure at the distance of one AU, μ' , μ'' are the masses of the disturbing bodies (Moon, Sun) multiplied by the gravitational constant, r' , r'' are the radius vectors of the disturbing bodies, ψ is the Sun-Moon distance angle as seen from the Earth.

Let us consider the simple exponential atmospheric model

$$\rho = \rho_p \exp\left(\frac{r_p - r}{H}\right), \quad (4)$$

where ρ_p is the density at the initial perigee point, obtained via the NRLMSISE-00 model (Picone *et al.*, 2002), r_p is the initial distance of the meteoroid from Earth's surface and H is the scale height. Let us denote $B = \frac{m}{C_D A}$ the Ballistic coefficient, and we assume that the atmosphere rotates at the same angular speed as the Earth.

Then, the relative velocity vector is

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}, \quad (5)$$

where $\boldsymbol{\omega}$ is the initial rotation vector of the Earth around the z axis with $\omega_e = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. The relative velocity vector is $\mathbf{v}_r = (v_x + \omega_e y, v_y - \omega_e x, v_z)$.

3. NUMERICAL INVESTIGATION: RESULTS

An Apollo-type orbit of the meteoroid EN121090 was obtained (see Figures 5 and 6) based on the integration of differential equations of motion (3) using the high accuracy non-symplectic integrator with adaptive time-stepping (IAS15) and the Neri's symplectic 4th order integrator (Rein and Spiegel, 2015; Csillik, 2004).

The semi-major axis is used to compute the total energy of the orbit and together with eccentricity allows us to compute the angular momentum (see Table 1). The meteoroid's angular position in the orbit at a given epoch is defined by the true anomaly. For that reason, the semi-major axis, the eccentricity, and the true anomaly give information about the size and shape of the meteoroid's orbit, and its location in the orbital plane (Roy, 1988; Seidelmann, 1992; Vallado, 2013). This close approach of EN131090 meteoroid to the Earth changed its orbital elements in such a way that possible future encounters could not be independent of the occurrence of the previous one, given the concept of resonant returns explained in the subsection 1.1.

As shown in Figure 5, the meteoroid's inclination angle is almost perpendicular to the ecliptic. We marked its trajectory before the close approach to the Earth with blue colour, which shows it dancing around the Earth in an elliptical orbit. According to the authors, this dancing around Earth's orbit would have led to a close approach sooner or later. The trajectory marked in red is the orbit after a close encounter with Earth. It is noticeable how much the proximity of the Earth affected the EN131090 meteoroid's orbit as if it was thrown out. Between the Mars-Jupiter region, the meteoroid's aphelion moved closer to Jupiter's orbit, but its perihelion remained close to Earth.

Based on our numerical integration, this means that its 2.5-years return is worth tracking. Due to the precessional movement of the meteoroid's orbit, its perihelion slowly moves away from the Earth's orbit for our 1000-year simulation period (see Figure 5) The meteoroid's orbit is slowly shifting in the direction of the orbit of Mars. If it gets closer to Mars, the meteoroid's orbit may be affected by the planet, changing its orbital elements.

Using the same data available in Table 1, we run the IAS15 integrator of the REBOUND package, repeating the same 1000 years back/forward integrations for close encounters to Mars, Venus, Mercury and Jupiter, to try to find out minima approaches that could affect the orbital shape of the meteoroid.

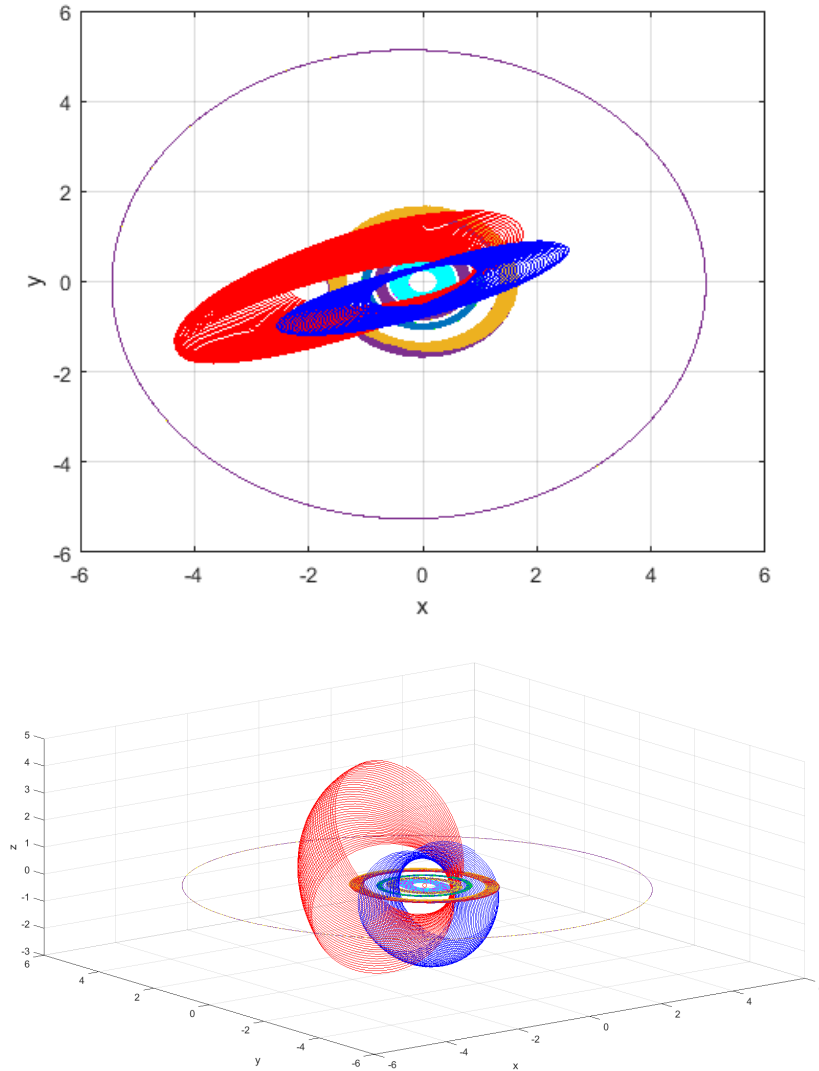


Fig. 5 – The EN131090 meteoroid orbit - before and after - using Neri 4th order integrator, and its relative position to the orbits of Mercury, Venus, Earth, Mars and Jupiter.

In Figure 7 the two plots of semi-major axis present variations for 1 000 years, backward and forward in time, using initial conditions of pre and post encounter described in Table 1. The variations are more than 10% which show that the meteoroid orbit is influenced by Earth (and less degree by Mars) enough to be perturbed.

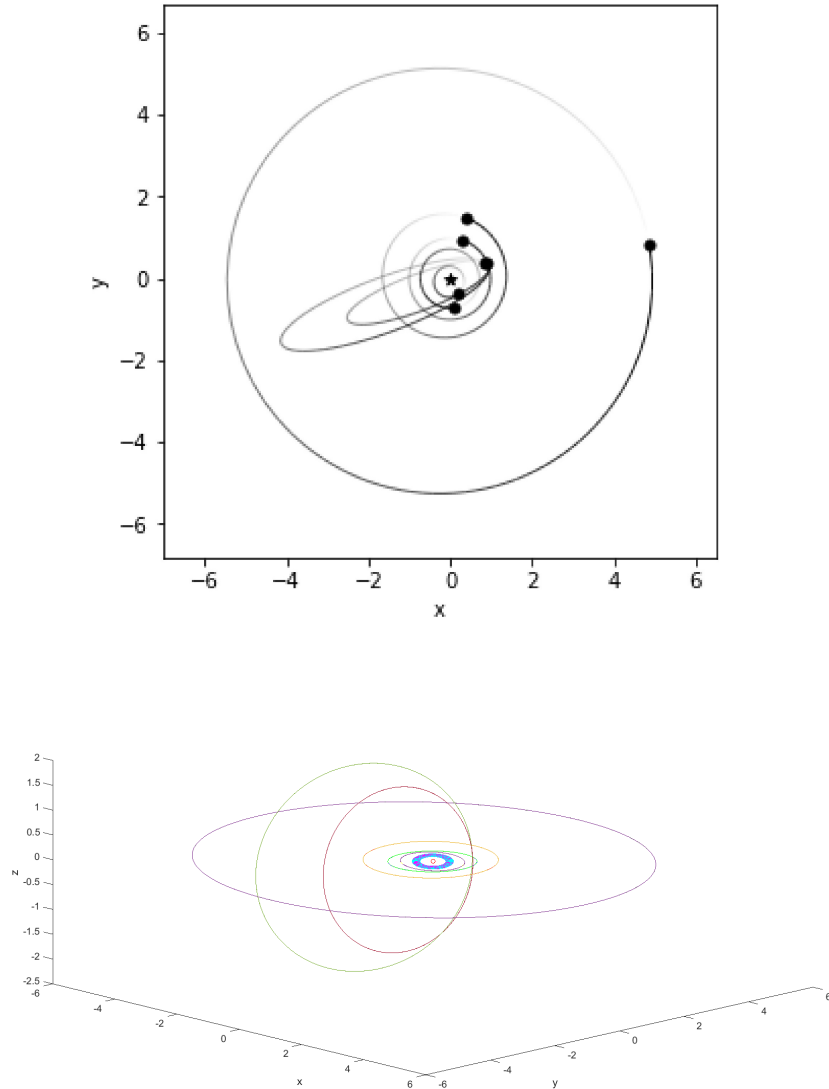


Fig. 6 – The EN131090 meteoroid orbit (projected to the ecliptic plane) before and after orbits using Rebound n -body integrator, and its relative position to the orbits of Mercury, Venus, Earth, Mars and Jupiter.

The simulations showed that among the planets mentioned above, the object had a close approach only with the Earth. Backward integration found only an encounter 706.97 years back, at 0.277549 AU distance and the forward integration got a minimum approach of 0.060304 AU from 74.007 years after the grazing event, those

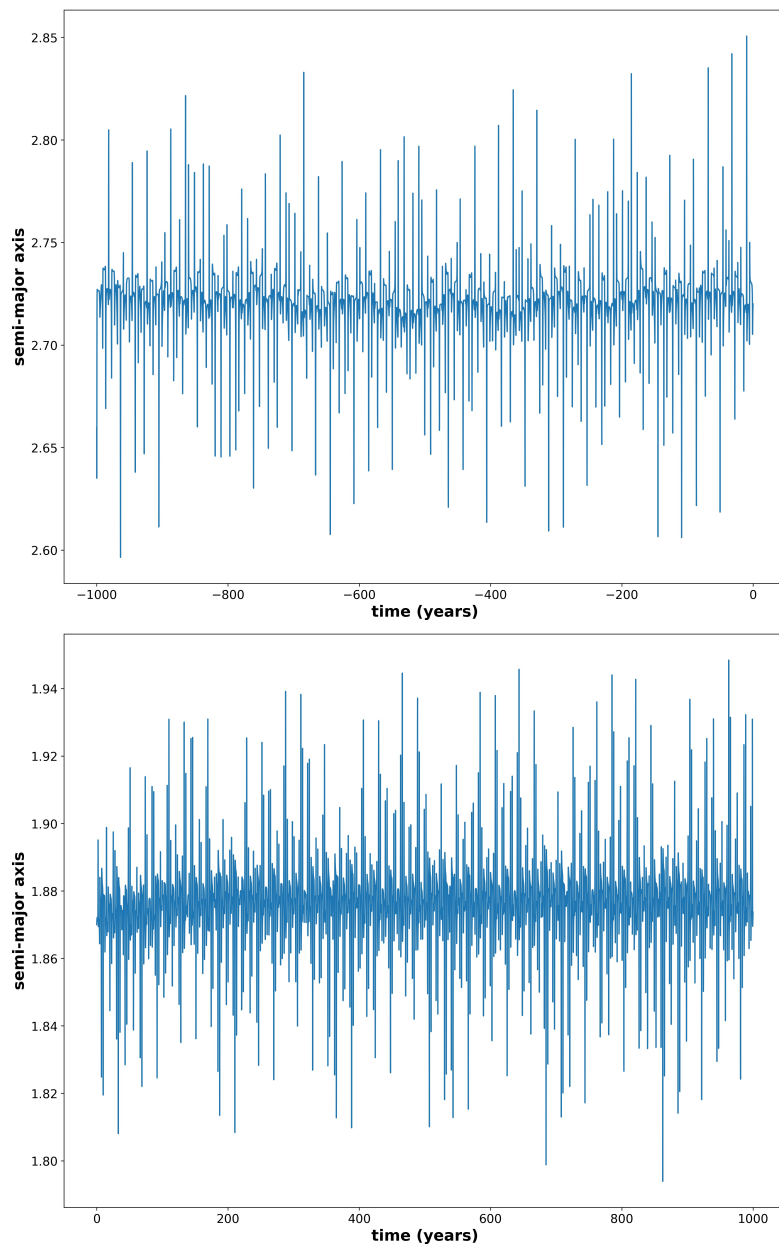


Fig. 7 – The EN131090 meteoroid semi-major axis variations in backward (upper plot) and forward integration (bottom plot) for 1 000 years .

closest distances are plotted in the Figure 8.

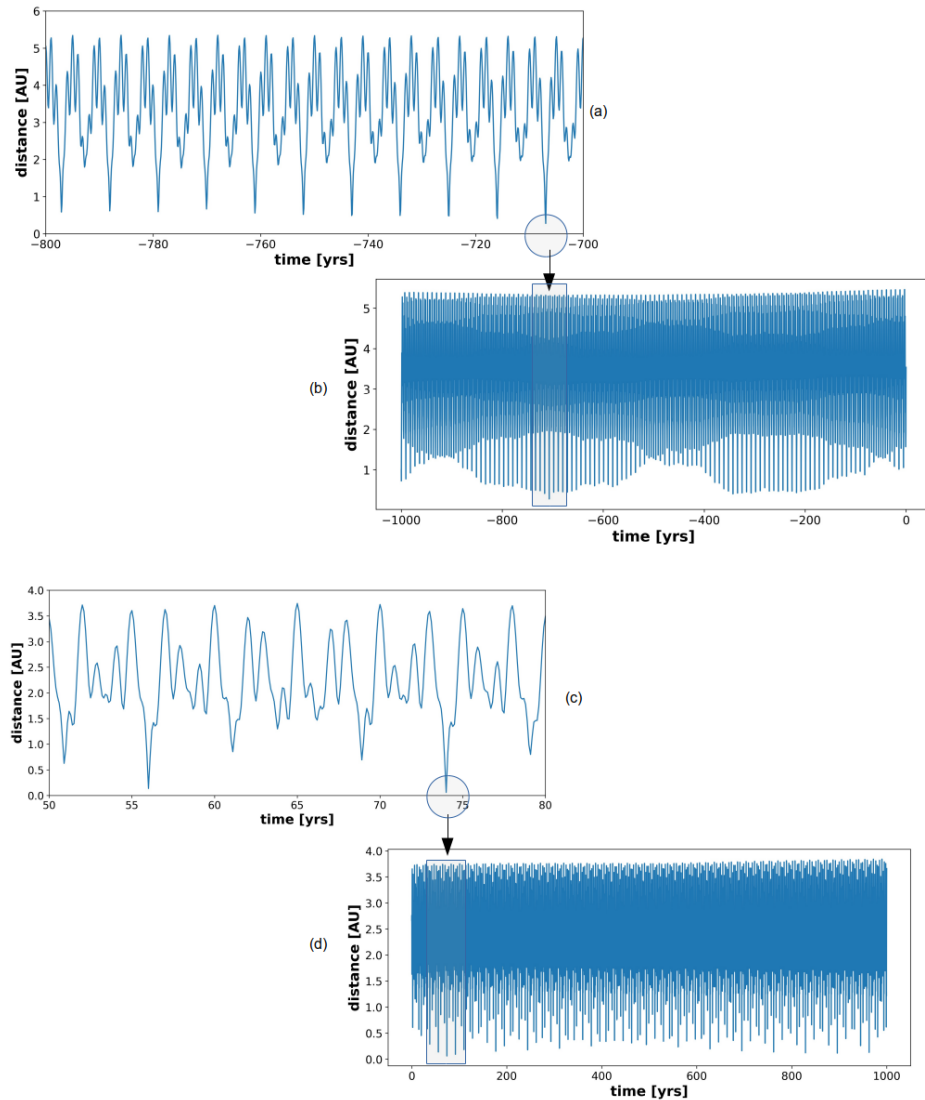


Fig. 8 – The EN131090 meteoroid distance approaches with planet Earth. In Upper plot (a) is a zoomed graph from (b) emphasizing the approach 706.97 years before grazing event, the two bottom plots (c)-zoomed and (d), respectively, show the approach 74.007 years after the grazing event.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

Is it possible to predict forward and backwards in time the close approach of a meteoroid, if we observe it as an Earth-grazing fireball?

Approximately every 2.5 years, the EN131090 meteoroid-object returns to the

same place in the Solar System around where the 1990 encounter occurred. The period is not known precisely enough to predict when the next encounter between the two will occur.

Using Rebound and symplectic integrators - which are useful in close encounters problems - we studied the before and after orbits of the Earth-grazing fireball EN131090. Modelling and simulating such an observed event we investigated if we can predict the future or the past close approaches of this object with Earth.

Our investigation shows that it is somehow impossible to give an accurate prediction because the object's trajectory could intersect the orbits of other objects, which means that the object's orbit is depending on indeterminate perturbations.

If a small object approaches closer to another object (*i.e.* asteroid, satellite, planet, etc.) at t_0 , its trajectory will be perturbed, and its orbit after t_0 will change. Unfortunately, these unforeseen perturbations made the prediction imprecise.

As described above, NEOs are a real threat for the life on Earth. The geological and biological history of our planet is punctuated by evidence of repeated, devastating cosmic impacts, and as a consequence, asteroid detection is becoming a key topic in astrodynamics. In conclusion, the body's positions at all intermediate steps must be computed in order to arrive at an accurate final configuration.

Furthermore, by systematically observing these Earth-grazing fireballs, carefully storing the data of detailed observations in huge databases, and studying their particular dynamic descriptions, their common behaviour can be recognized in the future with the help of artificial intelligence and machine learning. These tools can aid to better predict the behavior of the objects, and avoid future threats.

Acknowledgements. The author acknowledges the Europlanet 2024 RI project funded by the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme.

REFERENCES

- Abe, S. Borovicka, J., Spurny, P., Koten, P., Ceplecha, Z., Tamagawa, T.: 2006, Earth-grazing fireball on March 29, 2006. European Planetary Science Congress 2006, 486.
- Anghel, S., Birlan, M., Nedelcu, D.-A., Boaca, I.: 2019, *Romanian Astron. J.* **29**, 189.
- Anghel, S., Szücs-Csillik, I., Nedelcu, D. A., Boacă, I., Birlan, M.: 2021, *Romanian Astron. J.* **31**, 153.
- Borovicka, J., Ceplecha, Z.: 1992, *Astron. and Astrophys.* **257**, 323.
- Bottke, W.F., Norman, M.D.: 2017, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **45**, 619.
- Boslough, M.: 2015, Asteroid Airbursts: Risk Assessment and Reduction. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Boslough, M., Brown, O., and Harris, A.: 2015, Updated population and risk assessment for airbursts from near-earth objects (NEOs), IEEE Aerospace Conference, p. 1.
- Ceplecha, Z.: 1979, *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia* **30**, 349.
- Ceplecha, Z., Brown, P., Hawkes, R. L., Wertherill, G., Beech, M., Mossman, K.: 1996, *Earth Moon*

- and *Planets* **72**, 395.
- Chant, C. A.: 1913, *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* **7**, 145.
- Chesley, S. R., Chodas, P. W., Milani, A., Valsecchi, G. B., Yeomans, D. K.: 2002, *Icarus* **159**, 423.
- Clark, D. L., Wiegert, P. A.: 2011, *Meteoritics & Planetary Science* **46**, 1217.
- Colas, F. *et al.*: 2020, *Astron. Astrophys.* **644**, A53.
- Csillik, I.: 2003, *Metode de regularizare in mecanica cerească*, Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca.
- Csillik, I.: 2004, *Technische Mechanik* **24**, 67.
- De Cicco, M., Lazzaro, D., Santiago, E. P., Exoss Team: 2018, Brazilian video monitoring meteors network EXOSS: Status and first results—a citizen science project. Proceedings of the International Meteor Conference, 162–164.
- De Cicco, M., Szücs-Csillik, I.: 2022, An earth-grazing fireball case: simulating close encounters using Rebound Python package and a 4th order Symplectic Integrator, Theory, Observations and Data Processing in Astronomy, Astrophysics, Space and Planetary Sciences, International conference, 6-8 July 2022, Cluj-Napoca, Romania.
- Denning, W. F.: 1916, *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* **10**, 294.
- Kozak, P. M., Watanabe, J.: 2017, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **467**, 793.
- Madiedo, J. M., Espartero, F., Castro-Tirado, A. J., Pastor, S., de los Reyes, J. A.: 2016, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **460**, 917.
- Milani, A., Chesley, S.R., Valsecchi, G.B.: 2000, *Planetary and Space Science* **48**, 945.
- Moreno-Ibanez, M. 2018. Impact hazard associated with large meteoroids from disrupted asteroids and comets. Ph.D. Thesis.
- Moreno, A., Madiedo, J. M., Zamorano, J., Goncalves, R., Esparteros, F., Trigo-Rodríguez, J.M., Ortiz, J.L., Lacruz, J., Aceituno, J., De Guindos, E., Izquierdo, J., Alonso-Azcarate, J., Sanchez de Miguel, A., Ocaña, F., Blanch, E.: 2016, Preliminary Spectroscopic and Dynamical Analysis of an Earth-Grazer Fireball Observed on December 24, 2014. 47th Annual Lunar and Planetary Science Conference.
- Neri, F.: 1987, *Lie algebras and canonical integration*, Dept. of Physics, University of Maryland.
- Nesvorný, D. 2018. Dynamical Evolution of the Early Solar System. Annual Review of Astronomy and Astrophysics **56**, 137.
- Oberst, J.D., Heinlein, D., Gritsevich, M., Lyytinen, E., Flohrer, J., Margonis, A., Lupovka, V., Dmitriev, V., Schweidler, F., Peltoniemi, J., Grau, T.: 2014, The extraordinary grazing fireball over Central Europe on March 31, 2014. European Planetary Science Congress.
- Olson, D. W., Doescher, R. L., Watson, K. M.: 1991, *Journal of the International Meteor Organization* **19**, 130.
- Olson, D. W., Olson, M. S., Doescher, R. L., Pope, A. G.: 2010, *Sky and Telescope* **120**, 28.
- Opik, E. J.: 1976, *Interplanetary encounters: close-range gravitational interactions*. Amsterdam, New York, Elsevier Scientific Pub. Co.
- Perna, D., Barucci, M.A., Fulchignoni, M.: 2013, *Astron Astrophys Rev* **21**, 65.
- Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., Aikin, A. C.: 2002, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **107**, id. 1468.
- Rein H., and Spiegel, D.S.: 2015, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* , **446**, 1424.
- Rein H., and Tamayo, D.: 2015, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **452**, 376.
- Roy, A.E.: 1988, *Orbital motion*, Bristol, England UK.
- Seidelmann, P.: 1992, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, University Science Books, Mill Valley, CA.
- Shober, P. M., Jansen-Sturgeon, T., Sansom, E.K., Devillepoix, H.A.R., Towner, M.C., Bland, P.A., Cupák, M., Howie, R.M., Hartig, B.A.D.: 2020, *Astron. J.* **159**, 191.
- Spurný, P., Borovicka, J., Ceplecha, Z., Shrubný, L.: 2008, *Asteroids, Comets, Meteors* **1405**, 8217.
- Szenkovits, F., Makó, Z., Csillik, I., Bálint, A.: 2002, *Pure Mathematics and applications* **13**, 463.

- Szücs-Csillik, I.: 2010, *Romanian Astron. J.* **20**, 49.
- Tommei, G.: 2021, *Universe* **7**, 103.
- Vallado, D.A.: 2013, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, 4th edition, Microcosm Press, Hawthorne, CA.
- Valsecchi, G.B., Milani, A., Gronchi, G.F., Chesley, S.R.: 2003, *Astron. Astrophys.* **408**, 1179.
- Zieliński, J. B.: 1968, *Prace Naukowe Geodezja*, **1**, 7.

4.3 Um possível fragmento de um ACO

Usando os dados da tabela 1 em De Cicco and Szücs-Csillik (2022), calculamos o T_j do bólido, encontrando o valor de 2.27, pré encontro com a Terra, o que mostra que a dinâmica antes de seu *fly-by* era de um objeto em órbita típica cometária, modificando seu a para 0.99 U.A. e q para 0.98 U.A, pós encontro, enquadrando-se na órbita de classe Apolo.

Considerando sua alta inclinação, não usual para um NEA e seu período orbital menor que 20 anos ($P = 4.5 \pm 0.2$ anos) ele pode ser de originário da família de JFC.

Aplicando os conceitos e algoritmos de matching entre NEOs e chuvas (vide Capítulo 3), não foi possível encontrar qualquer associação, mesmo acima de 20% do *threshold* adotado. Frisamos que seria uma tarefa difícil fazer qualquer associação, porque teríamos de obter órbitas atuais observadas, o que demandaria encontrá-lo hoje em dia e manter follow-up observacional.

Este *grazing* apresenta uma órbita peculiar, com uma inclinação de $71^\circ.39$ (antes) e $74^\circ.40$ (depois), apresentando um valor de Tisserand em relação à Júpiter que sugere a origem cometária ao invés de asteroidal. Mas a classificação pelo critério de Ceplecha (Ceplecha and McCrosky, 1976) indica ser um condrito ordinário tipo I conforme o estudo de Borovicka and Ceplecha (1992), reforçando o parentesco com um asteroide (na tabela 2.2 do Capítulo 2 apresentamos características de densidade e porosidade dos condritos) e os resultados de nossa modelagem, durante seu trânsito atmosférico, que corroboram as propriedades físicas de um corpo rochoso.

É possível que encontros próximos com a Terra e, em menor escala, perturbações com o planeta Marte, possam, ao longo de milhares de anos ter modificado sua órbita aumentando sua inclinação, tornando sua dinâmica orbital típica de um cometa.

Capítulo 5

Conclusões Gerais e Perspectivas

O principal objetivo desta tese foi identificar asteroides em orbita tipo cometária com possibilidade de parentesco com alguma chuva de meteoros conhecida. Dentre os principais resultados obtidos foi possível identificar corpos com ligações parentais e enxames de meteoroides, como os complexos asteroides-meteoroides.

Conforme discutido nos Capítulos 1 e 3, a mera aplicação do critério de Tisserand, $T_J = 3.0$, não é adequada como limite dinâmico entre cometas e asteroides, já que existem zonas difusas de tipificação, Como exemplo podemos citar os casos de 3553 Don Quixote e do P/2006 HR30, sem contar com a possibilidade de objetos com $T_J > 3.0$, serem levados à $T_J < 3.0$, devido à perturbações.

Dessa forma a investigação de possíveis conexões entre ACO à alguma chuva de meteoros permite identificar se houve atividade em algum momento de sua vida útil, indicando primariamente determinar se é um cometa.

Usando métodos estatísticos que comparam parâmetros dinâmicos e orbitais de riantes teóricos (Neslušan et al., 1998) de mais de 63 000 NEO com quase 1 710 chuvas de meteoros catalogadas, separamos 723 possíveis conexões, e destes, 67 ACO com $\leq 20\%$ de probabilidade de falso-positivo foram elencados com reais possibilidades de ligação à alguma chuva.

Apesar das ausências de propriedades físicas dos ACO separados neste estudo, restringindo-se apenas às magnitudes absolutas e algumas estimativas de albedos geométricos, foi possível estimar a possibilidade do corpo parental pertencer a um núcleo de cometa, um fragmento, mesmo inativo ou já extinto, devido à sua possível ligação com uma chuva de meteoros.

Do resultado destas associações, separamos as mais relevantes para fins de nosso

estudo, elas apresentam, respectivamente, ligações com 3 complexos asteroides-meteoroides: (a) Kappa Cygnids, (b) Quadrantids e (c) Alpha-Draconids com possibilidade da vinculação dos ACO a estes complexos devido à alguma origem cometária.

Usando métodos de integrações numéricas para trás no tempo, foi possível identificar indícios de uma mesma origem parental dos ACO 2015 GD, 2002 GJ8, 2008 ED69 e 2020 HU6, do complexo Kappa Cygnids, pois apresentaram, em combinações aos pares, $D_{SH} < 0.05$, no mesmo período em torno de -5 000 anos passados.

Quanto ao rasante EN131090 com uma órbita pre-encontro classificado como tipo ACO, apesar de estudos de seu brilho e coeficiente de ablação por Borovicka and Cepplecha (1992) indicarem tratar-se de um fragmento de um corpo rochoso tipo condrito, não encontramos nenhuma chuva associada.

Usando integradores simpléticos, aplicados em problemas de encontros próximos, estudamos as órbitas antes e depois do rasante terrestre. Modelando e simulando este evento, investigamos a possibilidade de previsão de encontros próximos futuros. Entretanto, não foi possível realizar previsões precisas, pois a trajetória do objeto pode intersectar a órbita de outros objetos, o que significa que a órbita do objeto depende de perturbações indeterminadas.

Aproximadamente a cada 2.5 anos, o meteoróide EN131090 retorna ao mesmo lugar no Sistema Solar, em torno do qual ocorreu o encontro de 1990. O período não é conhecido com precisão suficiente para prever quando ocorrerá o próximo encontro com nosso planeta.

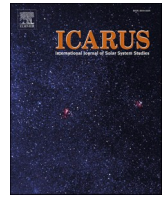
Como próximos passos devemos analisar mais objetos tipo ACO, através de integrações numéricas para trás no tempo procurando mostrar convergências entre corpos parentais. Também devemos aprimorar um algoritmo de buscas de associações que além de usar dados de NEO e de chuvas, procure diretamente em bancos de dados de forma a periodicamente atualizar novas associações com corpos parentais, podendo ser adaptado em pipeline para uso em sites como o NEOAC-ESA e MPC, enriquecendo o estudo dos pequenos corpos.

Apêndice A

Artigos Publicados

Ao longo deste trabalho foram publicados alguns artigos que são reproduzidos a seguir.

A.1 “Meteor showers from known long-period comets”



Research Paper



Meteor showers from known long-period comets

Peter Jenniskens^{a,b,*}, Dante S. Lauretta^c, Martin C. Towner^d, Steve Heathcote^e, Emmanuel Jehin^f, Toni Hanke^g, Tim Cooper^h, Jack W. Baggaleyⁱ, J. Andreas Howell^j, Carl Johannink^k, Martin Breukers^k, Mohammad Odeh^l, Nicholas Moskovitz^m, Luke Juneauⁿ, Tim Beck^o, Marcelo De Cicco^{p,q,r}, Dave Samuels^a, Steve Rau^k, Jim Albers^a, Peter S. Gural^s

^a SETI Institute, 189 Bernardo Ave, Mountain View, CA 94043, USA

^b NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 94035, USA

^c Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

^d Space Science and Technology Centre, Curtin University, Perth, WA 6102, Australia

^e Cerro Tololo Inter-American Observatory, La Serena, Chile

^f STAR Institute, University of Liège, B-4000 Liège, Belgium

^g High Energy Stereoscopic System Collaboration, Windhoek, Namibia

^h Astronomical Society of Southern Africa, Bredell, South Africa

ⁱ University of Canterbury, 20 Kirkwood Ave, Christchurch 8041, New Zealand

^j CAMS Florida, Gainesville, FL 32605, USA

^k CAMS BeNeLux, Schiefestr. 36, D-48599 Gronau, Germany.

^l International Astronomical Center, Bani Yas Street, Abu Dhabi, United Arab Emirates

^m Lowell Observatory, 1400 West Mars Hill Road, Flagstaff, AZ 86001, USA

ⁿ CAMS Arkansas, North Little Rock, AR 72118, USA

^o Mendocino College, 1000 Hensley Creek Road, Ukiah, CA 95482, USA

^p Observatorio Nacional, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ 20921-400, Brazil

^q EXOSS Citizen Science Project, Brazil

^r INMETRO, Av. Nossa Senhora das Graças 50, Duque de Caxias, RJ 25250-020, Brazil

^s Gural Software and Analysis LLC, Lovettsville, VA 20180, USA

ARTICLE INFO

Keywords:

Meteors
Meteor showers, long period
Comets, dynamics
Comets, long period
Comets, dust
Celestial mechanics

ABSTRACT

What long-period comets with orbital periods >250 years cause detectable meteor showers on Earth? Low-light video cameras are used to track the motion of $+4$ to -5 magnitude meteors in our atmosphere by triangulation and calculate the meteoroid orbit in space. In recent years, the CAMS (Cameras for Allsky Meteor Surveillance) low-light video camera network was greatly expanded and, together with other video networks, now has increased the total video meteoroid orbit database to over 2.2 million orbits. Here, we searched this database for meteor showers associated with known long-period comets. Previously, five associations were known. Now, we find 14, as well as six uncertain but likely associations. These showers show a change of longitude of perihelion with node that is a strong function of inclination. Showers of longer duration show a steeper magnitude distribution index, presumably due to aging of the meteoroid population. Showers are generally detected only if the orbital period of the comet is less than 4000 years and the Earth-Comet orbital miss distance is ≤ 0.10 AU. The lack of an associated meteor shower sets lower limits on the orbital period of poorly observed comets.

1. Introduction

Meteor showers provide information on potentially hazardous long-period comets that have yet to be discovered. It is not clear, however, under what conditions of orbital period and miss distance long-period

comets can be expected to cause annual meteor showers on Earth (Jenniskens, 2006; Vaubaillon et al., 2019).

As a dynamical class, long-period comets have orbital period $P > 250$ years (Chambers, 1997; Levison and Duncan, 1997; Fernández et al., 2016; Vokrouhlicky et al., 2019). Their orbital periods are so long

* Corresponding author at: SETI Institute, 189 Bernardo Ave, Mountain View, CA 94043, USA.
E-mail address: pjenniskens@seti.org (P. Jenniskens).

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114469>

Received 11 December 2020; Received in revised form 17 March 2021; Accepted 6 April 2021

Available online 20 April 2021

0019-1035/© 2021 Elsevier Inc. All rights reserved.

that gravitational perturbations on the comet’s orbital period prevent capture in mean motion resonances with the orbital motion of the giant planets. Meteoroids ejected by these comets are also not expected to settle into resonant orbits like those of Halley-type comets (Jenniskens, 2006; Sekhar and Asher, 2013).

The number of long-period comets with known meteor showers is small. Jenniskens (2006) listed only five confirmed associations: C/1861 G1 (Thatcher) and the April Lyrids (IAU shower #6; Jenniskens, 2008), comet C/1911 N1 (Kies) and the Aurigids (#206), comet C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock) and the eta Lyrids (#145), comet C/1739 K1 (Zanotti) and the Leonis Minorids (#22), and comet C/1852 K1 (Chacornac) and the eta Eridanids (#191). The orbital period of comets Zanotti and Chacornac are unknown.

Since that time, several low-light video camera networks have been developed to measure in great numbers the orbits of meteoroids large enough to cause visible meteors. Based on orbit clusters in early data, Greaves (2012) pointed out that comet C/1846 J1 (Brorsen) is the parent of the December sigma Virginids (#428). Greaves (2019) discussed the case of comet C/1961 T1 (Seki) and the December rho Virginids (#502). Andreic et al. (2013) proposed that C/1975 T2 (Suzuki-Saigusa-Mori) was the parent of a newly recognized shower called the lambda Ursae Majorids (#524).

Recently, comet C/1907 G1 (Grigg-Mellish) was proven to have an associated meteoroid stream called the delta Pavonids (#120). An outburst of Pavonids in 2019, caused by crossing the 1-revolution meteoroid stream of the comet, demonstrated that this comet had an orbit short enough (keeping the dust density large enough) to create a detectable meteoroid stream. The timing of the outburst was used to measure the orbital period of the comet, applying the fact that solutions for the node and orbital period of this poorly observed comet were correlated (Jenniskens et al., 2020a).

An alternative approach has been to extract similar-looking orbits near the reference orbit of a potential parent body. By this method, Segon et al. (2014) proposed new showers ##531–545, nine of which were centered on the orbit of long-period comets that passed close to Earth’s orbit. Such methods also find “showers” in a homogeneous sporadic background, so it remains unclear that these showers really exist, in the sense that the extracted meteoroids belong to the same parent body. Moreover, two of those comets have hyperbolic orbits at the epoch given, suggesting that they did not enter the inner solar system before, making them unlikely shower parents, that is unless these comets more recently were transferred to an unbound orbit (Wiegert et al., 2011). Also, a long orbital period will lower the fraction of meteoroids ejected in bound orbits (Moorhead, 2021).

In recent years, the number of video-triangulated meteors has increased so much that showers are recognized more clearly as density enhancements in the meteor radiant distribution. The radiant is the direction of the velocity vector and the apparent direction from which the

meteoroids are approaching Earth.

Here, we compare the observed time, radiant coordinates and entry speed measured by the low-light video camera networks with the expected encounter time, theoretical radiant position and entry speed of comets that pass ≤ 0.12 AU from Earth’s orbit. We considered both long-period comets with known orbital period and poorly observed comets that might be long-period comets but have only a parabolic orbit fitted to their observations. We then examined the spatial radiant density around those positions for evidence of an associated meteoroid stream.

2. Methods

The Cameras for Allsky Meteor Surveillance (CAMS) low-light video-based meteoroid orbit survey (Jenniskens et al., 2011) has been in operation since 2010 and was expanded in 2019 with several new networks in the Southern Hemisphere. New 48-camera installations of *Watec Wat902H2 Ultimate* video security cameras were established in Australia (near Perth), in Chile (near La Serena) and in Namibia (near Windhoek and Rehoboth). In addition, a small 16-camera network was established near Johannesburg in South Africa and a new 16-camera station was added in Ashburton to the two existing CAMS New Zealand stations. In total, this international network now operates about 565 low-light video cameras that triangulate the trajectories of visible meteors of +4 to -5 magnitude meteors (Table 1A). Each camera’s video feed is analyzed in an automated video surveillance-like manner. The measured radiant positions are displayed at the website <http://cams.seti.org/FDL/>. Data up to November 11, 2020, were included in our analysis, with each network’s contribution given in Table 1A.

Other video camera networks are also frequently reporting data (Table 1B). The SonotaCo network in Japan has been in operation since 2007, with the most recent data released for the year 2019 (Kanamori, 2009). The EDMOND collaboration in Europe has published meteoroid orbits up to 2016 (Kornos et al., 2013). The EDMOND orbit database includes observations of the Croatian Meteor Network (CMN) until 2015. That network has released additional data for the years 2016–2019 at the website <http://rgn.hr> (Segon et al., 2018). The CMN has evolved into the CAMS-compatible Global Meteor Network (Vida et al., 2019). The Global Meteor Network has rapidly collected meteoroid orbits starting in October 2018 (c.f., <https://globalmeteoronet.org/data/>). Data up to November 11, 2020, were included in our search.

NASA’s Jet Propulsion Laboratory maintains a database of comet orbits (<http://cneos.jpl.nasa.gov>), from which we selected those with perihelion distances between $q = 0.05$ and 1.08 AU and sidereal orbital periods longer than 250 years. We included comets that only had a parabolic orbit fitted, but we excluded comets that have nominal hyperbolic orbits at the Epoch given. We also excluded the large family of Sun-grazing comets with $q < 0.05$ AU, which can experience other

Table 1A
Number of meteors triangulated by each CAMS network.

# Network	Name	Operator	# Cameras	# Meteors
1	CAMS California	Peter Jenniskens	77	559,972
2	CAMS Florida	J. Andreas Howell	27	66,415
3	CAMS BeNeLux	Carl Johannink	76	222,509
4	CAMS Mid Atlantic	Peter Gural	6	2816
5	CAMS New Zealand	Jack Baggaley	48	73,289
6	LO-CAMS	Nick Moskovitz	64	150,902
7	UACN	Mohammad Odeh	48	62,963
8	CAMS South Africa	Tim Cooper	16	23,529
9	EXOSS	Marcelo De Cicco	7	1102
10	CAMS North. California	Tim Beck	8	9710
14	CAMS Arkansas	Luke Juneau	40	25,992
15	CAMS Australia	Martin Towner	48	59,405
16	CAMS Chile	Steve Heathcote/E. Jehin	48	109,030
17	CAMS Namibia	Toni Hanke	48	106,687
19	CAMS Texas	Walt Cooney	4	440

Table 1B
Number of meteors triangulated by other networks.

# Network	Name	Network coordinator	# Cameras	# Meteors
all	CAMS	Peter Jenniskens	~561	1,474,761
11	SonotaCo	Toru Kanamori	~100	318,173
13/12	EDMONd/ CMN	Leonard Kornos, Jakub Koukal/Damir Segon	~100	340,184
20	GMN	Denis Vida	~100	148,189

dynamical mechanisms (Sekhar et al., 2017).

The theoretical radiant from a stream of meteoroids in a comet’s orbit is calculated by adjusting the orbit so that it intersects with Earth’s orbit (Drummond, 1981). There are several ways to do that, summarized in a software program by Neslusan et al. (1998). The methods we considered are as follows: Method “Q”, which adjusts the orbit by variation of the perihelion distance, assuming close planetary encounters are responsible. Method “B” adjusts the orbit by variation of both the perihelion distance and eccentricity, minimizing the change. Method “W” adjusts the orbit by variation of the argument of perihelion, i.e. rotation of the line of apsides. This method assumes precession as the reason for the difference between meteoroid and comet orbit. Method “H” adjusts the orbit by variation of the argument of perihelion and inclination, also assuming precession as the mechanism, while method “P” is a simple parallel shift of the velocity vector.

Because we consider only orbits that pass relatively close to Earth’s, often all methods produce very similar results. When they do not, the

methods Q and B (and mostly also W) often give similar results, as do methods H and P, but both of these sets can be substantially different from one another. In cases where the results differ, we specifically indicate the method that provides the best fit to an observed shower. Neslusan et al. (1998) uses the D_{SH} -criterion (Southworth and Hawkins, 1963) to compare the original orbit to the orbit calculated that intersects Earth’s orbit. Reported D_{SH} values for the best fit method are given also.

3. Results for comet-shower associations

Large and dusty comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) passed only 0.115 AU from Earth’s orbit in 1996 and did not produce a detectable meteor shower (Beech et al., 1996). We confirm that no definitive shower is detected at the predicted positions by methods Q and H (see Fig. 1, bottom right panel).

Table 2A and 3A give the list of long-period comets that have a known orbital period and passed closer than Hale-Bopp, strictly within 0.12 AU from Earth’s orbit. We used the orbital elements at the Epoch listed in the JPL database, which in all cases is during the prior time the comet passed through the inner solar system. For each predicted shower, we plotted the observed meteor radiants in the relevant direction over a time interval of several days.

When a shower was detected, we examined each solar longitude interval of $\sim 1^\circ$ for density enhancements of radiants to identify the meteoroids that most likely belong to the stream, and we determined the shower activity period as the period over which such density enhancement was detected (Jenniskens et al., 2018). Because of the motion of

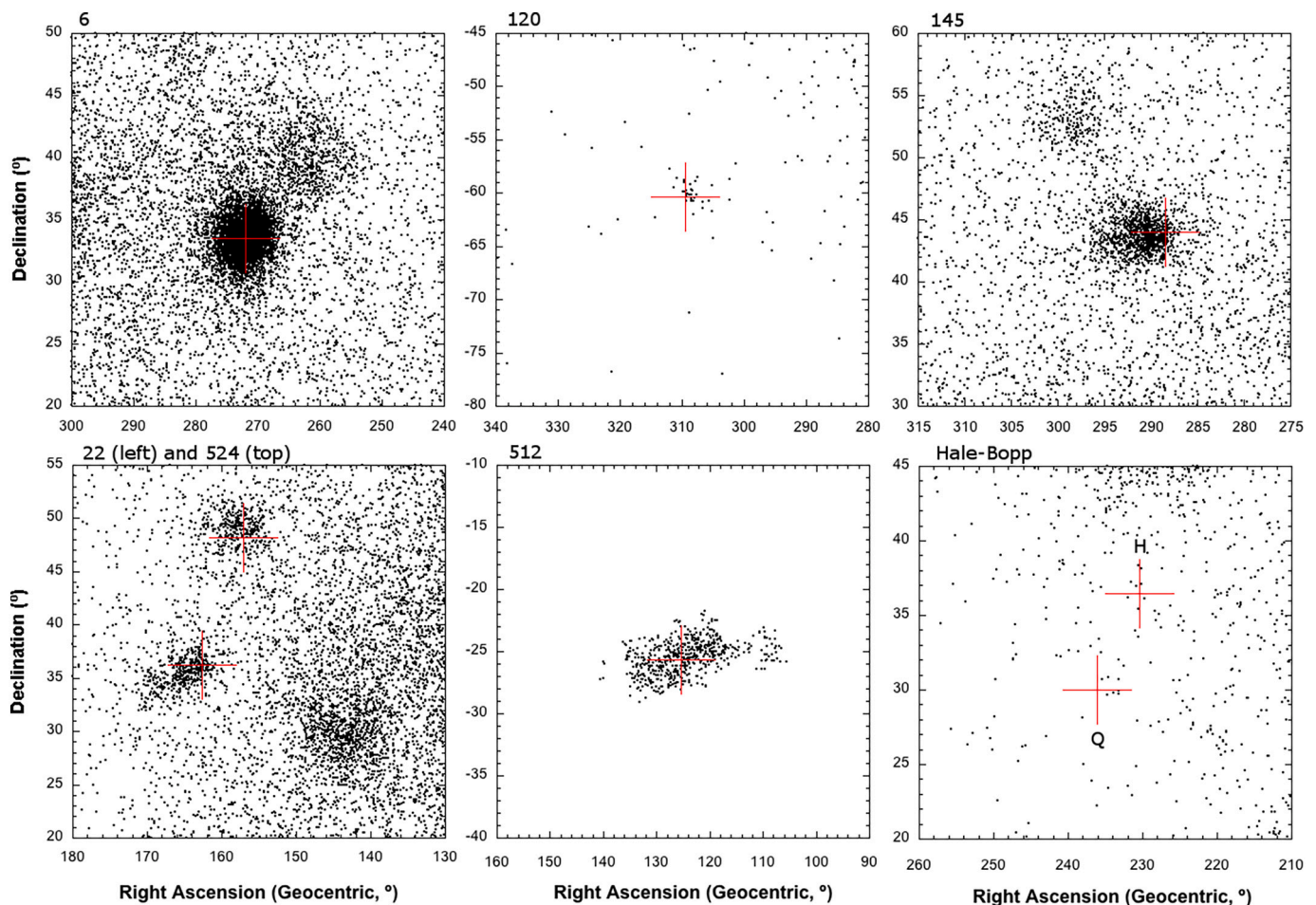


Fig. 1. Meteor radiant clusters near the theoretical radiant position of long-period comet showers found in uncrowded fields. Crosses mark the method Q solution, unless otherwise indicated. Numbers at the top of each graph are the IAU numbers of the associated showers. Other showers in the graphs are discussed in the text. Also shown is the case of comet Hale-Bopp (bottom right), which does not exhibit a clear shower.

Table 2A
Long-period comets with known orbital periods that pass within ≤ 0.12 AU from Earth's orbit.

Comet	H_{10}^a	Miss Dist. (AU)	Period (y)	Shower IAU#	Shower Name	D_{SH}	Certain
C/1846 J1 (Brorsen)	+8.1	0.049	538	428	December sigma Virginids	0.053 (P+)	Yes
C/1853 G1 (Schweizer)	+6.0	0.072	781	531	gamma Aquilids	0.070 (-P)	No
C/1861 G1 (Thatcher)	+5.5	0.002	415	6	April Lyrids	0.002 (-P)	Yes
C/1871 V1 (Tempel)	+8.0	0.053	2048	545	xi Cassiopeids	0.043 (-P)	No
C/1907 G1 (Grigg-Mellish)	+10.4	0.003	493	120	delta Pavonids	0.003 (P+)	Yes
C/1911 N1 (Kiess)	+7.4	0.003	2497	206	Aurigids	0.003 (P+)	Yes
C/1939 H1 (Jurlof-Achmarof-Hassel)	+7.1	0.013	490	535	theta Cetids	0.011 (-B)	Yes
C/1961 T1 (Seki)	+9.3	0.084	808	502	December rho Virginids	0.088 (P+)	No
C/1964 N1 (Ikeya)	+7.2	0.041	418	533	July xi Arietids	0.041 (H+)	Yes
C/1975 T2 (Suzuki-Saigusa-Mori)	+9.8	0.100	444	524	lambda Ursae Majorids	0.094 (P+)	Yes
C/1979 Y1 (Bradfield)	+8.4	0.067	304	175	July Pegasids	0.073 (-B)	Yes
C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock)	+8.6	0.006	970	145	eta Lyrids	0.006 (-P)	Yes
C/1987 B1 (Nishikawa-Takamizawa-Tago)	+7.4	0.047	2979	23	epsilon Geminids	0.050 (-P)	No
C/2002 Y1 (Juels-Holvorcem)	+9.8	0.118	3967	705	UY Lyncids	0.100 (P+)	Yes
C/2015 D4 (Borisov)	+9.4	0.004	700	176	July gamma Phoenicids	0.004 (P+)	No

Reported are their total absolute magnitudes H_{10} , miss distance with Earth orbit, the orbital period, as well as the results from the search for associated meteor showers. D_{SH} is the Southworth and Hawkins (1963) D-criterion comparison between comet orbit and the best method meteoroid orbit that would intersect with Earth's orbit according to Neslusan et al. (1998), with shower at the pre-perihelion (-) or the post perihelion (+) arc.

^a From 6.8-km diameter and assumed albedo = 0.04 (Groussin et al., 2010). H_{10} according to Vsekhsvyatskii (1964), Hughes (1987), and Kronk (1999a, 1999b).

Table 2B
As in Table 2A, but for long-period comets that do not have a known orbital period.

Comet	H_{10}	Miss Dist. (AU)	Period (y)	Shower IAU #	Shower name	D_{SH}	Certain
C/1739 K1 (Zanotti)	+3.3	0.058	Inf.	22	Leonis Minorids	0.049 (B+)	Yes
C/1797 P1 (Bouvard-Herschel)	+8.8	0.076	Inf.	822	nu Taurids	0.064 (B+)	No
C/1852 K1 (Chacornac)	+9.8	0.005	Inf.	191	eta Eridanids	0.004 (-P)	No
C/1864 N1 (Tempel)	+6.2	0.005	Inf.	410	delta Piscids	0.005 (H+)	Yes
C/1879 M1 (Swift)	+4.5	0.093	Inf.	512	rho Puppids	0.093 (-P)	Yes

the shower in Right Ascension and Declination (often even in sun-centered ecliptic coordinates), the showers are usually more clearly defined in 1° maps than in maps integrated over a longer solar longitude interval. The velocity distribution of the selected meteors was examined and outliers removed. Subsequently, median orbital elements were calculated for the remaining sample. If the activity profiles are symmetric, the median value of the solar longitude also defines the time of peak activity. Table 2A shows the examples for which we know the comet orbital period, whereas Table 2B are cases for which only a parabolic solution to the comet orbit is known.

Altogether, the established cases among comets with a known orbital period map out the encounter conditions for which a meteor shower may be expected. Non-detections are important for this also, which are listed in Table 3A. Table 3B gives the theoretical radiant and speed, as well as the miss distance, for those comets for which only a parabolic solution to the comet orbit is known. Some of those may not be long-period comets.

Table 4 gives the median orbit of the meteoroid streams found, with uncertainty intervals marking the 1-sigma observed dispersion of orbital elements. These results are compared to the theoretical radiant of the proposed parent comet, and the adjusted orbital elements that created an orbit intersecting that of Earth. The method used to do so is given.

Table 5 gives the same data for a number of less certain associations. Arguments for why an individual association is deemed less certain are given in Section 3.6 below. In some cases, the theoretical radiant falls just outside the observed radiant distribution, or the predicted time of encounter does not correspond to maximum activity or the lowest dispersion in radiants. To explain such discrepancies requires a re-evaluation of the comet orbit from past observations or dynamical modeling of the meteoroid stream, both of which are outside the scope of this paper.

The physical parameters for each shower are given in Table 6, which lists the maximum range and dispersion in solar longitude (λ_0), the value and dispersion in Sun-centered ecliptic radiant coordinates (λ , β), which take out the daily drift in the equatorial radiant coordinates due to Earth's motion around the Sun, the drift per degree of solar longitude in

the ecliptic longitude and in the speed. Also given is the drift in longitude of perihelion (Π) with solar longitude.

The final columns give the magnitude distribution index $\chi = N(m+1)/N(m)$ and related shower Type (see Section 5.5), where $N(m)$ is the number of observed meteors of magnitude m after correction for relative observing efficiency. The sporadic (non-shower) meteor magnitude distribution was used to derive the relative observing efficiency as a function of magnitude for different entry velocities. It was assumed that the incident population distribution continues the same power law at faint magnitudes as seen at bright magnitudes, with the ratio of the observed and expected rates being the relative observing efficiency. For low-light video cameras in the CAMS network, the sample is complete for magnitudes ≤ -1 magnitude for slow $V = 20$ km/s meteors, and to ≤ -2 magnitude for fast $V = 60$ km/s, but progressively incomplete for fainter magnitudes.

3.1. Comet C/1939 H1 and the theta Cetids

As a first example, we discuss the newly established case of comet C/1939 H1 (Jurlof-Achmarof-Hassel). The theoretical radiant of the comet, using the 1939 orbit and the method Q of Neslusan et al. (1998), is near the star eta Ceti, at R.A. = 19.4° , Decl. = -11.9° , from where meteors radiate with geocentric speed $V_g = 62.3$ km/s centered on solar longitude 132.4° (equinox J2000.0). The orbit passes so close to Earth's orbit, that other methods of calculating an intersection point in Neslusan et al. (1998) give similar results.

Segon et al. (2014) identified a "possible new shower" called the theta Cetids (IAU shower #535), after the nearby star theta Ceti, by extracting 15 orbits from the Croatian Meteor Network database with orbital elements similar to those of the comet ($D_{SH} < 0.07$). Based on those extracted orbits, this annual shower was active from July 31 to August 19, with a peak around August 9.

We extracted all observed orbits over the solar longitude range of $120-180^\circ$. The stream stands out best in individual 1° intervals of solar longitude, where the maps show a compact cluster. After isolating the

Table 3A

As in Table 2A, but for comets that do not have an associated meteor shower.

Comet	Sol. Long. (°)	R.A. (°)	Decl. (°)	Miss Dist. (AU)	D _{SH}	Period (y)	Detected
C/1769 P1 (Messier)	186.0	24.6	+23.6	0.113	0.046	2090	No?
C/1854 R1 (Klinkerfues)	326.5	305.2	+37.9	0.013	0.011	1286	Daylight
C/1894 G1 (Gale)	27.9	357.1	-61.5	0.077	0.071	816	Daylight
C/1882 F1 (Wells)	26.6	358.3	-13.7	0.009	0.002	935,831	No
C/1889 O1 (Davidson)	107.7	66.0	-51.1	0.039	0.038	9079	No
C/1892 E1 (Swift)	62.4	149.9	-74.1	0.059	0.060	25,712	No
C/1907 L2 (Daniel)	144.3	335.4	-4.1	0.067	0.067	8235	No
C/1910 A1 (Great January comet)	90.0	315.1	-7.3	0.030	0.014	5,611,316	No
C/1911 S2 (Quenisset)	36.4	320.4	+24.3	0.020	0.016	8907	No?
C/1927 X1 XX (Skjellerup-Maristany)	78.2	32.5	+33.8	0.034	0.013	36,533	No
C/1931 P1 (Ryves)	282.3	144.2	+13.3	0.063	0.058	1173	No
C/1941 B1 (Friend-Reese-Honda)	329.8	326.8	+35.5	0.097	0.092	355	Daylight
C/1941 B2 (de Kock-Paraskevopoulos)	43.1	287.0	-17.2	0.111	0.115	26,096	No?
C/1943 W1 (van Gent-Peltier-Daimaca)	238.6	132.5	-8.2	0.033	0.031	76,058	No
C/1946 K1 (Pajdusakova-Rotbart-Weber)	121.9	25.8	+4.2	0.030	0.030	76,476	No
C/1969 T1 (Tago-Sato-Kosaka)	281.7	231.2	-56.8	0.001	0.000	513,427	No
C/1974 V2 (Bennett)	231.3	146.6	-13.7	0.036	0.033	945,821	No
C/1976 D1 (Bradfield) ^a	340.8	12.8	-63.5	0.014	0.013	1464	Daylight
C/1977 R1 (Kohler)	182.5	238.2	+66.9	0.009	0.008	102,891	No
C/1983 J1 (Sugano-Saigusa-Fujikawa)	83.0	21.3	+42.8	0.049	0.031	330,473	No
C/1984 S1 (Meier)	11.7	296.5	-2.3	0.045	0.042	24,349	No
C/1988 A1 (Liller)	211.5	80.1	-29.1	0.085	0.071	3831	No
C/1991 T2 (Shoemaker-Levy)	49.0	321.6	+25.3	0.087	0.079	461,937	No
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	282.9	236.1	+30.0	0.115	0.099	2456	No
C/1996 B2 (Hyakutake)	8.1	227.3	-32.9	0.101	0.049	108,304	No
C/1996 Q1 (Tabur)	211.4	80.0	-29.1	0.084	0.070	14,882	No
C/1999 A1 (Tilbrook)	259.1	165.3	+58.9	0.068	0.057	2353	No
C/1999 J3 (LINEAR)	229.0	176.5	+53.4	0.011	0.011	63,767	No
C/2001 A2 (LINEAR)	115.1	107.6	-21.0	0.051	0.048	127,299	Daylight
C/2006 WD4 (Lemmon)	46.8	344.6	-21.6	0.087	0.095	14,108	No
C/2012 F6 (Lemmon)	152.7	98.2	-26.3	0.072	0.060	10,750	Daylight
C/2013 G5 (Catalina)	144.3	238.5	+66.7	0.067	0.066	139,377	No
C/2013 K1 (Christensen)	125.9	251.9	+69.5	0.061	0.061	712	No
C/2014 Q1 (PANSTARRS)	188.8	35.5	-7.4	0.091	0.060	37,958	No
C/2015 ER61 (PANSTARRS)	108.5 ^b	217.1	-25.2	0.102	0.110	7494	No
C/2015 F3 (SWAN)	211.6	80.2	-29.0	0.079	0.066	10,435	No
C/2016 VZ18 (PANSTARRS)	278.9	77.2	-25.5	0.020	0.019	2715	No
C/2017 E4 (Lovejoy)	43.2	265.8	-59.9	0.049	0.034	10,440	No
C/2019 U6 (Lemmon)	55.7	50.3	-54.7	0.029	0.027	9109	No
C/2019 Y1 (ATLAS)	211.4	80.0	-29.1	0.082	0.069	3719	No
C/2020 R4 (ATLAS)	125.8 ^b	28.3	+3.3	0.118	0.116	942	No

The predicted time of encounter (solar longitude) and the theoretical radiant position are given also. Some showers have a (possible) nearby shower significantly offset from the theoretical radiant position (labeled with a question mark).

^a Comet associated with beta Tucanids (IAU#108), but shower not detected (Jenniskens and Lyttinen, 2003).

^b Perihelion just outside Earth's orbit: used method P rather than Q.

clusters in each interval and after removing sporadic meteors, by plotting solar longitude versus right ascension (R.A.) and declination (Decl.) and removing five outliers, only 35 meteors are identified as theta Cetids. They span only the solar longitude range from only 130.87–136.15°, which correspond to dates of about August 3–8 during the Perseid season.

Fig. 2 shows the distribution of radiants in this general direction over the 130.87–136.15° solar longitude interval. The various CAMS networks have detected 42,628 meteors during that interval. The theta Cetids shower is apparent at the center of the diagram (left panel). The radiant is much more compact and the duration shorter than that found by Segon et al. (2014).

The radiant distribution is elongated due to radiant drift during this time (from the changing direction of Earth's motion while it orbits the Sun). Because the shower radiant gradually moves in these diagrams, the radiant at peak activity corresponds to the position of highest density of radiant points per square degree. The shower is strong around 132.1° solar longitude and has a long tail of activity to higher solar longitudes. The measured radiant drift is +0.80° per degree solar longitude in R.A. and +0.37° per degree solar longitude in Decl. The radiant stays compact until the final degree of solar longitude (136.0–136.9°), prompting us to reject most meteors selected in that final interval.

The shower is confirmed by observations from other networks not

affiliated with CAMS. Over this same solar longitude interval, the SonotaCo network (2007–2019), the EDMOND network (2002–2016) (Kornos et al., 2014), and the more recently released data from the CMN (2016–2019), detected a total of 25,715 meteors, 24 of which are identified as theta Cetids, again by tracking and isolating the cluster in small solar longitude intervals. Because results are so similar, we combine these datasets and consider the whole database in the rest of this paper hereafter.

Meteors from the theta Cetids shower were detected in all years since 2010. The respective yearly count from 2010 to 2020 was: 5, 3, 2, 5, 2, 4, 9, 2, 4, 12, 14. The final 2 years reflect the expansion of CAMS in the Southern Hemisphere. It appears that the shower is active annually, and there have been no outbursts detected so far from crossing the 1-revolution dust trail of the comet.

That is not unexpected, given the miss distance of 0.013 AU. The 1-revolution dust trail of a long-period comet, as well as its annual shower, will move in and out of Earth's orbit following the Sun's reflex motion (Jenniskens, 1997; Lyttinen and Jenniskens, 2013). The amplitude of that motion over many years is 0.011 AU. If the miss distance is larger, and if the duration of the shower is longer than an hour or two, the meteor shower is likely caused by an annual shower component that accumulated over multiple returns of the comet.

Table 3B

As in Table 2B, but for suspected long-period comets with unknown orbital periods that do not have an associated meteor shower.

Comet	Sol. Long. (°)	R.A. (°)	Decl. (°)	Miss Dist. (AU)	D _{SH}	Period (y)	Detected
C/−146 P1	150.0	113.0	−12.7	0.005	0.003	Inf.	Daylight
C/240 V1	214.0	207.2	+20.7	0.071	0.056	Inf.	Daylight
C/390 Q1	176.0	37.1	−68.2	0.044	0.043	Inf.	No
C/400 F1	38.0	9.8	+17.5	0.066	0.046	Inf.	No?
C/770 K1	290.7	157.1	−19.8	0.092	0.086	Inf.	No
C/868 B1	321.0	187.3	+35.0	0.019	0.013	Inf.	No
C/962 B1	70.0	15.1	+18.7	0.105	0.082	Inf.	No
C/1014 C1	354.0	218.6	−44.7	0.014	0.010	Inf.	No
C/1092 A1	294.0	168.2	−26.3	0.052	0.045	Inf.	No?
C/1097 T1	352.0	199.2	+13.6	0.048	0.034	Inf.	No
C/1132 T1	213.2	172.6	+43.3	0.041	0.034	Inf.	No
C/1299 B1	296.9	157.8	−18.0	0.089	0.054	Inf.	No
C/1345 O1	150.0	286.7	+28.4	0.047	0.046	Inf.	No
C/1368 E1	37.0	277.1	−44.6	0.029	0.023	Inf.	No
C/1376 M1	120.7	2.0	−45.6	0.049	0.037	Inf.	No
C/1439 F1	12.0	218.6	−32.4	0.008	0.002	Inf.	No
C/1471 Y1	292.9	185.0	+2.9	0.065	0.067	Inf.	No
C/1499 Q1	292.9	185.0	+2.9	0.049	0.047	Inf.	No
C/1556 D1	1.4	182.8	−26.5	0.083	0.083	Inf.	No
C/1557 T1	32.0	212.5	−45.9	0.036	0.031	Inf.	No
C/1558 P1	161.2	32.8	−9.1	0.047	0.024	Inf.	No
C/1618 W1	81.0	276.3	−0.3	0.039	0.032	Inf.	No
C/1639 U1	219.7	45.3	+75.0	0.058	0.049	Inf.	No
C/1672 E1	302.7	259.1	+21.1	0.047	0.038	Inf.	No?
C/1683 O1	357.8	209.7	−48.7	0.059	0.042	Inf.	No
C/1684 N1	92.6	64.2	−46.7	0.009	0.008	Inf.	Daylight
C/1686 R1	358.4	336.2	+18.4	0.099	0.088	Inf.	Daylight
C/1698 R1	70.3	347.0	+1.2	0.104	0.108	Inf.	No?
C/1699 D1	325.9	266.6	+10.8	0.106	0.067	Inf.	No
C/1707 W1	236.9	116.6	−33.4	0.077	0.073	Inf.	No
C/1718 B1	311.9	210.6	−31.9	0.043	0.043	Inf.	No
C/1723 T1 (Kegler-Crossat-Saunderson)	198.9*	115.8	−7.8	0.062	0.059	Inf.	No
C/1748 K1	36.6	256.2	+26.6	0.100	0.083	Inf.	No
C/1757 R1 (Gärtner)	197.9	22.6	+18.6	0.075	0.077	Inf.	No
C/1760 A1 (Great Comet)	305.8*	217.2	−16.9	0.053	0.054	Inf.	No
C/1763 S1 (Messier)	179.7	46.2	−23.5	0.022	0.016	Inf.	No
C/1764 A1 (Messier)	123.4	51.5	+45.1	0.096	0.081	Inf.	No
C/1766 E1 (Messier)	67.4	311.1	−35.1	0.108	0.090	Inf.	No
C/1766 E1 (Messier)	247.4	191.3	+16.1	0.086	0.079	Inf.	No
C/1769 P1 (Messier)	178.3	21.7	+20.2	0.112	0.046	Inf.	No
C/1779 A1 (Bode)	208.1	40.8	−29.1	0.015	0.015	Inf.	No
C/1787 G1 (Mechain)	289.9	159.7	−12.4	0.084	0.062	Inf.	No
C/1790 A1 (Herschel)	179.1	114.6	+38.1	0.033	0.033	Inf.	No
C/1790 H1 (Herschel)	36.1	320.8	+19.6	0.053	0.044	Inf.	No?
C/1793 A1 (Gregory)	286.2	216.0	+15.2	0.062	0.058	Inf.	No
C/1808 F1 (Pons)	145.6	91.3	+6.2	0.033	0.024	Inf.	No
C/1818 W2 (Pons)	272.5	169.8	−36.7	0.118	0.117	Inf.	No
C/1822 K1 (Pons)	100.2	344.3	+14.2	0.065	0.059	Inf.	No?
C/1825 P1 (Pons)	195.4	135.7	+75.4	0.115	0.115	Inf.	No
C/1830 F1 (Great comet)	28.8	118.6	−38.1	0.079	0.079	Inf.	No
C/1839 × 1 (Galle)	302.2	130.0	−29.1	0.027	0.023	Inf.	No
C/1844 N1 (Mauvais)	33.8	289.5	+5.8	0.079	0.073	Inf.	No
C/1845 L1 (Great June comet)	340.0	284.1	−3.9	0.036	0.026	Inf.	No
C/1848 U1 (Petersen)	217.3	134.3	+76.2	0.026	0.024	Inf.	No
C/1854 L1 (Klinkerfues)	169.7	54.7	−15.3	0.014	0.011	Inf.	No
C/1857 D1 (d'Arrest)	315.1	262.8	+23.1	0.025	0.020	Inf.	No
C/1858 K1 (Bruhns)	327.0	273.5	+11.8	0.034	0.025	Inf.	No
C/1861 Y1 (Tuttle)	327.0	238.9	−45.0	0.089	0.084	Inf.	No
C/1862 N1 (Schmidt-Tempel)	148.4	49.5	+13.5	0.014	0.014	Inf.	No
C/1862 W1 (Respighi)	357.7	251.7	+0.7	0.011	0.010	Inf.	No
C/1863 Y1 (Respighi)	306.6	272.3	+27.0	0.075	0.063	Inf.	Daylight
C/1863 G1 (Klinkerefues)	73.2	2.4	−43.8	0.055	0.055	Inf.	No
C/1864 X1 (Baeker)	205.1	212.6	+41.3	0.037	0.033	Inf.	Daylight
C/1870 K1 (Winnecke)	143.6	29.9	+49.0	0.022	0.021	Inf.	No
C/1874 G1 (Winnecke)	95.9	20.8	−10.9	0.067	0.064	Inf.	No
C/1886 J1 (Brooks)	109.4	20.6	−41.0	0.067	0.061	Inf.	No
C/1898 U1 (Brooks)	97.7	16.1	+29.8	0.033	0.030	Inf.	No
C/1917 H1 (Schaumasse)	10.8	298.8	−9.5	0.015	0.015	Inf.	No
C/1943 R1 (Daimaca)	263.4	159.9	−2.9	0.093	0.097	Inf.	No
C/1947 F2 (Becvár)	323.1	237.1	+10.8	0.025	0.025	Inf.	No
C/1951 C1 (Pajdusakova)	131.2	21.8	−38.5	0.032	0.025	Inf.	No
C/1957 U1 (Latyshev-Wild-Burnham)	210.9	91.7	+33.2	0.079	0.084	Inf.	No
C/1957 U1 (Latyshev-Wild-Burnham)	30.9	332.0	−23.2	0.021	0.023	Inf.	No
C/1962 H1 (Honda)	259.8	111.8	−24.5	0.012	0.010	Inf.	No

(continued on next page)

Table 3B (continued)

Comet	Sol. Long. (°)	R.A. (°)	Decl. (°)	Miss Dist. (AU)	D_{SH}	Period (y)	Detected
C/1969 P1 (Fujikawa)	12.4	31.7	-2.6	0.011	0.012	Inf.	Daylight
C/1988 Y1 (Yanaka)	315.5	279.2	+14.3	0.069	0.047	Inf.	Daylight
C/2000 S5 (SOHO)	161.6	127.5	-30.4	0.098	0.086	Inf.	Daylight

3.2. Comet C/1964 N1 (Ikeya) and the July xi Arietids

C/1964 N1 (Ikeya) has often been linked to the epsilon Geminids (#23) (Olsson-Steel, 1987; Neslusan and Hajduková, 2018a, 2018b), but the agreement is not good. Segon et al. (2014) identified a “possible shower” at the other node of the comet orbit, where the comet passed much closer to Earth’s orbit, now called the July xi Arietids (#533). Sixty-one meteors in the CMN database over the period August 4–12 were found to have similar orbital elements.

In Fig. 3, this shower is readily apparent as a density enhancement of radiants during the time interval between solar longitudes 84.1 and 133.4° (J2000), corresponding to June 15 and August 6. We identified 1295 meteors as shower members. Lasting a month and a half, the shower’s activity period is surprisingly long. One reason for this is the relatively low inclined plane of the comet orbit, which has a retrograde inclination $i = 171.9^\circ$.

Because of the low inclined orbital plane, the comet’s theoretical radiant position from method Q and method H are significantly different (Fig. 3), with peak solar longitude at 89.9° and 106.8°, respectively, and radiant position R.A. = 20.1°, Decl. = +4.1° and 31.4°, +8.3°, respectively. Both solutions fall within the range of shower activity, but the method H radiant matches the peak of the observed shower. It appears that precession plays a role in causing meteoroids to intersect Earth’s orbit in this case.

The association was recently investigated by dynamical modeling and good agreement was found in the predicted and observed radiant position, although the models do not fit the observed activity well (Segon et al., 2017; Neslusan and Hajduková, 2018a, 2018b).

3.3. C/1979 Y1 (Bradfield) and the July Pegasids

Comet C/1979 Y1 (Bradfield), together with the perhaps related C/1771 A1 (Great Comet), was earlier recognized as a possible parent body of the July Pegasids (#175), but the shower itself was not well observed (Rendtel et al., 1995; Jenniskens, 2006, p. 175). The orbital period of this comet $P = 305$ years is close to the Halley-type limit of $P = 250$ years (Chambers, 1997).

Fig. 4 shows how low-light video observations have greatly improved our knowledge of this shower (Ueda, 2012; Andreic et al., 2013). The comet’s orbit is significantly inclined to the ecliptic plane ($i = 148.6^\circ$). We find again that method Q puts the theoretical radiant early in the activity curve, but that the theoretical radiant is centered at the peak of activity for method H. This supports the association of comet C/1979 Y1 and the July Pegasids. The shower profile is highly asymmetric (Koseki, 2019; and Fig. 3), and both results imply that precession plays a role in bringing the meteoroids in Earth’s path. Modeling efforts do suggest that the comet is a likely meteor shower parent (Hajduková and Neslusan, 2017).

3.4. Showers that bracket methods Q and H

C/1864 N1 (Tempel) and the delta Piscids constitute a newly recognized association. The comet passed only 0.0054 AU from Earth’s orbit. In this case, the shower stands out well from the sporadic background (Fig. 5A). Again, the associated shower, the delta Piscids (#410), are a better match to the method H radiant than the method Q radiant. The method H radiant is only slightly off the peak of the activity distribution. The plane of the comet orbit is close to that of the ecliptic plane, with $i = 178^\circ$. Despite that fact, the stream is of relatively short

10-day duration. Perhaps the stream is much younger than other low-inclined showers.

C/2002 Y1 (Juels-Holvorcem) and the UY Lyncids (#705) are also a newly recognized association. The shower is weak and located just north of a stronger shower (#81, September Lyncids), but was previously detected independently (Jenniskens et al., 2016). The miss distance is a large 0.117 AU and the orbital period $P = 3,967$ years. Again, the methods Q and H bracket the observed radiant distribution (Fig. 5B). In this case, the timing of the method Q is in better agreement and falls at the peak of the shower activity. The inclination of this shower is a high $i = 104^\circ$.

3.5. Other long-period comets

Other showers that stand out well from the sporadic background are shown in Fig. 1. The well-established case of comet C/1861 G1 (Thatcher) and the April Lyrids (#6) has the theoretical radiant of methods Q and H both at the center of the observed radiant distribution. Models also confirm the associations (Emel’lanenko, 1992; Arter and Williams, 1997; Porubcan et al., 2007; Kornos et al., 2015).

That is not the case for two other well-established cases: that of comet C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock) and the eta Lyrids (#145), and that of comet C/1739 K1 (Zanotti) and the Leonis Minorids (#22) (Ohtsuka, 1989; Jenniskens, 2006). The solutions are slightly offset from the center of the stream, but still within the dispersion of the stream (Fig. 1). Now method Q proves to be a better fit to the observed activity. For shower #145, the activity profile in sun-centered ecliptic coordinates consists of a narrow core activity and a background activity over a wider interval of solar longitude. The center of the core activity is slightly offset from the center of the background activity, resulting in the asymmetry in the distribution of points in Fig. 1.

Judging from the density of points per square degree in Fig. 1, other associations shown here also have such discrepancies, in particular the cases of comet C/1975 T2 (Suzuki-Saigusa-Mori) and the lambda Ursae Majorids (#524), comet C/1879 M1 (Swift) and the rho Puppids (#512), and comet C/1907 G1 (Grigg-Mellish) and the delta Pavonids (#120). The case of C/1975 T2 improves slightly with method P, while methods H and W scatter around it. All three cases likely have a causal relationship, and that of comet Grigg-Mellish was demonstrated in modeling (Jenniskens et al., 2020a). The case of C/1975 T2 was modeled by Hajduková and Neslusan (2019). That of comet C/1879 M1 (Swift) is a newly recognized association. The lower left panel of Fig. 1 for shower #545 also shows an unrelated cluster that consists of tau Cancriids (#480) and early Leonids (#13).

Fig. 6 shows associated showers that are found in dense sporadic meteor backgrounds. The extracted shower radiants are displayed in the panels to the right, while the left panels show all activity over the duration of the shower. Especially long-duration showers appear to have a congested background, but these showers are apparent in small intervals of solar longitude. The cross marks the method Q radiant, unless otherwise indicated.

Fig. 7 shows the radiant distribution as a function of solar longitude (a measure of time: the position of Earth in its orbit). These diagrams also show the meteor shower activity profile from the density of points per square degree. They show the radiant drift of each shower, which is mostly a result of Earth’s changing direction of motion while orbiting the Sun. These graphs depict how the predicted encounter time corresponds to peak activity of the observed meteor shower. The theoretical radiants for the more certain associations should fall on, or close to, the

Table 4
The median orbital elements of the observed shower meteoroids are compared to the theoretical radiant and the modified elements of the parent long-period comet orbit that intersects Earth's orbit, following the [Neslusan et al. \(1998\)](#) method indicated in the third column.

	N	Met-hod	Sol. Long. (°)	R.A. (°)	Decl. (°)	V_g (km/s)	q (AU)	e	i (°)	ω (°)	Node (°)
#6	8400		32.3 ± 1.2	272.2 ± 2.0	+33.4 ± 1.2	46.7 ± 2.3	0.921 ± 0.016	0.954 ± 0.162	79.5 ± 2.5	214.1 ± 4.3	32.3 ± 1.2
1861 G1		Q, all	31.9	272.0	+33.5	47.1	0.923	0.984	79.8	213.5	31.9
#22	1629		209.0 ± 3.6	160.2 ± 4.2	+36.7 ± 1.5	61.4 ± 1.9	0.617 ± 0.038	0.965 ± 0.095	124.7 ± 2.3	102.9 ± 6.4	209.0 ± 3.6
1739 K1		Q, all	211.0	162.6	+36.3	61.9	0.624	0.999	124.3	104.8	211.0
#120	29		10.2 ± 0.6	308.5 ± 1.6	-60.1 ± 1.0	59.4 ± 2.4	0.930 ± 0.012	1.023 ± 0.191	111.2 ± 2.0	329.4 ± 3.3	190.2 ± 0.6
1907 G1		Q, all	10.5	309.5	-60.4	58.8	0.926	0.985	110.0	328.6	190.5
#145	1053		50.0 ± 1.6	290.9 ± 2.2	+43.7 ± 1.3	44.0 ± 1.8	1.000 ± 0.005	0.953 ± 0.124	74.4 ± 2.2	191.3 ± 3.5	50.0 ± 1.6
1983 H1		Q, B, P	49.1	288.4	+44.0	43.8	0.997	0.990	73.3	192.9	49.1
#175	1946		113.4 ± 10.6	352.0 ± 9.0	+12.1 ± 3.3	63.9 ± 2.1	0.557 ± 0.056	0.964 ± 0.102	149.1 ± 1.8	265.6 ± 8.3	113.3 ± 10.6
1979 Y1		H, P	110.5	348.5	+10.5	64.1	0.545	0.988	148.9	266.2	110.5
1771 A1		H, P	111.9	350.8	+12.3	64.8	0.528	0.999	148.8	267.8	118.2
#191	6123		137.4 ± 9.3	43.9 ± 8.1	-12.3 ± 3.5	64.5 ± 2.3	0.952 ± 0.021	0.958 ± 0.190	132.4 ± 3.4	28.8 ± 5.5	317.4 ± 9.3
1852 K1		Q, all	139.3	42.8	-12.6	64.3	0.910	0.999	131.1	37.2	319.3
#206	1067		158.9 ± 7.4	91.7 ± 8.6	+39.3 ± 1.0	65.7 ± 1.6	0.677 ± 0.037	0.969 ± 0.094	148.0 ± 2.1	109.4 ± 6.1	158.9 ± 7.4
1911 N1		Q, all	158.7	91.4	+39.2	66.1	0.681	0.996	148.4	110.4	158.7
#410	183		90.9 ± 2.2	10.2 ± 1.6	+5.5 ± 0.7	70.0 ± 1.3	0.920 ± 0.018	0.998 ± 0.111	178.2 ± 0.9	143.8 ± 4.1	90.9 ± 2.2
1864 N1		H, P	88.2	8.1	+4.6	70.1	0.909	0.996	178.1	142.1	88.2
#428	1687		275.1 ± 14.8	211.2 ± 12.2	+3.6 ± 2.9	66.4 ± 1.4	0.626 ± 0.062	0.966 ± 0.081	149.3 ± 3.0	104.8 ± 8.2	275.1 ± 14.8
1846 J1		H, P	270.0	206.4	+4.4	67.2	0.634	0.990	150.9	106.6	270.0
#512	517		225.3 ± 5.4	124.8 ± 6.6	-25.4 ± 1.3	57.5 ± 1.9	0.988 ± 0.005	0.902 ± 0.141	106.2 ± 2.9	2.2 ± 7.5	45.3 ± 5.4
1879 M1		Q, all	227.5	125.4	-25.7	58.6	0.989	0.999	107.0	3.7	47.5
#524	274		214.4 ± 1.4	157.9 ± 2.10	+49.3 ± 1.1	60.6 ± 1.5	0.916 ± 0.011	0.961 ± 0.110	115.4 ± 2.2	147.4 ± 3.2	214.4 ± 1.4
1975 T2		P, Q, B	216.0	157.0	+48.2	61.9	0.928	0.984	118.1	152.2	216.0
#533	1296		111.9 ± 10.8	35.4 ± 8.2	+8.6 ± 2.7	68.9 ± 1.9	0.851 ± 0.063	0.958 ± 0.145	170.9 ± 2.8	312.1 ± 10.4	291.9 ± 10.8
1964 N1		H	106.9	31.5	+8.3	69.0	0.822	0.985	172.3	307.9	286.9
#535	56		132.9 ± 2.3	19.6 ± 2.2	-11.6 ± 1.0	62.5 ± 1.7	0.514 ± 0.031	0.999 ± 0.070	138.5 ± 1.7	89.1 ± 5.6	312.9 ± 2.3
1939 H1		Q, all	132.4	19.3	-11.9	62.3	0.517	0.992	138.2	89.2	312.3
#705	94		166.3 ± 3.0	112.3 ± 4.4	+61.7 ± 1.0	55.7 ± 1.4	0.781 ± 0.026	0.950 ± 0.084	103.8 ± 1.8	121.8 ± 4.4	166.3 ± 3.0
2002 Y1		Q, all	166.2	110.3	+63.3	56.4	0.820	0.997	103.8	128.8	166.2

Table 5
As in Table 4, but for uncertain associations.

	N	Sol. Long. (°)	R.A. (°)	Decl. (°)	V_s km/s	q (AU)	e	i (°)	ω (°)	Node (°)
#23	2321	205.2 ± 7.4	101.1 ± 6.4	+27.9 ± 1.3	69.2 ± 2.3	0.784 ± 0.058	0.953 ± 0.166	170.8 ± 1.9	235.8 ± 9.9	205.2 ± 7.4
1987 B1		195.2	94.4	+28.0	70.6	0.884	0.996	171.8	219.8	195.2
#176	2147	131.9 ± 8.3	68.0 ± 8.1	-36.6 ± 4.3	47.8 ± 3.6	0.991 ± 0.026	0.925 ± 0.198	83.6 ± 6.4	341.8 ± 9.2	311.8 ± 8.4
2015 D4		125.8	78.9	-32.1	45.9	0.866	0.989	77.3	314.7	305.8
#502	482	256.2 ± 5.6	187.8 ± 5.2	+12.8 ± 1.0	68.4 ± 1.5	0.796 ± 0.029	0.960 ± 0.104	152.8 ± 3.0	127.4 ± 5.4	256.2 ± 5.6
1961 T1		247.4	179.7	+14.3	69.2	0.788	0.992	155.7	126.6	247.4
#531	193	48.7 ± 2.9	304.6 ± 2.8	+14.5 ± 1.3	62.4 ± 1.5	0.985 ± 0.008	0.941 ± 0.123	123.2 ± 2.0	198.1 ± 3.4	48.7 ± 2.9
1853 G1		43.0	299.3	+13.9	62.7	0.980	0.989	122.2	199.2	43.0
#545	17	149.4 ± 1.0	4.4 ± 0.7	+47.5 ± 0.4	53.1 ± 0.9	0.724 ± 0.015	0.966 ± 0.053	97.5 ± 1.0	245.0 ± 2.4	149.4 ± 1.0
1871 V1		148.9	4.7	+47.6	53.9	0.737	0.996	98.3	242.9	148.9
#822	220	138.6 ± 10.7	77.2 ± 9.6	+2.3 ± 0.9	62.3 ± 1.3	0.566 ± 0.043	0.958 ± 0.063	135.9 ± 2.2	275.4 ± 5.8	318.6 ± 10.7
1797 P1		152.1	93.0	+1.1	61.4	0.525	0.999	129.4	272.2	332.1

peak of the shower activity (the highest density of points per square degree). Those more certain associations are given in Table 4.

Finally, an interesting phenomenon is observed for the April Lyrids (#6) and eta Lyrids (#145). Both showers have a nearby “ghost” (Fig. 1), a similarly dispersed shower with orbital elements not unlike those of the parent comet. Other nearby ghosts were identified earlier (Jenniskens and Haberman, 2013). It is possible that these streams are from cometary fragments that broke off a parent comet some time ago and are still to be discovered.

3.6. Uncertain cases

Olsson-Steel (1987) pointed out that comet C/1987 B1 (Nishikawa-Takamizawa-Tago) was a better match to the epsilon Geminids (#23) than comet C/1964 N1 (Ikeya). At the time, observations of this shower were poor. Fig. 8 shows the current status. The radiant distribution is dispersed, but the theoretical radiants fall within this dispersion. They fall near the beginning of the activity period, which is more than 30 days. This case of the epsilon Geminids may be similar to that of the July Pegasids, also a long-duration stream. The activity peaks early in both and there is a long tail. However, in the case of the epsilon Geminids, the theoretical radiants fall at a time when the radiant dispersion of the stream is at its largest. Also, the node of the comet orbit is well before the range of nodes observed at Earth.

We confirm the existence of the gamma Aquilids (#531). The theoretical radiant of C/1853 G1 (Schweizer) according to method Q is early in the activity period (Fig. 7). The shower is well defined and the theoretical radiant falls in the dispersion, but is offset from the peak. Segon et al. (2017) investigated the association by dynamical modeling going back 5000 years, but did not find meteoroids that intersected Earth’s orbit. Recently, Neslusan and Hajudková (2020) did dynamical modeling going back 80,000 years and found a theoretical radiant in the range R.A. = 300.1–305.8° and Decl. = +12.9–14.2° at solar longitude 43–55° (centered on 44°). That puts the radiant at the center of the dust density.

Neslusan and Hajudková (2020) also identified a possible shower called the 52 Herculids (#605) at the other node at R.A. = 255.7–262.0, Decl. = +49.4–51.9°, and solar longitude 12–20°, but that shower is not a good match to the theoretical radiant position (R.A. = 253.9° and Dec = +47.1° at solar longitude 7.2°). We find no significant density enhancement in that direction (not shown). Indeed, while the miss distance is 0.072 AU on the descending node, the miss distance is 0.27 AU on the ascending node, passing too far to expect a meteor shower.

Greaves (2012) noticed the similarity between the orbit of comet C/1961 T1 (Seki) and that of the December rho Virginids (#502). The shower is active over a long period of time (240–267° solar longitude), as a result of which it drowns in background activity from other showers and the sporadic background in the time-integrated Fig. 9 left graph. However, the shower is recognized clearly in maps of 1° solar longitude interval and the isolated meteors are shown in Fig. 9, right graph. For this shower, the method Q radiant is offset from the peak activity. Method H results in an even larger disagreement in this case. Here, method W gives the best agreement, also pointing to a role for precession. However, even in this case the theoretical radiant is slightly offset from the center of the shower’s radiant distribution and outside the dispersion of meteoroid orbits. The disagreement is perhaps small enough for this stream to suggest that this stream originated from comet C/1961 T1.

A case newly identified in this work is that of comet C/2015 D4 (Borisov), now recognized to have an associated annual shower: the July gamma Phoenicids (#176). The theoretical radiant of this highly inclined comet ($i = 77.3^\circ$) falls just on the edge of the meteoroid distribution, but at the longitude of peak activity (Fig. 7). The July gamma Phoenicids show a tail of activity to later dates. Modeling shows that comet Borisov passed so close to Earth’s orbit that it can also cause meteor outbursts from encounters with the 1-revolution dust trail

Table 6
Physical properties of long-period comet showers.

#	$\Delta\lambda_o$ (°)	$\sigma\lambda_o$ (°)	$\sigma\Lambda$ (°)	λ (°)	$\sigma\lambda$ (°)	$\sigma\lambda\cos\beta$ (°)	β (°)	$\sigma\beta$ (°)	$\delta\lambda/\delta\lambda_o$ C ^a (°/°)	$\delta\lambda/\delta\lambda_o$ Backgr. (°/°)	$\delta V_g/\delta\lambda_o$ (km/s/°)	$\delta\Pi/\delta\lambda_o$ (°/°)	χ	T
6	10.8	1.17	1.03	241.1	2.81	1.93	+46.7	1.23	+0.52	+0.07	+0.28	+1.29	2.98 ± 0.08	2
22	22.3	3.64	2.21	298.0	1.17	1.05	+26.1	1.05	-0.03	+0.09	-0.07	+0.91	2.68 ± 0.08	1
23	33.4	7.37	1.72	254.6	2.14	2.13	+5.1	1.06	-0.20	-0.25	-0.03	+1.80	3.60 ± 0.07	-
120	2.3	0.63	0.42	283.8	1.03	0.79	-39.8	0.83	-	-	-	(+1.76)	3.85 ± 0.40	3
145	9.5	1.59	1.46	256.6	3.91	1.68	+64.6	1.36	-0.15	-1.34	-0.15	+1.93	2.77 ± 0.18	-
175	47.8	10.6	5.27	244.0	1.41	1.37	+14.3	0.95	-0.18	-0.10	-0.04	+1.42	3.52 ± 0.08	-
176	50.7	9.10	8.10	284.0	8.17	4.40	-57.4	3.95	+0.04	+0.14	+0.16	+0.71	4.71 ± 0.70	-
191	37.8	9.32	4.71	260.1	1.46	1.30	-27.4	1.98	-0.02	+0.00	-0.00	+1.06	3.87 ± 0.24	2
206	35.0	7.43	3.30	292.4	0.99	0.96	+14.9	1.16	-0.07	-	-0.00	+1.29	3.08 ± 0.34	-
410	10.0	2.16	0.35	280.4	0.87	0.87	+1.0	0.53	-0.29	-	+0.03	+2.00	4.18 ± 0.19	3
428	61.4	14.8	6.65	293.0	2.21	2.14	+14.9	1.93	-0.14	-0.15	+0.00	+1.41	3.70 ± 0.29	-
502	25.3	5.71	2.06	286.1	1.07	1.03	+14.7	1.73	-0.13	-0.13	-0.05	+1.54	3.59 ± 0.19	2
512	26.6	5.49	3.80	269.5	3.58	2.59	-43.6	1.72	+0.43	-	+0.17	+0.08	3.00 ± 0.07	1
524	6.7	1.40	0.85	284.2	1.02	0.82	+36.8	1.18	-0.04	-	-0.11	+0.89	2.68 ± 0.11	-
531	12.1	2.88	1.62	262.6	1.12	0.94	+33.2	1.13	+0.06	-	+0.01	+0.72	3.17 ± 0.23	2
533	49.3	10.9	2.85	284.0	2.74	2.73	-5.0	1.55	-0.24	-0.23	+0.06	+1.78	3.45 ± 0.14	-
535	9.7	2.35	1.33	240.6	0.40	0.38	-18.5	0.61	+0.00	+0.00	-0.00	(+1.22)	2.78 ± 0.21	2
545	3.3	1.04	0.80	237.5	0.97	0.73	+40.9	0.35	(-0.7)	-	(-0.0)	-	2.50 ± 0.20	1
705	13.5	2.99	2.16	297.4	1.38	1.07	+39.3	1.05	-0.21	-	-0.05	+1.35	3.09 ± 0.33	2
822	40.1	10.7	6.39	298.0	1.52	1.43	-20.2	1.05	-0.06	-	+0.00	+1.20	4.17 ± 0.33	2

First column is the IAU shower number. Listed are the full range in solar longitude (λ_o) and the 1-sigma dispersion, the derived dispersion in the stream cross section (Λ), the sun-centered ecliptic longitude and latitude of the radiant (λ, β) and their dispersions, the drift in sun-centered longitude of the radiant with solar longitude (position of Earth in its orbit), both for the shower core as for the outer parts, the drift in entry speed, and the drift in the longitude of perihelion (Π). Final columns give the magnitude distribution index and the initial fragmentation type.

^a Core of the stream. Values are per degree solar longitude.

(Jenniskens et al., 2015), but so far none have been observed. The shower is best seen from Antarctica, because of a narrow observing window before dawn except at extreme southern latitudes.

Comet C/1797 P1 (Bouvard-Herschel) and the nu Taurids (#822) are perhaps a similar case to Borisov. The shower is well defined, and the theoretical radiants are near what may be peak activity (Fig. 10), but at the end of the activity period. The shower is active over a long period in solar longitude.

Finally, the xi Cassiopeids (#545) were identified by Segon et al. (2014) as meteoroids in similar orbits being centered on the orbit of comet C/1871 V1 (Tempel). We find only a faint density enhancement of meteor radiants and only if the search window is set in a narrow interval on the expected peak time (Fig. 10). This shower may prove to be non-existent if that enhancement is due to chance coalignments of sporadic meteors. The number of identified orbits is only 17, and a few sporadic meteors can skew many of the reported shower parameters in Tables 5 and 6.

4. Properties of long-period comet showers

The associations found provide a sample of long-period comet showers whose properties, such as dispersions and particle size distributions, can be further explored. Results of that exploration are summarized in Table 6.

4.1. Stream dispersion

Meteoroid streams are expected to disperse over time, resulting in showers that last longer and have a more diffuse radiant. Table 6 lists the shower duration expressed both as the range of solar longitude (λ_o) along Earth's path where the shower is detected ($\Delta\lambda_o$) and the standard deviation in the distribution of the solar longitude ($\sigma\lambda_o$). These parameters tend to correlate. The radiant dispersion is given in units of sun-centered ecliptic longitude and latitude ($\sigma\lambda, \sigma\beta$). The sun-centered values take out the effect of Earth's motion around the Sun by keeping the coordinate system centered on the Sun at position 0°.

The shower duration, more so than the radiant dispersion, depends on the encounter geometry with the stream, specifically the angle be-

tween Earth's velocity vector and that of the meteoroids (δ). The observed dispersion in solar longitude ($\sigma\lambda_o$) was corrected to stream cross section dispersion ($\sigma\Lambda$) following Jenniskens (1994), using the values of geocentric speed V_g and heliocentric speed V_h reported by Neslusan et al. (1998), with V_E the speed of Earth:

$$\sigma\Lambda = \sigma\lambda_o \sin(\delta) = \sigma\lambda_o (1/V_g) * \sqrt{(V_h^2 - ((V_h^2 - V_g^2 + V_E^2)/(2 V_E))^2)} \quad (1)$$

With that correction, the cross section from shower duration ($\sigma\Lambda$) correlates better with the radiant dispersions $\sigma\lambda * \cos(\beta)$ and $\sigma\beta$, as expected (Fig. 11), but not tightly.

Measurement error in the radiant dispersion is $\pm 0.28^\circ$ for CAMS data on average (Fig. 11, dashed line), but ranges from 0.22° to 0.59° in individual datasets and is different for other networks. This may be mostly responsible for the off-set of $\sim 0.65^\circ$ at the shortest shower durations. Even after subtracting this measurement error, the correlation is not tight, perhaps because the Earth is not always crossing the center of the stream and because differences in the dynamical evolution factor in.

4.2. Mean orbit evolution

Over time, precession and other secular dynamical processes cause the streams to change their mean orbital elements, which affect the encounter conditions (Jenniskens, 2006). A small drift in sun-centered ecliptic longitude of the radiant λ along the path of Earth is found in many of the showers, but there is no correlation with ecliptic latitude or one of the orbital elements. Drift in V_g correlates strongly with ecliptic latitude (Fig. 12), proportional to $0.19 * \cos(\beta)$, with one exception: the April Lyrids (#6) of comet Thatcher. The reason for this exception remains unknown.

All long-period comet showers show a significant positive change of the longitude of perihelion $\Pi = \omega + \Omega$ with increasing Ω or solar longitude λ_o (Table 6). We find that the rate of that change is a strong function of the inclination of the comet (or meteoroid) orbit (Fig. 13). Retrograde showers tend to have positive $\delta\Pi/\delta\lambda_o$, changing slowly with increasing inclination according to $\delta\Pi/\delta\lambda_o = +2.1 * (i - 90^\circ)$ and never getting higher than $+2^\circ$ per degree solar longitude, whereas prograde

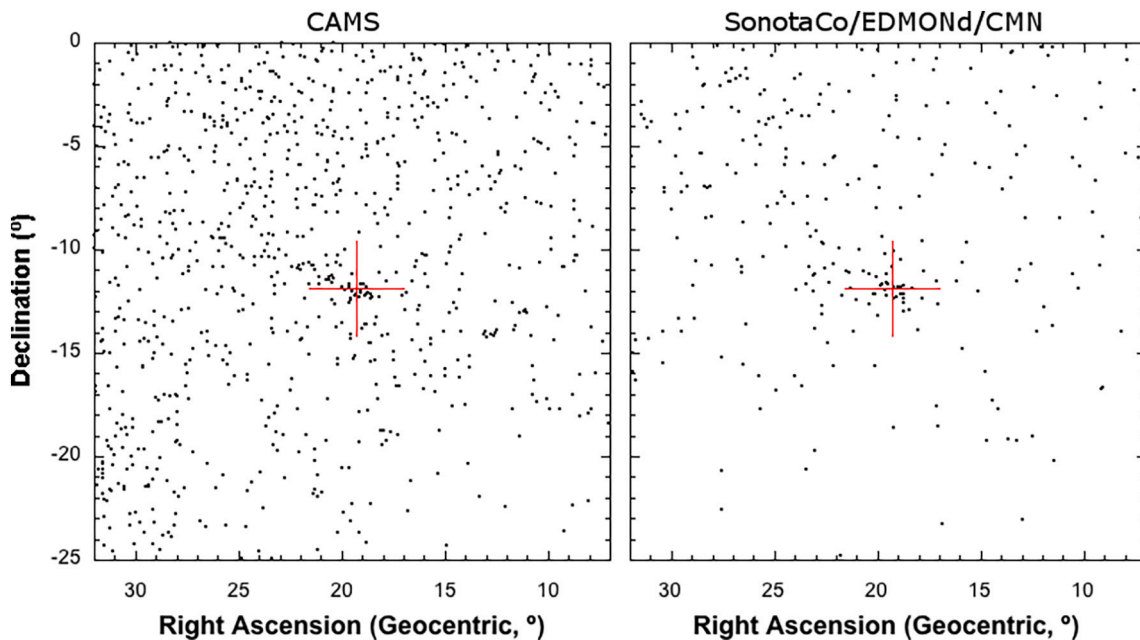


Fig. 2. Meteor radiants measured by the CAMS networks (left) and other networks (right) in the solar longitude interval of 130.87–136.15°. The theta Cetids (#535) are at the center of the plot.

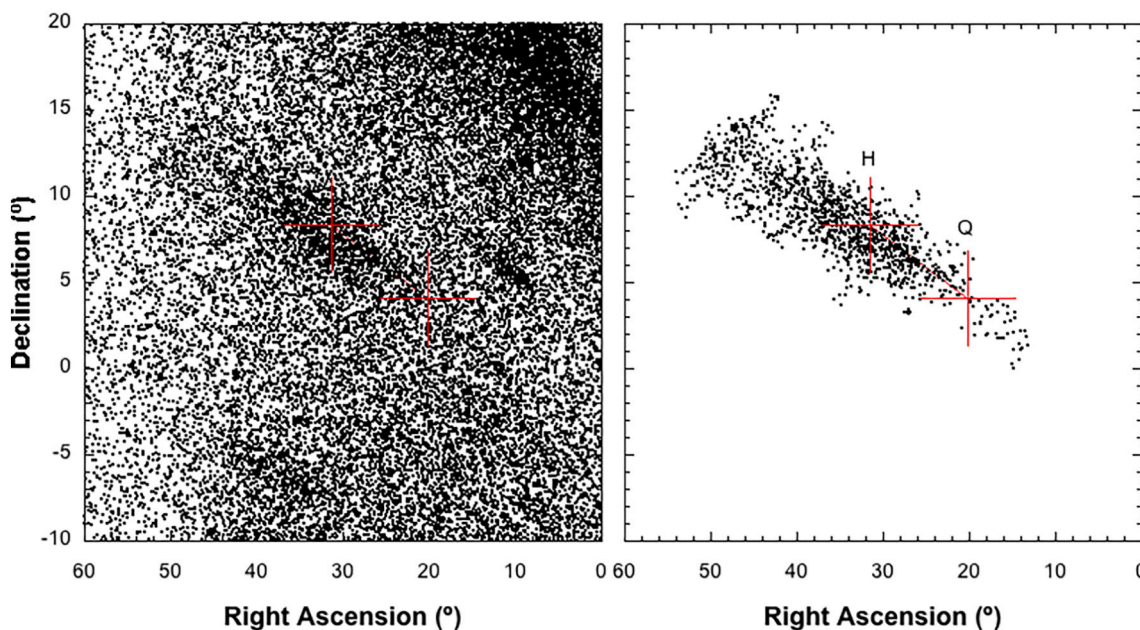


Fig. 3. Comet C/1964 N1 (Ikeya) and the July xi Arietids (#533). Diagrams show the full activity period of the July xi Arietids (solar longitude 84–120°), with all other meteors from that direction included (left) and only the shower members identified in small 1° intervals (right). Crosses mark the theoretical radiant positions using methods Q and H of Neslusan et al. (1998).

showers have values that more quickly increase from 90° down according to $\delta\Pi/\delta\lambda_0 = +11 * (90^\circ - i)$, for $i = 75-90^\circ$. The drift for shower 705 is uncertain because it is a weak shower and our sample may be contaminated by sporadic meteors (Fig. 5B).

We confirm this correlation from the models of long-period comets studied by Hajduková and Neslusan (2017, 2019, 2020) and Neslusan and Hajduková (2018a, 2018b, 2019), Neslusan and Hajduková, (2020), shown as squares in Fig. 13 and tabulated in Table 7. However, results from two more distant comets studied in a recent paper by Hajduková and Neslusan (2021) show strong negative values of $\delta\Pi/\delta\lambda_0$, which do not conform to this trend (Fig. 13).

A high value of $\delta\Pi/\delta\lambda_0$ lowers the probability of the stream

intersecting Earth’s orbit for a major fraction of solar longitude. Very few prograde long-period comet meteor showers are known with inclinations less than 70°, but that could be all or in part due to dynamically old long-period comets tending to evolve towards retrograde orbits (e.g., Fernández et al., 2016).

4.3. Magnitude distributions

Over time, also the meteor magnitude distribution of a shower is expected to change. Particles of different mass or size may weather collisions and other destructive forces in the interplanetary medium in different ways, and the long-term dynamical evolution by non-

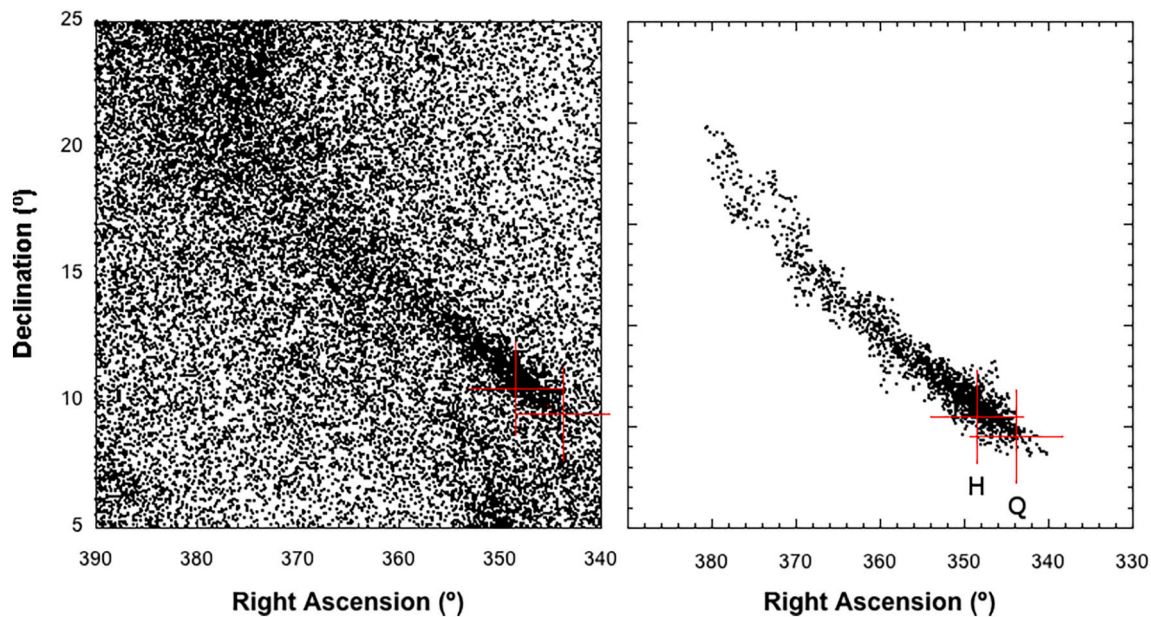


Fig. 4. Comet C/1979 Y1 (Bradfield) and the July Pegasids (#175).

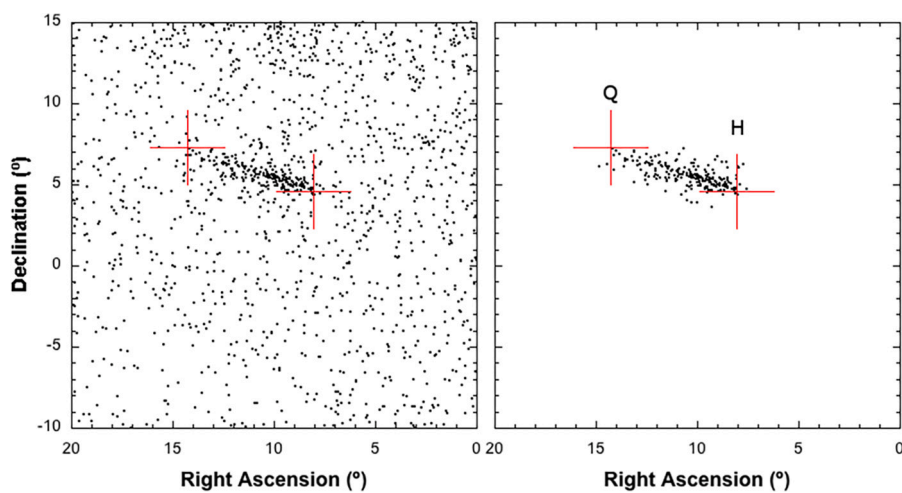


Fig. 5A. Comet C/1864 N1 (Tempel) and the delta Piscids (#410).

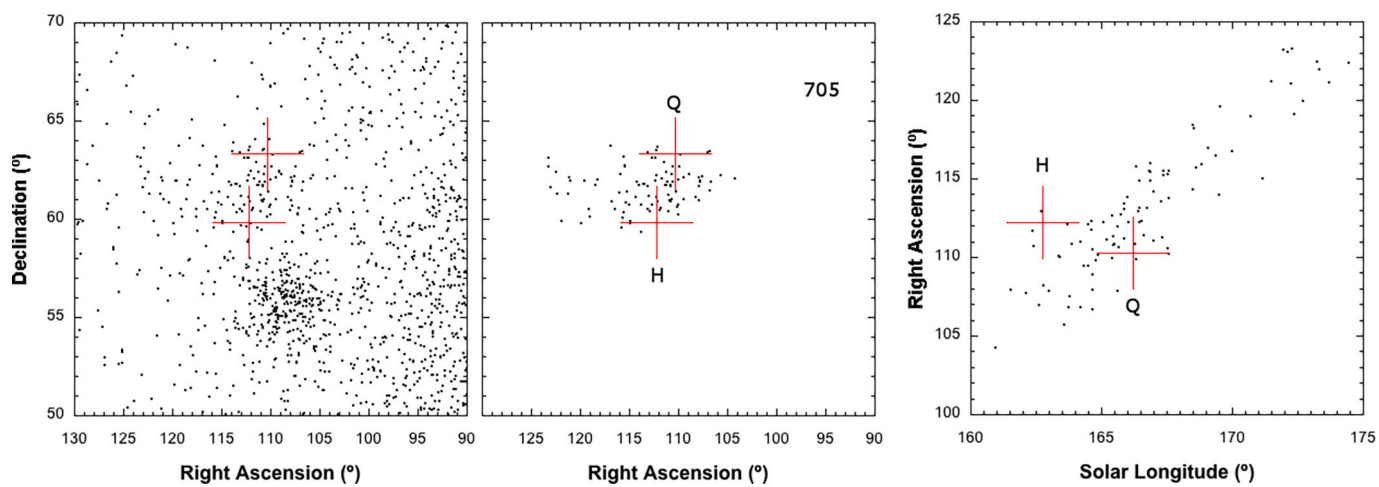


Fig. 5B. Comet C/2002 Y1 (Juels-Holvorcem) and the UY Lyncids (#705). The stronger shower just south of the UY Lyncids are the September Lyncids (#81).

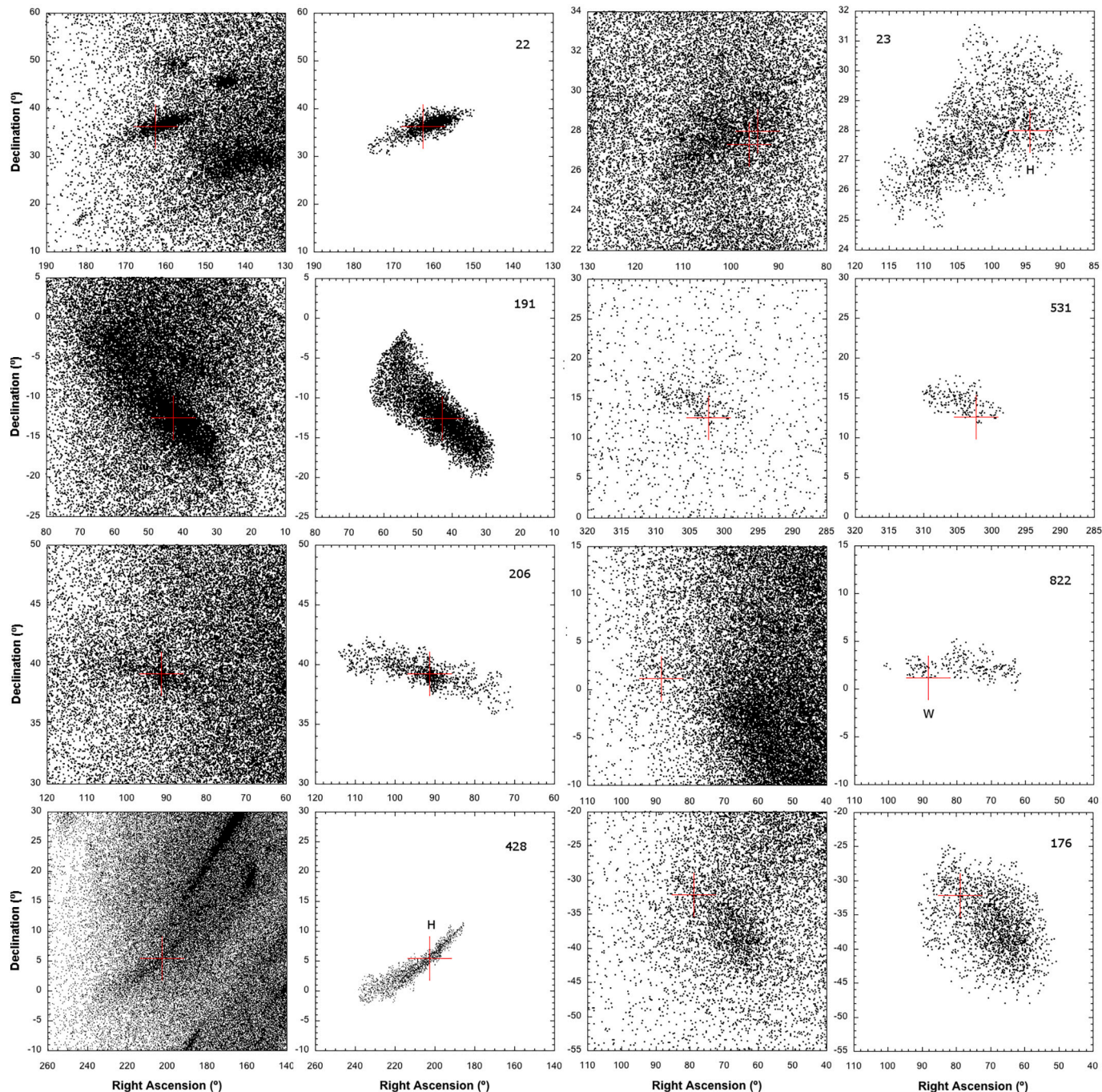


Fig. 6. Possible long-period comet showers located in a strong sporadic background. The theoretical radiant of solution method Q is shown, unless otherwise indicated.

gravitational forces depends on particle mass and size (Jenniskens, 2006).

The meteor magnitude (m) distribution index $\chi = N(m + 1)/N(m)$ of a shower is related to the meteoroid differential mass distribution index (s) in the stream, whereby $s = 1 + 2.5 \log(\chi)$ (Jenniskens, 2006). Low values of $\chi \sim 1.7\text{--}2.3$ (for +5 to -5 magnitude meteors) are known only from young meteoroid streams, like the Leonid storms of Halley-type comet 55P/Tempel-Tuttle (Jenniskens, 2006). The older annual showers often have $\chi \sim 2.5$, while the sporadic background that they evolve into has a high $\chi \sim 2.9\text{--}4.3$ (Jenniskens, 2006; Blaauw et al., 2011a, 2011b). On the other hand, there are also young showers, like the Andromedid storms of Jupiter-family comet 3D/Biela, that are rich in faint meteors with $\chi \sim 3.6$ (Jenniskens, 1995).

Table 6 lists the measured values for each of the long-period showers studied here. Short-duration showers show a range of χ values similar to known young showers, but the lowest values of $\chi \sim 1.7\text{--}2.3$ are missing. The longest duration showers have $\chi > 3.4$, values similar to that of the sporadic background.

Fig. 14 shows how the magnitude distribution index changes as a function of the four measures of meteoroid stream dispersion discussed before: that in the observed stream duration in solar longitude ($\Delta\lambda_0$), the corrected cross section ($\sigma\Lambda$), and the dispersion in the two radiant coordinates in geocentric ecliptic longitude and latitude ($\sigma\lambda^*\cos(\beta)$ and $\sigma\beta$). Error bars in the magnitude distribution index are 2σ . If we average the three measures of stream dispersion Δ , $\sigma\lambda\cos(\beta)$ and $\sigma\beta$ for each shower, all but showers 120 and 410 scatter along a least-squares fit line

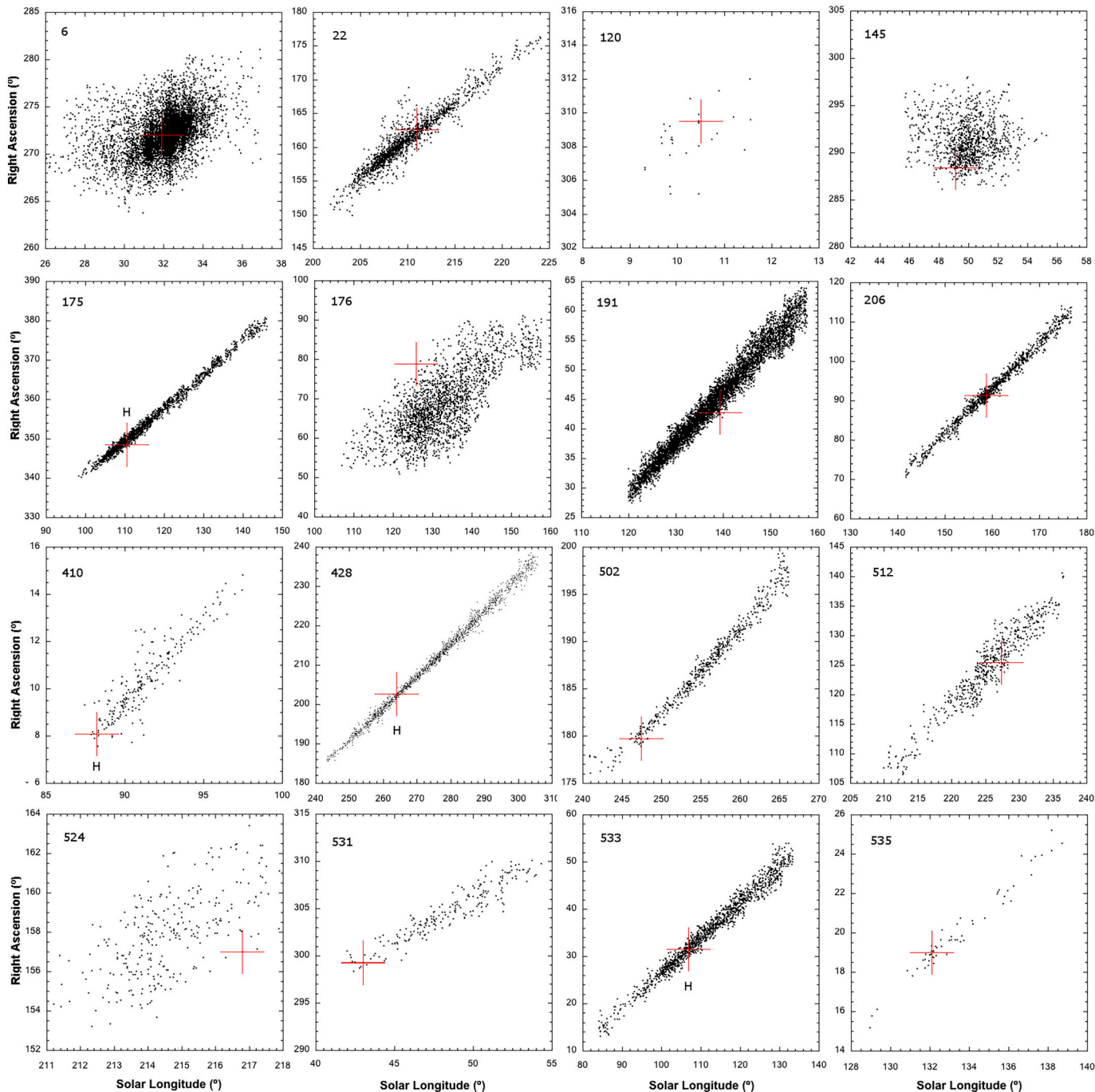


Fig. 7. Radiant drift of potential long-period comet showers and the theoretical radiant position according to method Q, unless marked otherwise.

with intercept $\chi = 2.45 \pm 0.07$ and slope $\delta\chi/\delta(\sigma\beta) = 0.57 \pm 0.05$ per degree (correlation coefficient $R = 0.86$). It is possible that the showers come in at least two types, grouped along a similar slope but with different intercept, shown by the solid lines in Fig. 14.

5. Discussion

5.1. Reliability of the associations

What is the likelihood that an association is wrongly identified? The number of identified meteor showers in the data is about 260, some last tens of days, others less than a day. The long-period comet showers are concentrated in the apex source and the toroidal source, which cover only $\sim 1/3$ of the sky. Given a random position of the radiant in place

and time, and an acceptability limit of 5° between theoretical radiant and shower radiant and 10 days in peak time, the probability of a chance association is about one in 1000. Hence, most of the associations listed in Tables 2A and 2B are expected to be real.

5.2. Orbital period

Fig. 15 shows the encounter conditions of orbit miss distance and comet orbital period and whether a shower is detected or not. Based on this diagram, showers are detected for most comets with $P < 4000$ years (or approximately semi-major axis $a < 250$ AU). No showers are detected if the orbital period is longer.

The comets with associated meteor showers belong to the group of intermediate long-period comets (Wiegert and Tremaine, 1999;

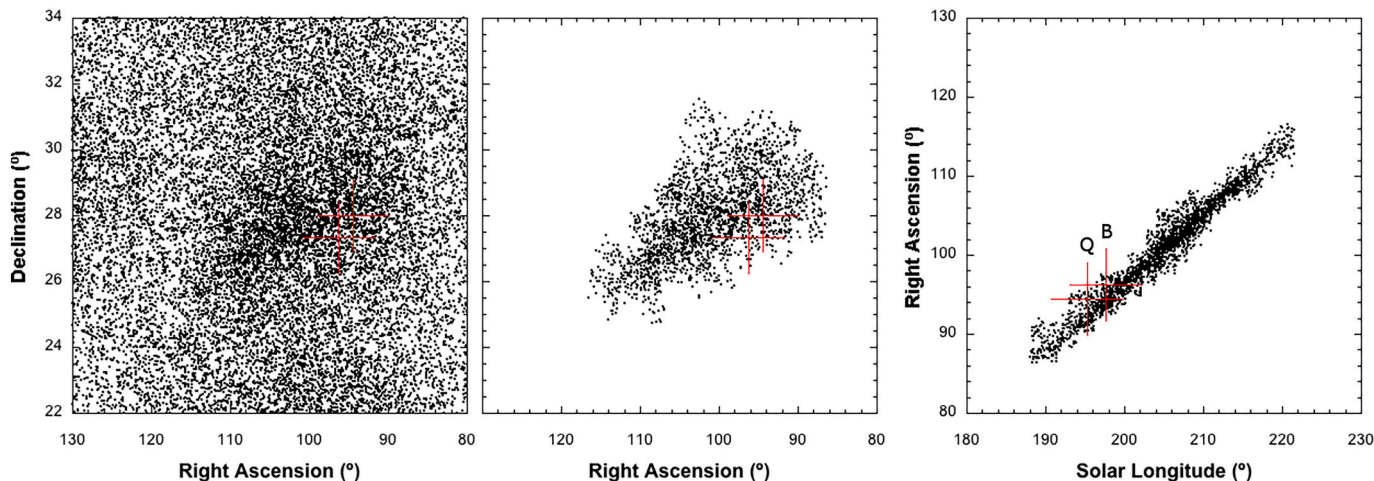


Fig. 8. Comet C/1987 B1 (Nishikawa-Takamizawa-Tago) and the epsilon Geminids (# 23).

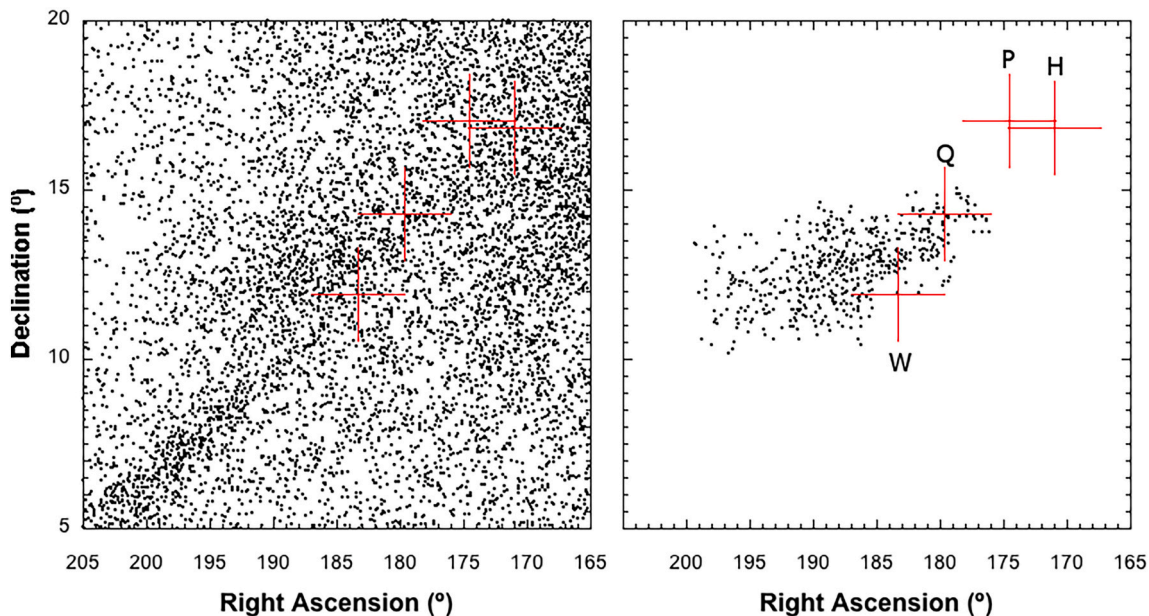


Fig. 9. Comet C/1961 T1 (Seki) and the December rho Virginids (#502). Left figure shows the combined data over the long 240–267° solar longitude interval of shower activity, while the right figure shows only the extracted shower meteors from the narrow 1° interval plots.

Fouchard et al., 2013), but not all intermediate long-period comets have associated showers. The limit of about 4000 years can be understood based on how much the particles disperse in the orbital track as a function of comet orbital period. Due to ejection velocity and radiation pressure, particles initially disperse in dust trails about proportional to semi-major axis $a^{2.5}$ (Jenniskens et al., 2020b), which corresponds to a dust density decreasing with orbital period $P^{1.67}$. Equally active comets near the observed limit of $P = 4000$ years will generate streams a factor of 100 less dense than those in orbits of 250 years. After formation of the stream, the dust density declines linearly with the number of subsequent orbital revolutions, until the particles have dispersed along the entire comet orbit. The dust density then increases in time with ongoing dust input in the stream and decreases in time from dispersion and weathering, depending on how well the particles survive the conditions of collisions, radiation, heating and electric charging in the interplanetary medium.

Near this limit of $P = 4000$ years, some comets produce showers and others do not, presumably as a function of the dust production rate at perihelion. Comet C/2013 K1 (Christensen), with miss distance = 0.061

AU and period $P = 715$ years, was expected to have produced a meteoroid stream (Fig. 15), but it has not. Indeed, this is an intrinsically faint comet with total magnitude of only $H_{10} = 18.4 \pm 0.7$ magnitude (JPL database). Another comet “missing in action” is intrinsically bright comet C/1931 P1 (Ryves), $H_{10} = 6.6$ (Hughes, 1987). This comet interacted strongly with Jupiter (Everhart and Nirupama, 1970) and lost a lot of orbital energy compared to its previous orbit; therefore, it is not expected to have a stream in the current orbit. It may create a meteor shower in the future.

5.3. Miss distance and orbital evolution

We find that comets produce detectable showers up to at least 0.117 AU miss distance. Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp), a very large and dusty comet, did not produce a meteor shower, even though the orbital period ($P \sim 2500$ years; Nagano, 2008) is near the acceptable limit (Fig. 1). Some other comets with miss distance > 0.100 AU also did not produce a meteor shower (Fig. 15).

The miss distance of 0.100 AU may not be a strict limit. The much

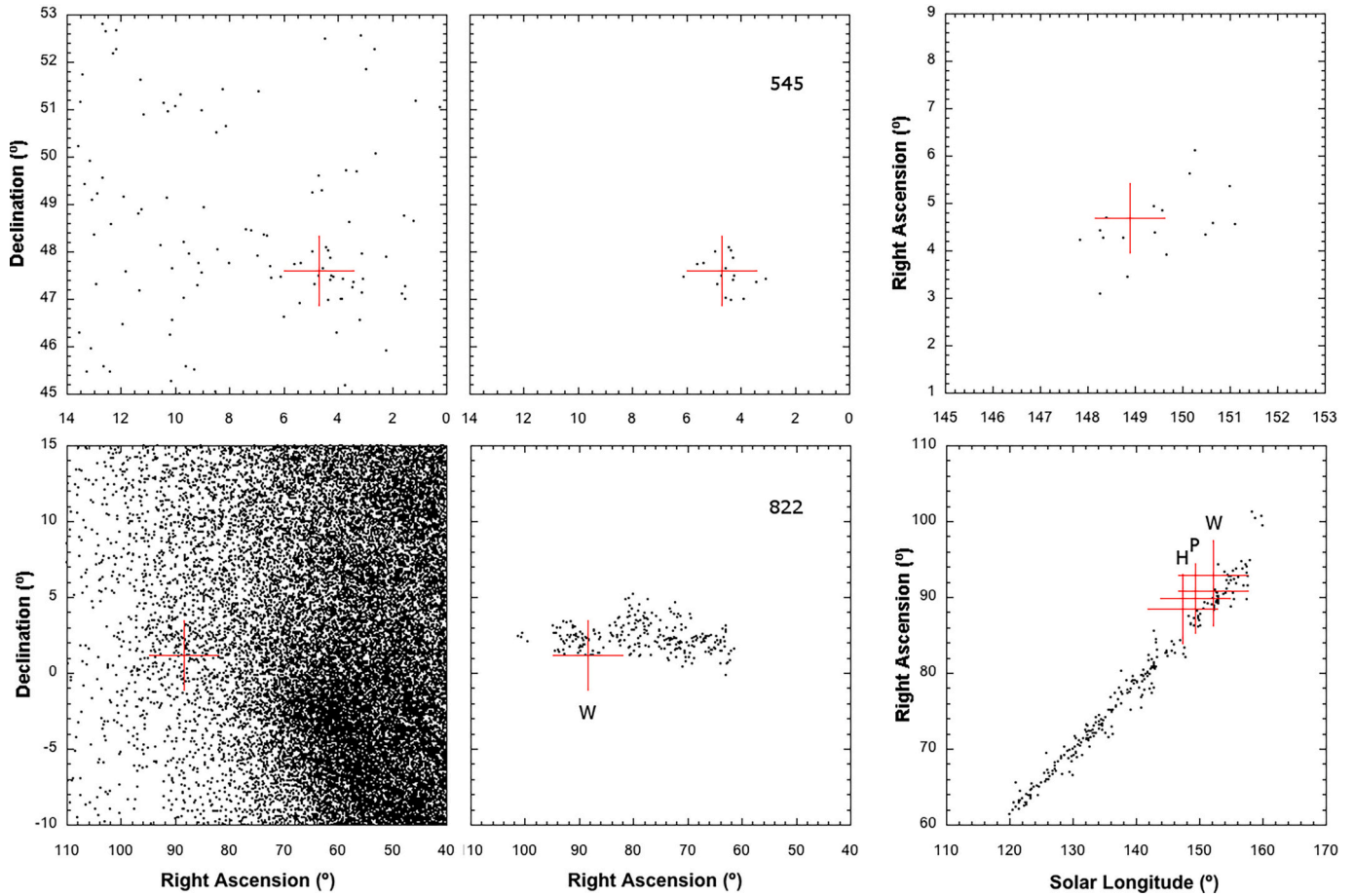


Fig. 10. Uncertain cases of showers #545 (faint) and #822 (slightly off-set radiant position).

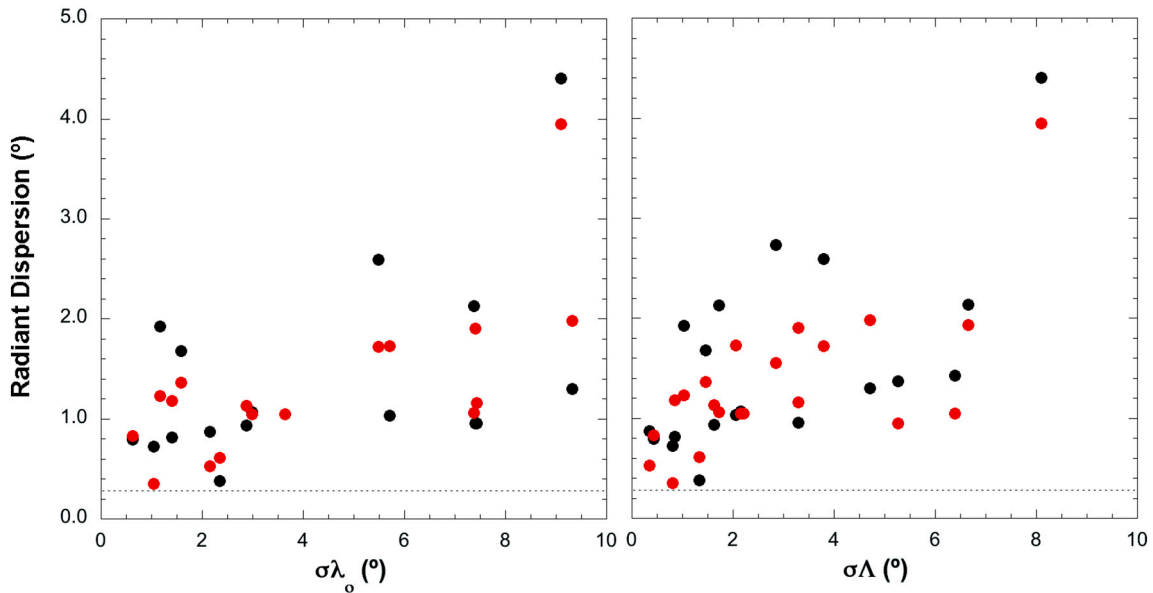


Fig. 11. The shower dispersion in solar longitude – before (left) and after (right) correction for encounter geometry – is compared to the observed radiant dispersions in ecliptic longitude (dark black dot) and latitude (light red dot). The dashed line marks the radiant dispersion from typical measurement error. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

smaller comet C/2002 Y1 (Juels-Holvorcem) has a slightly larger orbital period P of 3967 years and a slightly larger miss distance of 0.117 AU, but did produce a detectable meteor shower (#705). Indeed, because of

precession, it is possible that the comet orbit has evolved away from Earth's orbit, but still leaves a detectable shower. The previous comet orbit at the Epoch for which it is given only gives a snapshot of the

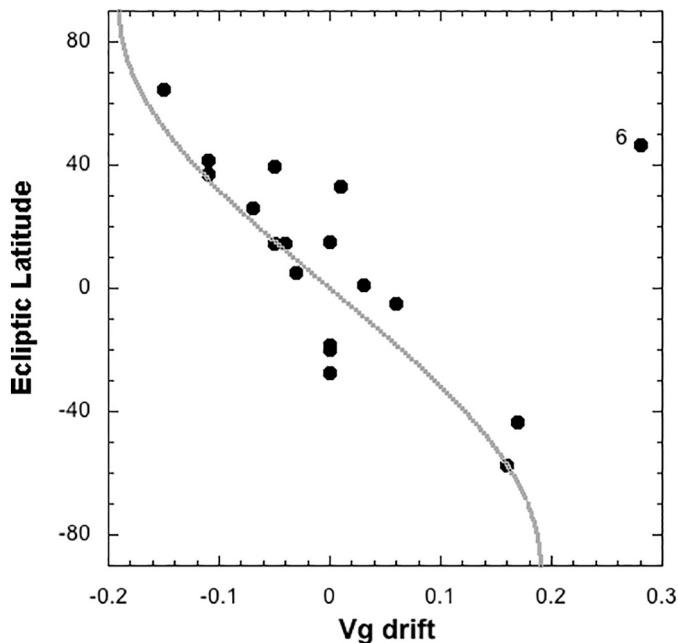


Fig. 12. The drift in velocity V_g (in units of km/s per degree of solar longitude) as a function of ecliptic latitude of the radiant. The outlier is shower 6, the April Lyrids.

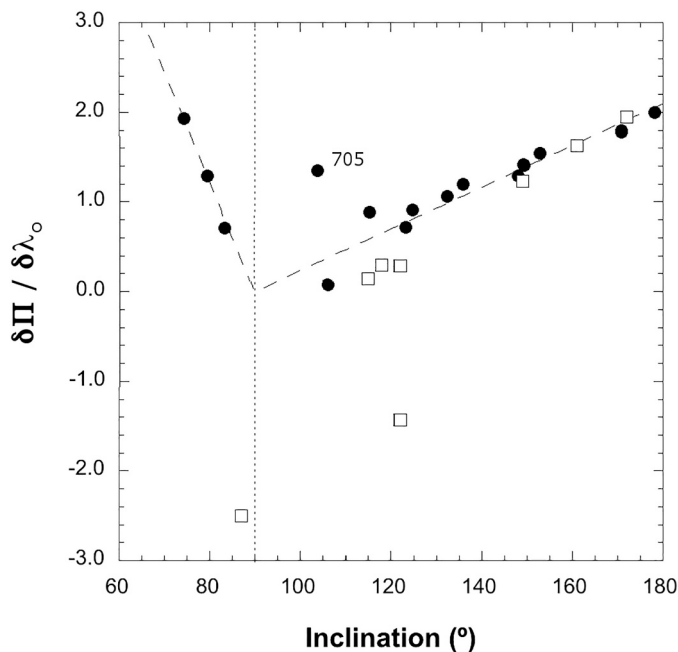


Fig. 13. The change in longitude of perihelion per unit of solar longitude, as a function of inclination. Prograde orbits were given a negative sign. Poorly observed outlier shower 705 is marked. Open squares show theoretical calculations by Hajduková and Neslusan (2017, 2019, 2020, 2021) and Neslusan and Hajduková, (2018a, 2018b, 2019, Neslusan and Hajduková, 2020).

orbital evolution of these comets, and therefore of the miss distance. Especially highly inclined comet Hale-Bopp’s orbital evolution is not typical for the evolution of lower-inclined comets.

Indeed, Hajduková and Neslusan (2020) recently identified comet C/1992 Q1 (Oshita) as a likely shower parent from dynamical modeling. Although comet Oshita last passed a wide 0.160 AU from Earth’s orbit, with a theoretical radiant at R.A. = 237.4°, Decl. = -52.0°, and $V_g =$

60.3 km/s at solar longitude 309.7°, there is no corresponding shower in the database. However, Hajduková and Neslusan (2020) found that evolved orbits over timescales of 50,000–80,000 years created streams intersecting Earth’s orbit corresponding to the χ -Andromedids (#580) and January alpha Ursae Majorids (#606).

Similarly, Neslusan and Hajduková (2019) identified associated showers for comet C/1963 A1 (Ikeya). Comet Ikeya last passed even further at 0.236 AU from Earth’s orbit, but evolution of the orbit shows it may have caused the π -Hydrids (#101), δ -Corvids (#729), November α -Sextantids (#483), and θ -Leonids (#881). The modeled showers typically have much larger dispersion than the observed showers, so there are still some questions to be answered before these associations can be considered established.

5.4. Identity of comets with unknown orbital period

One surprise was not to find a meteor shower at the theoretical radiant of comet C/1854 L1 (Klinkerfues). The comet orbit passed only 0.013 AU from Earth’s orbit, and the comet was associated with a meteor outburst of epsilon Eridanids (# 209) seen in 1981 (Jenniskens, 2006, p. 311; Vaubaillon and Jenniskens, 2007). However, the meteor outburst seen in 1981 may have been, instead, from a shower invisible in more recent years, or from a compact shower found nearby at R.A. = 47.5°, Decl. = -24.9° degrees at the solar longitude around the time of the observation, now called the τ^4 Eridanids (#840). That shower is too far from the theoretical radiant to associate with Klinkerfues. No orbital period is known for Klinkerfues. In this case, we can state that Klinkerfues likely has a very long orbital period ($P > 4000$ years) given that no associated meteoroid stream is detected.

It is less likely that these comets are Halley-type comets of shorter orbital period ($P \sim 20$ –250 years). Halley-type comets tend to evolve into more stable orbits defined by resonances with respect to Jupiter (Jenniskens, 2006) and tend to create dense meteoroid streams. Their orbital evolution can result in mass loss over a limited volume of space over very long periods of time (10,000–100,000 years).

5.5. Changes in orbital elements over time

The age of the streams under consideration here are not known (Vaubaillon et al., 2019). It is not clear that Poynting-Robertson drag plays a significant role in the meteor shower evolution, as assumed by Arter and Williams (1997) for example, who derived an age of 1.5×10^6 years for the April Lyrids. Only if ages are this high does Poynting-Robertson drag play a role. Stream ages are likely much less than the timescales considered by Nesvorný et al. (2011) for the evolution of the background zodiacal cloud.

Most of the evolution is the result of planetary perturbations (Jenniskens, 2006; Hajduková, 2013). The shower duration is thought to reflect differences in orbital period, reflecting different rates of precession of angular orbital elements ω , Ω , and $\Pi = \omega + \Omega$ (and to a lesser extent inclination i). In that manner, the meteoroids will trace the orbital evolution of the comet. The calculated rate of precession for these angular elements for some of the known comets (Table 7) compared to observed dispersions suggest ages in the range 2×10^4 – 3×10^5 years. However, those “ages” do not correlate with radiant dispersion.

The rate of change of Π with solar longitude along Earth’s orbit is not a good measure of age (neither is the change in the closely related radiant dispersion in longitude $\delta\lambda\cos(\beta)/\delta\lambda_0$), because $\delta\Pi/\delta\lambda_0$ strongly correlates with the inclination of the comet orbit (Fig. 13). The dispersion in node may be a better measure, and that is what is used in the top panels of Fig. 14.

5.6. Changes in the particle size distribution over time

The increase of shower magnitude distribution index with shower dispersion as shown in the three diagrams of Fig. 14 is intriguing. If real,

Table 7

Modeled rate of change in key orbital elements of the long period comet orbit over a 100,000 year period, expressed in degrees per 100,000 years.

Comet	Shower	i (°)	P (y)	$\Delta\Omega$ (°)	$\Delta\omega$ (°)	$\Delta\Pi$ (°)	Reference
C/1894 G1	--	87	816	+0	-10	-10	Hajduková and Neslusan (2021)
C/1992 W1	--	115	928	+7	-8	-1	Hajduková and Neslusan (2020)
C/1975 T2	524	118	444	+10	-7	+3	Hajduková and Neslusan (2019)
C/1936 O1	--	122	888	+9	-17	-8	Hajduková and Neslusan (2021)
C/1853 G1	531	122	781	+7	-5	+2	Neslusan and Hajduková (2020)
C/1979 Y1	175	149	304	+66	+15	+81	Hajduková and Neslusan (2017)
C/1963 A1	--	161	934	+21	+26	+47	Neslusan and Hajduková (2019)
C/1964 N1	533	172	418	+290	+275	+565	Neslusan and Hajduková (2018a)

this correlation suggests that the meteoroid population starts out with proportionally more large grains and the size distribution index increases slowly while the stream spreads in node and radiant width. On average, by the time when a meteoroid streams' radiant dispersion has increased by 1 degree, the magnitude distribution index is up 0.57 from

an initial value of $\chi \sim 2.45$ at ejection.

The scatter in the individual diagrams of Fig. 14 is larger than the measurement error. This could merely reflect that some showers disperse faster than others, but it is also possible that the position in the diagram still reflects the different particle mass distributions during

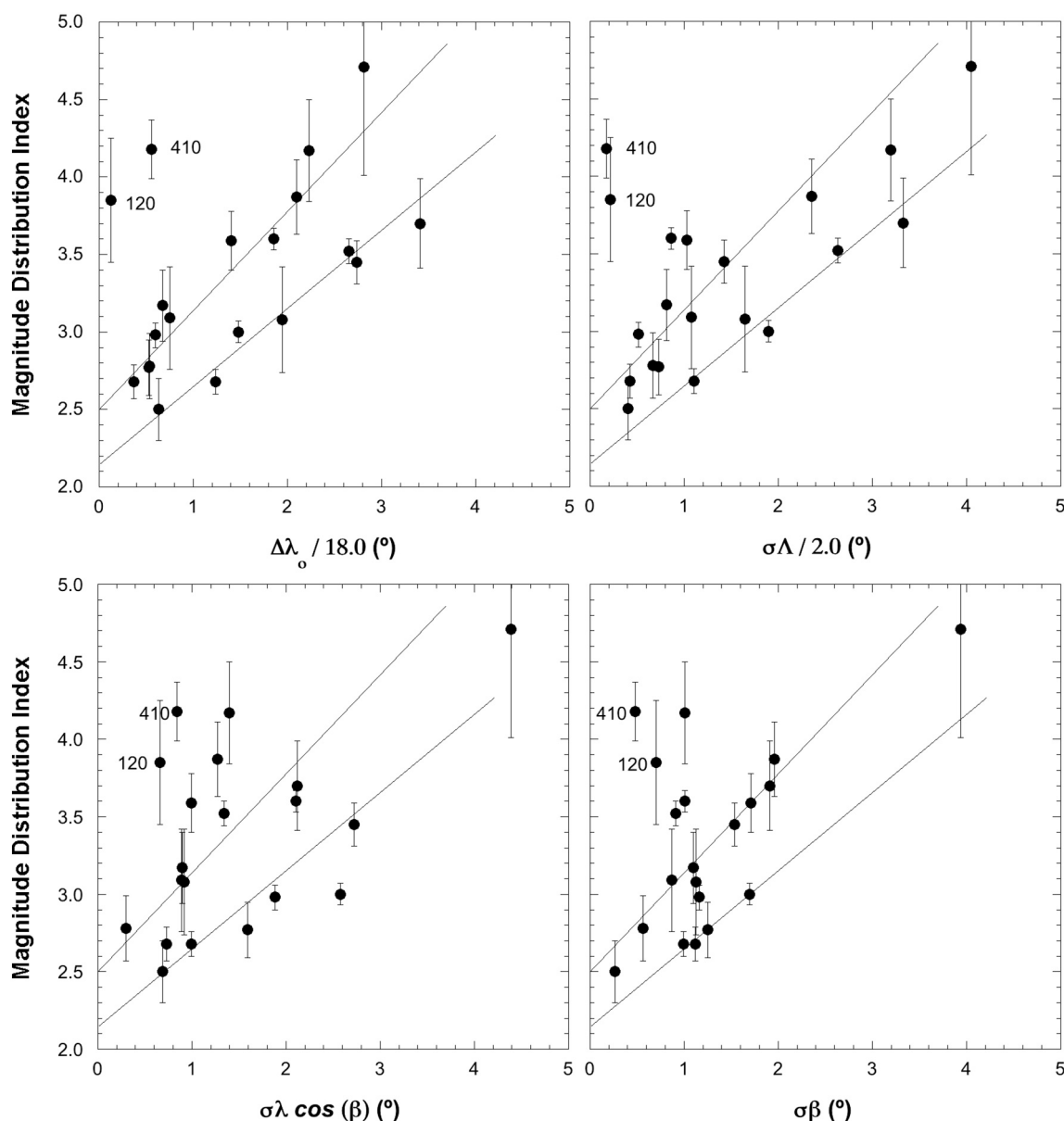


Fig. 14. Shower magnitude distribution index r , with 2σ uncertainty error bars, as a function of dispersion along the stream cross section ($\Delta\lambda_0$ and Λ , scaled by factor given) and radiant dispersions in ecliptic longitude (λ) and latitude (β). Assuming that the various dispersions are a function of age, the two lines may represent the evolution of the dust size distribution starting from different dust fragmentation processes during ejection, while showers #120 and #410 could represent streams that formed from yet another fragmentation mechanism.

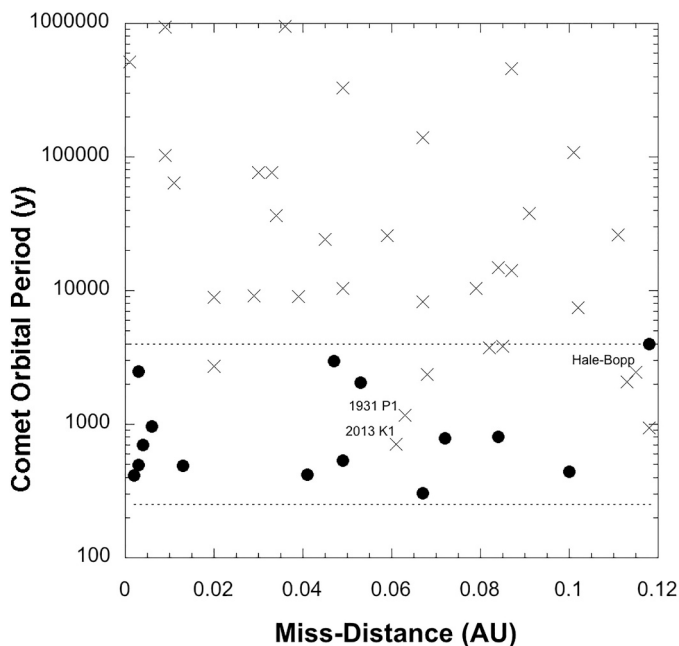


Fig. 15. Long-period comets that have (black dots) and have not (crosses) associated meteor showers. The non-detections for comets Hale-Bopp, C/1931 P1 and C/2013 K1 are discussed in the text.

ejection. The initial value of χ at ejection may reflect processes during stream formation or the meteoroid distribution during assembly when comets formed (Table 8).

To guide the eye and to facilitate the comparison of the plots of different measures of dispersion, two lines are drawn in the diagrams of Fig. 14 that show how such evolution could manifest in this diagram if starting at initial values of $\chi \sim 2.51$ and $\chi \sim 2.15$. Some possible meteoroid fragmentation processes and their expected values (Jenniskens, 2006, p. 94) are summarized in Table 8. The value $\chi \sim 2.15$ is expected from a collisional cascade, where particles just big enough to do so break up the larger particles at small relative speeds, presumably during outflow. The value $\chi \sim 2.51$ is expected from the catastrophic fragmentation of grains, such as when grains are destroyed by collisions with other grains at high relative speeds. Even higher initial values of χ can arise if the grain size distribution was steep during comet formation, or if grains are especially fragile and fall apart by processes other than collisions, such as the evaporation of a volatile glue.

Most showers tend to scatter along these two lines. Assuming dispersion is a linear function of age, each shower was assigned the fragmentation type given in Table 8 that may have been at the origin of the stream, corresponding to whether they scatter along the lower or upper lines in Fig. 14. These types are summarized in the last column of Table 6.

Short period comet 67P/Churyumov-Gerasimenko has a differential size distribution index of $\alpha = 4.0$ for sizes >1 mm (Fulle et al., 2016), where $\alpha = 3 - s$. This translates to a magnitude distribution index of $\chi = 2.51$ (Jenniskens, 2006, p. 92), corresponding to that of a Type 2

Table 8

The different types of meteoroid fragmentation with typical differential mass distribution index (s) and magnitude distribution index χ outcomes (Jenniskens, 2006).

Type	Fragmentation	Result	s	χ	Example showers
0	Collisionally relaxed	Equal combined cross-sectional area in each magnitude bin.	1.67	1.85	Leonids (outburst)
1	Collisional cascade	Particle broken by mass just big enough to do so.	1.83	2.15	α Monocerotids (outburst) ^a
2	Catastrophic fragmentation	Equal amount of mass in each magnitude bin.	2.00	2.51	Perseids (annual)
3	Fragmentation by non-collisional processes	Evaporation of glue, repulsive forces from charge, heat/cold, spin up, etc. Depends on intrinsic size distribution and mechanism.	~ 2.39	~ 3.6	Andromedids (outburst)

^a (Jenniskens et al., 1997).

meteor shower. Other example showers are given in Table 8.

Showers #120 and #410 do not fall in either group, but are brief and have a high magnitude distribution index. Both showers are among the smallest datasets in our sample. That makes these prone to systematic uncertainties, notably if the detection probability of the video camera systems differs from that used in our analysis. That said, it is possible that showers #120 and #410 were created with $\chi \sim 3.6$ under similar conditions as the Andromedid stream (Type 3). For example, if processes other than collisions, such as the failure of a volatile glue between constituent grains, caused the particles to quickly disintegrate. Alternatively, the initial χ values may be a reflection of particle size distributions that are an intrinsic property of the material in the comet. In that case, the observed size distribution may be those of the assembled particles when the comet formed.

5.7. Comet absolute brightness and stream density

On the scale of an order of magnitude, it is expected that the most active comets create the richest meteor showers. In detail, there are many factors that can skew that relationship. In this case, the comets have a relatively narrow range of orbital periods spanning a factor of 16 (250–4000 years). Some appeared to eject more dust than others in the observed return, but the observed orbit may not be representative of earlier activity. The age of the streams differ. Also, the encounter conditions of the streams vary, including miss distance, entry velocity (44–70 km/s) and magnitude distribution index, which affect the observing conditions. Moreover, the activity is unevenly covered by the camera networks in time due to weather, due to location (different range of radiant elevations), and due to variations in operational efficiencies.

That said, it is interesting to examine the correlation. Fig. 16 shows the integrated meteor flux over the stream activity profile versus the H_{10} brightness of the comet. Because magnitude is defined on a log scale, this is a log-log diagram. In the top diagram, we simply plotted the number of detected meteors. We noticed six showers that fall along the expected proportionality line, where five magnitudes correspond to a factor of 100. They are much weaker showers than the rest.

In the bottom diagram, we attempted to correct the meteor count for some of the shower-to-shower detection efficiency differences from velocity and magnitude, and normalize the flux to that of a fixed mass limit of 0.1 g meteoroids (Jenniskens, 1994) using the measured magnitude size distribution and the magnitude-mass relationship of Jenniskens (2006, p. 594), still on a relative scale because of unknown factors such as the weather conditions at each of the networks over time, and still leaving the miss-distance to the comet orbit unaccounted for because the dust distribution perpendicular to Earth’s path is unknown. The six showers again stand out from the rest.

Those six weak showers are from comets 1739 K1 (responsible for shower #22), 1864 N1 (#410), 1879 M1 (#512), 1853 G1 (#531), 1939 H1 (#535), and 1978 V1 (#545). Only two have known orbital periods, and those are <800 years.

It is possible that we see here the difference between past returns with normal cometary outgassing (the six weak streams) and comets that experienced one or more episodes of fragmentation, therefore creating rich streams in the past. Fragmentations are common among long period comets (Weissman, 1980). We note that the Lyrids (#6) and

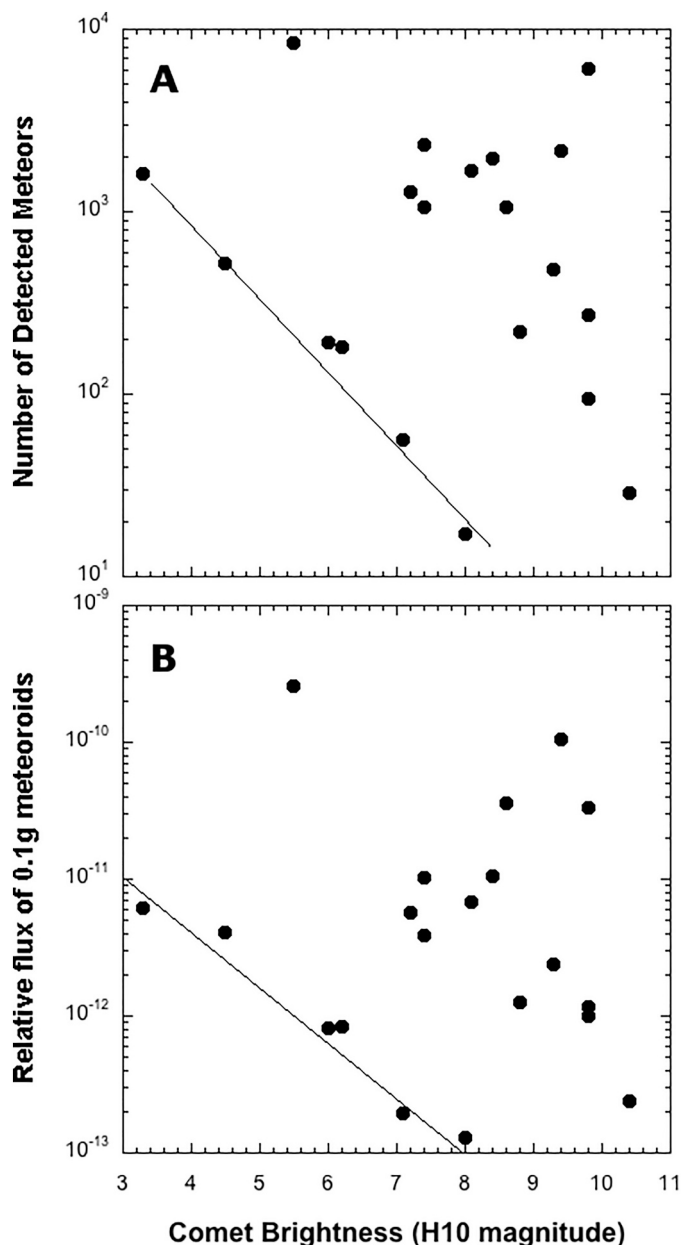


Fig. 16. The integrated meteor flux over the stream activity profile versus the H_{10} brightness of the comet (absolute magnitude of the comet at 1 AU distance compared). A) total number of detected meteors. B) normalized to reflect the flux of >0.1 g meteoroids. The solid lines depict proportionality.

eta Lyrids (#145) with ghost showers indicative of fragmentation belong to the latter (fragmentation) group. The magnitude distribution index does not correlate with these two groups, suggesting that initial χ is not different for normal outgassing than for a disruption event.

6. Conclusions

We find that at least 14, and perhaps as many as 20, known long-period comets produce meteor showers on Earth. By demonstrating the presence of an associated shower, the parents established in this work include C/1939 H1 (Jurlof-Achmarof-Hassel) for IAU shower #535 and C/1964 N1 (Ikeya) for shower #533. We also demonstrated the association of C/1979 Y1 (Bradfield) with shower #175, C/1864 N1 (Tempel) with shower #410, C/1879 M1 (Swift) with shower #512, and C/2002 Y1 (Juels-Holvorcem) with shower #705. These comets have

orbital periods ranging from 250 to 4000 years, and all but one pass Earth's orbit to ≤ 0.10 AU.

The annual showers of some have very long periods of activity, up to 60 days, that point to a role for precession in the meteoroid stream evolution. Precession is also observed in the change of the longitude of perihelion along the path of Earth in the shower. The rate of change as a function of solar longitude depends strongly on inclination of the comet orbit, suggesting that the rate of change of the longitude of perihelion is not a good measure of age.

Over time, the streams are expected to broaden. Assuming that this evolution is linear for shower duration and radiant dispersion, we find that the meteoroid size distribution index steepens with increasing dispersion. The showers start from three different initial size distributions: those that appear to have started out with a meteoroid size distribution characterized by a collisional cascade ($\chi \sim 2.15$), those that started out characterized by catastrophic collisions ($\chi \sim 2.51$), and those that started out rich in small grains from disruption by processes other than collisions ($\chi \sim 3.6$).

Brighter, more active, comets are expected to produce more intense showers. Six comets with weak showers fall on the expected proportionality trend with comet absolute magnitude, whereas all others have much denser streams. The weaker streams may have been produced by normal cometary activity, while the denser streams could have resulted from one or more episodic disruptions of the parent comets. Those with normal activity have orbital periods less than 800 years.

Finally, we provide a list of non-detections of poorly observed comets that pass close to Earth's orbit but show no meteor shower activity. Most of these are intrinsically bright, which suggests that they have orbital periods >4000 years if they had disruption events in the past (dense streams), or >800 years if not.

In future work, the meteor shower observations reported here can provide insight into the past dynamical evolution of known long-period comets. The nodal and radiant dispersion of long-period comet meteoroid streams need to be studied by dynamical modeling to measure their age.

Declaration of Competing Interest

None.

Acknowledgements

We thank the observers who host the camera stations that gathered the data described in this paper. We thank referees Jeremie Vaubaillon and an anonymous reviewer for helping improve the manuscript and Catherine Wolner for proof reading. E.J. is a Belgian FNRS Senior Research Associate. This work was supported by NASA grants 80NSSC19K0563 and 80NSSC19K0513 and by the University of Arizona under a NASA Contract NNM10AA11C issued through the New Frontiers Program for the OSIRIS-REX mission.

References

- Andreic, Z., Segon, D., Korlevic, K., Novoselnik, F., Vida, D., Skokic, I., 2013. Ten possible new showers from the Croatian Meteor Network and SonotaCo datasets. *J. Int. Meteor. Organ.* 41, 103–108.
- Arter, T.R., Williams, I.P., 1997. Periodic behavior of the April Lyrids. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 286, 163–172.
- Beech, M., Brown, P., Jones, J., 1996. On the non-observability of meteors from comet C/1995 O1 Hale-Bopp. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 283, 137–140.
- Blaauw, R.C., Campbell-Brown, M.D., Weryk, R.J., 2011a. Mass distribution indices of sporadic meteors using radar data. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 412, 2033–2039.
- Blaauw, R.C., Campbell-Brown, M.D., Weryk, R.J., 2011b. A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar – III. Mass distribution indices of six major meteor showers. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 414, 3322–3329.
- Chambers, J.E., 1997. Why Halley-types resonate but long-period comets don't: a dynamical distinction between short- and long-period comets. *Icarus* 125, 32–38.
- Drummond, J.D., 1981. Earth-orbit-approaching comets and their theoretical meteor radiants. *Icarus* 47, 500–517.

- Emel'lanenko, V.V., 1992. Diffusion of long-period meteor streams. *Astronomicheskii Vestnik: Issledovaniia Solnechnoi Sistemy* 26, 58–66 (in Russian).
- Everhart, E., Nirupama, R., 1970. Changes in total energy for 392 long-period comets, 1800–1970. *Astron. J.* 75, 258–272.
- Fernández, J.A., Gallardo, T., Young, J.D., 2016. The end states of long-period comets and the origin of Halley-type comets. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 461, 3075–3088.
- Fouchard, M., Richard, H., Froeschlé, Ch., Valsecchi, G.B., 2013. Planetary perturbations for Oort cloud comets. I. Distributions and dynamics. *Icarus* 222, 20–31.
- Fulle, M., Marzari, F., Della Corte, V., et al., 2016. Evolution of the dust size distribution of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from 2.2 AU to Perihelion. *Astrophys. J.* 821, 19–33.
- Greaves, J., 2012. Four meteor showers from the SonotaCo network Japan. *J. Int. Meteor. Organ.* 40, 16–23.
- Greaves, J., 2019. The December rho Virginids and comet C/1961 T1 (Seki). *J. Int. Meteor. Organ.* 47, 156–159.
- Groussin, O., Lamy, P.L., Jorda, L., 2010. The nucleus of comet C/1983 H1 IRAS-Araki-Alcock. *Planet. Space Sci.* 58, 904–912.
- Hajduková, M., 2013. Long-period meteor streams and the dispersion of semimajor axes of meteor orbits. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 65, 67–71.
- Hajduková, M., Neslusan, L., 2017. Regular and transitory showers of comet C/1979 Y1 (Bradfield). *Astron. Astrophys.* 605, A36–A49.
- Hajduková, M., Neslusan, L., 2019. Modeling of the meteoroid stream of comet C/1975 T2 and λ -Ursae Majorids. *Astron. Astrophys.* 627, A73–A81.
- Hajduková, M., Neslusan, L., 2020. The χ -Andromedids and January α -Ursae Majorids: a new and a probably shower associated with comet C/1992 Q1 (Ohshita). *Icarus* 351 article id. 113960.
- Hajduková, M., Neslusan, L., 2021. Modeling the meteoroid streams of comets C/1894 G1 (Gale) and C/1936 O1 (Kaho-Kozik-Lis). *Planet. Space Sci.* 195, 1105152 (in press).
- Hughes, D.W., 1987. Cometary magnitude distribution: the tabulated data. In: Nicolet, M., Rolfe, E., Battrick, B. (Eds.), *Symposium on the Diversity and Similarity of Comets*, ESA SP, Vol. 278. ESA, Noordwijk, the Netherlands, pp. 43–48.
- Jenniskens, P., 1994. Meteor stream activity I. The annual streams. *Astron. Astrophys.* 287, 990–1013.
- Jenniskens, P., 1995. Meteor stream activity II. Meteor outbursts. *Astron. Astrophys.* 295, 206–235.
- Jenniskens, P., 1997. Meteor stream activity IV. Meteor outbursts and the reflex motion of the Sun. *Astron. Astrophys.* 317, 953–961.
- Jenniskens, P., 2006. *Meteor Showers and their Parent Comets*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 790 pp.
- Jenniskens, P., 2008. The IAU meteor shower nomenclature rules. *Earth Moon Planet.* 102, 5–9.
- Jenniskens, P., Haberman, B., 2013. “Thatcher’s Ghost”: confirmation of the ν Cygnids (NCY, IAU #409). *J. Int. Meteor. Organ.* 41, 75–76.
- Jenniskens, P., Lyytinen, E., 2003. Possible meteors from comet C/1976 D1. In: Green, D. W.E. (Ed.), *CBET 8079*. Central Bureau of Astronomical Telegrams, p. 1.
- Jenniskens, P., Baggaley, J., Crumpton, I., Aldous, P., Pokorny, P., Janches, D., Gural, P. S., Samuels, D., Albers, J., Howell, A., Johannink, C., Breukers, M., Odeh, M., Moskovitz, N., Collison, J., Ganju, S., 2018. A survey of southern hemisphere meteor showers. *Planetary & Space Science* 154, 21–29.
- Jenniskens, P., Gural, P.S., Dymneson, L., Grigsby, B.J., Newman, K.E., Borden, M., Koop, M., Holman, D., 2011. CAMS: Cameras for Allsky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers. *Icarus* 216, 40–61.
- Jenniskens, P., Betlem, H., de Lignie, M., Langbroek, M., 1997. The detection of a dust trail in the orbit of an Earth-threatening long-period comet. *Astrophys. J.* 479, 441–447.
- Jenniskens, P., Lyytinen, E., Berner, C., 2015. Potential meteor shower from comet C/2015 D4 (Borisov). In: Green, D.W.E. (Ed.), *Central Bureau Electronic Telegrams*, No. 4127, #1, p. 1.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Gural, P.S., Albers, J., Haberman, B., Johnson, B., Morales, R., Grigsby, B.J., Samuels, D., Johannink, C., 2016. CAMS newly detected meteor showers and the sporadic background. *Icarus* 266, 384–409.
- Jenniskens, P., Lyytinen, E., Baggaley, J., 2020a. An outburst of delta Pavonids and the orbit of parent comet C/1907 G1 (Grigg-Mellish). *Plan. Space Sci.* 189 article ID 104979.
- Jenniskens, P., Lyytinen, E., Johannink, C., Odeh, M., Moskovitz, N., Abbott, T.M.C., 2020b. 2019 outburst of 15-Bootids (IAU#923, FBO) and search strategy to find the potentially hazardous comet. *Planet. Space Sci.* 181 article id. 104829.
- Kanamori, T., 2009. A meteor shower catalog based on video observations in 2007–2008. *J. Int. Meteor. Organ.* 37, 55–62.
- Kornos, L., Koukal, J., Piff, R., Tóth, J., 2013. EDMOND meteor database. In: Gysens, M., Roggemans, P., Zoladek, P. (Eds.), *Proceedings of the 2013 International Meteor Conference*, Poznan, Poland. International Meteor Organization, pp. 23–25.
- Kornos, L., Matlovic, P., Rudawska, R., Toth, J., Hajdukova, M., Koukal, J., Piff, R., 2014. Confirmation and characterization of IAU temporary meteor showers in EDMOND database. In: Jopek, T.J., Rietmeijer, F.J.M., Watanabe, J., Williams, I.P. (Eds.), *Meteoroids 2013*. Proceedings of the Astronomical Conference held at A. M. University, Poznan, Poland, Aug. 26–30, 2013. A. M. University Press, pp. 225–233.
- Kornos, L., Tóth, J., Porubcan, V., Klacka, J., Nagy, R., Rudawska, R., 2015. On the orbital evolution of the Lyrid meteoroid stream. *Planet. Space Sci.* 118, 48–53.
- Koseki, M., 2019. Profiles of meteor shower activities inferred from the radiant density ratios (DR). *J. Int. Meteor. Organ.* 47, 168–179.
- Kronk, G.W., 1999a. *Cometography: Volume 1, Ancient – 1799: A Catalog of Comets*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 563 pp.
- Kronk, G.W., 1999b. *Cometography: Volume 2, 1800–1899: A Catalog of Comets*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., p. 835.
- Levison, H.F., Duncan, M.J., 1997. From the Kuiper Belt to Jupiter-family comets. The spatial distribution of ecliptic comets. *Icarus* 127, 13–32.
- Lyytinen, E., Jenniskens, P., 2013. Meteor outbursts from long-period comet dust trails. *Icarus* 162, 443–452.
- Moorhead, A.V., 2021. Forbidden mass ranges for shower meteoroids. *Icarus* 354 article id. 113949.
- Nagano, S., 2008. OAA computing section circular NK 1553. In: *OAA Computing and Minor Planet Sections*. Retrieved November 27, 2020.
- Neslusan, L., Hajduková, M., 2018a. Meteor showers of comet C/1964 N1 (Ikeya). *Astron. Astrophys.* 616, 162–169.
- Neslusan, L., Hajduková, M., 2018b. Meteoroid stream and meteor showers of comet C/1964 N1. Part II. *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* 48, 554–583.
- Neslusan, L., Hajduková, M., 2019. Long-period comet C/1963 A1 (Ikeya), the probable parent body of π -Hydrids (101), δ -Corvids, November α -Sextantids, and θ -Leonids. *Astron. Astrophys.* 631, A112–A122.
- Neslusan, L., Hajduková, M., 2020. The relationship between comet C/1853 G1 (Schweizer) and the γ -Aquilids and 52 Herculis meteor showers. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 498, 1013–1022.
- Neslusan, L., Svoren, J., Porubcan, V., 1998. A computer program for calculation of a theoretical meteor-stream radiant. *Astron. Astrophys.* 331, 411–413.
- Nesvorny, D., Vokrouhlicky, D., Pokorny, P., Janches, D., 2011. Dynamics of dust particles released from Oort cloud comets and their contribution to radar meteors. *Astrophys. J.* 743, 37–49.
- Ohtsuka, K., 1989. The association of the η Lyrids with comet IRAS-Araki-Alcock (1983 VII). *Tokyo Meteor Netw. Rep.* 8, 44–49.
- Olsson-Steel, D., 1987. Comet Nishikawa-Takamizawa-Tago (1987c) and the Epsilon Geminid meteor shower. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 228, 23P–28P.
- Porubcan, V., Kornos, L., Cevolani, G., 2007. The orbit, structure and evolution of the Lyrid meteoroid stream. In: *Il Nuovo Cimento, Note Brevi*, Vol. 30, pp. 423–428.
- Rendtel, J., Arlt, R., Koschak, R., et al., 1995. In: *Rendtel, J., Arlt, R., McBeath, A. (Eds.), Handbook for Visual Meteor Observers*. International Meteor Organization, Potsdam, Germany, p. 169.
- Segon, D., Gural, P., Andreic, Z., Skokic, I., Korlevic, K., Vida, D., Novoselnik, F., 2014. New showers from parent body search across several video meteor databases. *J. Int. Meteor. Organ.* 42, 57–64.
- Segon, D., Vaubaillon, J., Gural, P.S., Vida, D., Andreic, Z., Korlevic, K., Skokic, I., 2017. Dynamical modeling validation of parent bodies associated with newly discovered CMN meteor showers. *Astron. Astrophys.* 598, A15–A28.
- Segon, D., Korlevic, K., Andreic, Z., Vida, D., Novoselnik, F., Skokic, I., 2018. Ten years of the Croatian meteor network. *J. Int. Meteor. Organ.* 46, 87–95.
- Sekhar, A., Asher, D.J., 2013. Saturnian mean motion resonances in meteoroid streams. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 433, L84–L88.
- Sekhar, A., Asher, D.J., Werner, S.C., Vaubaillon, J., Li, G., 2017. Change in general relativistic precession rates due to Lidov-Kozai oscillations in solar system. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 468, 1405–1414.
- Southworth, R.B., Hawkins, G.S., 1963. *Statistics of meteor streams*. Smithsonian Contrib. Astrophys. 7, 261–285.
- Ueda, M., 2012. Orbits of the July Pegasid meteors observed during 2008 to 2011. *J. Int. Meteor. Organ.* 40, 59–64.
- Vaubaillon, J., Jenniskens, P., 2007. Dust trail evolution applied to long-period comet C/1854 L1 (Klinkerfues) and the ϵ -Eridanids. *Adv. Space Res.* 39, 612–615.
- Vaubaillon, J., Neslusan, L., Sekhar, A., Rudawska, R., Ryabova, G.O., 2019. From parent body to meteor shower: the dynamics of meteoroid streams. In: *Ryabova, G.O., Asher, D.J., Campbell-Brown, M.D. (Eds.), Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 161–186, 336 pp.
- Vida, D., Segon, D., Merlak, A., 2019. The overview of the Global Meteor Network project and preliminary results of the 2018 Geminids. *eMeteorNews* 4, 22–24.
- Vokrouhlicky, D., Nesvorny, D., Jones, L., 2019. Origin and evolution of long-period comets. *Astron. J.* 157, 181–208.
- Vsekhsvyatskii, S.K., 1964. *Physical Characteristics of Comets*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 596 pp.
- Weissman, P.R., 1980. Physical loss of long-period comets. *Astron. Astrophys.* 85, 191–196.
- Wiegert, P.A., Tremaine, S., 1999. The evolution of long-period comets. *Icarus* 137, 84–121.
- Wiegert, P.A., Brown, P.G., Weryk, R.J., Wong, D.K., 2011. The Daytime Craterids, a radar-detected meteor shower outburst from hyperbolic comet C/2007 W1 (Boattini). *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 414, 668–676.

A.2 “Physical characterization of equal-mass binary near-Earth asteroid 2017 YE5: a possible dormant Jupiter-family comet”

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

F. Monteiro¹,^{*} E. Rondón¹, D. Lazzaro¹,^{*} J. Oey², M. Evangelista-Santana¹, P. Arcoverde¹,
M. De Cicco¹, J. S. Silva-Cabrera³, T. Rodrigues¹ and L. B. T. Santos⁴

¹Observatório Nacional, R. Gen. José Cristino, 77 - São Cristóvão, 20921-400 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

²Blue Mountains Observatory, 94 Rawson Pde. 2780 Leura, New South Wales 2780, Australia

³CONACYT – Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM), AP 106, Ensenada 22800, BC, Mexico

⁴Division of Space Mechanics and Control, INPE, C.P. 515, São José dos Campos, 12227-310 São Paulo, SP, Brazil

Accepted 2021 August 18. Received 2021 August 18; in original form 2021 May 23

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 μm 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 ($T_J = 2.87$), we suggest that it is a dormant Jupiter-family binary comet.

Key words: techniques: photometric – techniques: spectroscopic – minor planets, asteroids: individual: 2017 YE5.

1 INTRODUCTION

The identification of binary systems among the near-Earth asteroids (NEAs) has grown considerably in recent years, mainly due to detections made by radar observations and to the increase in the number of photometric light curves. It is estimated that about 15 per cent of NEAs larger than 0.2 km are binaries, with the majority being formed by one larger primary component rotating rapidly, and a much smaller secondary component, generally referred to as satellite (Margot et al. 2002; Pravec et al. 2006; Pravec & Harris 2007). One possible explanation for NEA binary formation could be the rotational disruption of reacumulated bodies, likely as a result of the Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack (YORP) effect (Pravec & Harris 2007; Walsh, Richardson & Michel 2008; Pravec et al. 2010; Jacobson & Scheeres 2011; Walsh & Jacobson 2015). This effect is the anisotropic thermal re-emission of sunlight by a rotating asteroid, creating torques that modify its rotational period and spin-axis pole (Rubincam 2000; Vokrouhlický, Nesvorný & Bottke 2003; Hanuš et al. 2011, 2013). Thus, the binary formation can occur after the increase in the asteroid rotation rate due to the

YORP effect, causing the centrifugal force to overcome the self-gravity of the rubble pile aggregates and the asteroid to shed mass from the equator and subsequently form a secondary component (as modelled by Walsh et al. 2008). Moreover, other binary formation mechanisms are predicted for different populations and size ranges of asteroids, such as capture, collisions, and tidal processes (Merline et al. 2002; Margot et al. 2015; Walsh & Jacobson 2015). Therefore, to achieve a better understanding of the formation and evolution of these systems is necessary to know their physical properties.

NEA 2017 YE5 made an Earth close approach on 2018 June 21 at a distance of about 0.04 au. This object has a semimajor axis (a) of 2.82 au, an eccentricity (e) of 0.71, and an inclination (i) of 6.22 deg. It is also classified as a Potentially Hazardous Asteroid (PHA) by JPL’s Small-Body Database Browser, as it has a minimum orbital intersection distance (MOID) with respect to the Earth less than 0.05 au and an absolute magnitude $H \leq 22$. During its close Earth flyby it became an interesting radar target for Arecibo, Goldstone, and Green Bank Observatories. Thus, radar observations performed between 2018 June 21 and 26 from these radio telescopes showed that 2017 YE5 is actually composed of two asteroids of similar size and mass in mutual orbit about each other (Taylor et al. 2018, 2019). To date, only four near equal-mass binaries have been discovered among the NEA population, including (69230) Hermes, (190166) 2005 UP156, 1994 CJ1, and 2017 YE5.

* E-mail: filipeastro@on.br (FM); lazzaro@on.br (DL)

The radar observations indicated that both components in the 2017 YE5 system have about 900 m in diameter, slight different spherical shapes and possibly different radar scattering properties (Taylor et al. 2018, 2019). Close flyby of 2017 YE5 also provided an excellent opportunity for systematic photometric observations using small ground-based telescopes (e.g. Warner 2018). This is very interesting because the radar and optical observations are very complementary and can allow to constrain their physical properties, including their masses and densities (Scheirich & Pravec 2009; Margot et al. 2015). For this reason, in general, binary asteroids are interesting targets for studies on internal structure and composition.

The Tisserand parameter (T_J) is often employed to distinguish between asteroid and comet orbits with reference to the Sun and Jupiter as the major influencing bodies. For the 2017 YE5 system, this parameter is $T_J = 2.87$, implying a typical Jupiter-family comet orbit, as defined by Levison & Duncan (1994) ($2 < T_J < 3$). In addition, it has a MOID with respect to Jupiter of 0.42 au and it is quite close to the 5:2 mean motion resonance with Jupiter, whose center is located at $a = 2.825$ au. All these facts led us to investigate the nature of this binary asteroid using data from different observatories. Thus, we carried out photometric follow-up of the 2017 YE5 system during its close flyby to determine its physical properties. In this work, we present results from our full characterization of 2017 YE5 using photometric and near-infrared spectroscopy data to constrain its orbital and rotational period, colour indices, albedo, taxonomic type and probable source region. Finally, we compare our results with those previously reported from radar observations.

2 PHOTOMETRIC STUDY

2.1 Observations and data reduction

Photometric observations of 2017 YE5 system were made at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (MPC code Y28, OASI - Nova Itacuruba) on six nights in 2018 July, within the framework of the IMPACTON project. The images were acquired with the 1.0 m $f/8$ Classic Cassegrain Telescope and an Apogee Alta U42 CCD camera with a 2048×2048 array of $13.5 \mu\text{m}$ pixels in a 2×2 binning mode. This configuration provides a field in the focal plane of 11.8×11.8 arcmin and has an image scale of 0.343 arcsec per pixel (unbinned). Additional information on the OASI can be found in Rondón et al. (2020). The exposure time of the observations was adjusted according to the asteroid's brightness and sky motion. The light-curve observations were performed using the sidereal tracking and an R-Johnson-Cousins filter.

Photometric light-curve observations were also made from Blue Mountains Observatory (MPC code Q68 - BMO, Australia) where three telescopes system were used to observe the 2017 YE5 system. These observations occurred between 2018 July and August, using four different CCD cameras. Table 1 shows the observing circumstances and instruments used for all observations. The physical characteristics of the instruments used in the BMO are given in Table 2. The telescopes were set in sidereal tracking and the object was observed over several nights for 2–7 h. Images taken with all telescopes were unfiltered with exposures ranging from 60 to 180 s (with the exception of one night) to prevent trails due to the fast-apparent motion of the asteroid during its close approach.

The science images acquired to generate light curves were calibrated using the Maxim DL software following the standard procedures of data reduction, i.e. master-dark subtraction and master-flat correction. The flat-field frames and the dark frames were taken at the beginning and the end of each observation night, respectively. All

data measurements for light curves were made using MPO Canopus V10. In the case of BMO data, instrumental magnitudes were converted to V-Johnson-Cousins magnitudes using solar-coloured field stars from a version of the CMC-15 catalogue (<http://svo2.cab.inta-csic.es/vocats/cmc15/>) distributed with MPO Canopus. The OASI data set was maintained in R band. To generate the light curves, we obtained the reduced magnitude, i.e. the corrected magnitude to a unity distance by applying $-5 \log(r\Delta)$ to the observed magnitudes with r and Δ being, respectively, the asteroid's distances from the Sun and from the Earth in au.

To obtain a photometric spectrum, an additional observation from the OASI was made using the $g-r-i-z$ Sloan Digital Sky Survey (SDSS) filters. This observation occurred on 2018 August 9 and was performed by alternating each filter in the system, repeating four times in order to obtain an averaged spectrum. The images were obtained using the differential tracking mode to avoid trails due to the long exposure times (see Table 1). Additionally, using the Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (code 679, OAN-SPM), we observed 2017 YE5 system using photometry with four different broad-band filters (BVRI Johnson-Cousins filters) to obtain another photometric spectrum. This observation was made with a 2.1 m $f/7.5$ telescope and FLI E2V-4240 CCD camera of 2048×2048 array of $13.5 \mu\text{m}$ pixels in a 2×2 binning mode. This configuration gives a field of view of approximately 11.8×11.8 arcmin and an image scale of $0.176 \text{ arcsec pix}^{-1}$. This observation occurred on 2018 August 18 when the apparent magnitude of the asteroid was of about 20.

The data reduction in the both cases described above was performed using the Image Reduction and Analysis Facility (IRAF) software, also following the standard procedures. In order to determine the extinction coefficient and the zero-point of the night, selected standard stars (from Landolt 1992; Smith et al. 2002) were observed at different air masses over the night and in the same filters. The instrumental magnitudes of 2017 YE5 and of the standard stars were measured using aperture photometry with the task PHOT of the IRAF. The zero-point of the night is calculated from the difference between the catalogue magnitude of the standard star and the above-atmosphere instrumental magnitude of the standard star. The latter being the magnitude corrected for the atmospheric extinction. Lastly, the zero-point is removed from the above-atmosphere instrumental magnitude of the asteroid to find its calibrated magnitude. It is noteworthy that when the standard star was not observed at various air masses, we used several calibrated field stars to compute the zero-point of the night.

2.2 Light-curves analysis

One of the physical properties of the asteroids that can be directly derived from Earth observations is the rotational period, which is determined by analysis of light curves obtained through photometric data. The light curves also hold clues about the shapes and the surface variegation of asteroids, as well as they can reveal features that are common among binary asteroids. The most widely used period analysis method is the Fourier series analysis developed by Harris et al. (1989). This method easily provides us the rotational period of asteroids from fragmented light-curves data.

In the case of binary asteroids, the complex light curves require more attention, because each of the two components scatters sunlight and produces its own rotational light curve. In addition, brightness attenuation produced by mutual events (eclipses/occultations) can be observed in the combined light curves of the system's components, whenever the geometric configuration of the observations

Table 1. Observational circumstances of the 2017 YE5 system. For each date, the table shows the telescopes, filters, and cameras used, the apparent magnitude (V) and the exposure time, as well as the asteroid's distance from Earth (Δ) and from the Sun (r), and the solar phase angle (α), at the middle point of the observation interval.

Date	Telescope	Filter	Camera	Exposure time	V	r (au)	Δ (au)	α ($^\circ$)
Blue Mountains Observatory – BMO								
2018/07/05	0.35 m $f/7$ SCT Edge	Clear	SBIG ST8300	180	16.07	1.1363	0.1293	21.09
2018/07/06	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U6M	60	16.17	1.1460	0.1381	19.27
2018/07/06	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U6M	60	16.19	1.1477	0.1396	18.97
2018/07/13	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U6M	120	16.8	1.2162	0.2032	9.32
2018/07/15	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	120	16.96	1.2372	0.2233	7.83
2018/07/16	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	120	17.04	1.2471	0.2328	7.11
2018/07/17	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	120	17.11	1.2559	0.2415	6.58
2018/07/18	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	120	17.19	1.2660	0.2514	6.1
2018/07/19	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	120	17.28	1.2768	0.2622	5.76
2018/07/20	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	120	17.38	1.2869	0.2724	5.6
2018/07/21	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	120	17.47	1.2971	0.2828	5.61
2018/07/22	0.35 m $f/5.9$ SCT	Clear	SBIG ST8XME	180	17.57	1.3069	0.2928	5.76
2018/07/22	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	180	17.58	1.3072	0.2931	5.76
2018/07/22	0.35 m $f/7$ SCT Edge	Clear	SBIG ST8300	180	17.59	1.3082	0.2942	5.79
2018/07/24	0.61 m $f/6.8$ CDK	Clear	Apogee U16M	180	17.81	1.3290	0.3158	6.46
2018/07/24	0.35 m $f/5.9$ SCT	Clear	SBIG ST8XME	300	17.82	1.3300	0.3169	6.5
2018/07/25	0.35 m $f/5.9$ SCT	Clear	SBIG ST8XME	300	17.92	1.3395	0.3270	6.92
2018/07/25	0.35 m $f/7$ SCT Edge	Clear	SBIG ST8300	180	17.93	1.3400	0.3275	6.94
2018/07/31	0.35 m $f/5.9$ SCT	Clear	SBIG ST8XME	180	18.56	1.4003	0.3937	10.13
2018/08/10	0.35 m $f/5.9$ SCT	Clear	SBIG ST8XME	180	18.65	1.4098	0.4046	10.65
2018/08/04	0.35 m $f/5.9$ SCT	Clear	SBIG ST8XME	300	18.95	1.4404	0.4402	12.29
2028/08/04	0.35 m $f/7$ SCT Edge	Clear	SBIG ST8300	180	18.96	1.4418	0.4419	12.37
2018/08/05	0.35 m $f/7$ SCT Edge	Clear	SBIG ST8301	180	19.05	1.4514	0.4535	12.87
Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI								
2018/07/12	1.0 m $f/8$ CCT	R	Apogee U42	70	16.7	1.2010	0.1890	11.4
2018/07/13	1.0 m $f/8$ CCT	R	Apogee U42	70	16.8	1.2110	0.1982	10.2
2018/07/14	1.0 m $f/8$ CCT	R	Apogee U42	70	16.9	1.2211	0.2078	9.2
2018/07/15	1.0 m $f/8$ CCT	R	Apogee U42	60	17.0	1.2313	0.2175	8.3
2018/07/16	1.0 m $f/8$ CCT	R	Apogee U42	60	17.1	1.2414	0.2273	7.5
2018/07/17	1.0 m $f/8$ CCT	R	Apogee U42	60	17.1	1.2518	0.2374	6.8
2018/08/09	1.0 m $f/8$ CCT	g,r,i,z	Apogee U42	240	19.4	1.4886	0.4989	14.7
Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir - OAN-SPM								
2018/08/18	2.1 m $f/7.5$ RCT	B,V,R,I	FLI E2V-4240	300, 400	20.2	1.5826	0.6231	18.7

Note: SCT is the short for Schmidt Cassegrain Telescope; CDK is the short for Corrected Dahl Kirkham; CCT is the short for Classic Cassegrain Telescope; RCT is the short for Ritchey–Chrétien Telescope.

Table 2. Physical characteristics of the different instruments used to obtain photometric data.

Camera	Array	Pixel size (μm)	Telescope	Diameter (m)	Focal distance	
					(mm)	Design
SBIG ST8300	3326 \times 2504	5.4	Edge Celestron	0.35	2450	Schmidt Cassegrain Telescope
SBIG ST8XME	1530 \times 1020	9	Classic Celestron	0.35	2106	Schmidt Cassegrain Telescope
Apogee U16M	4096 \times 4096	9	Planewave 24	0.61	3980	Corrected Dahl Kirkham
Apogee U6M	1024 \times 1024	24	Planewave 24	0.61	3980	Corrected Dahl Kirkham
Apogee U42	2048 \times 2028	13.5	Astro Optik	1.0	7030	Classic Cassegrain Telescope
FLI E2V-4240	2048 \times 2028	13.5	UNAM	2.12	15 900	Ritchey–Chrétien Telescope

is favourable. Thus, photometric observations of such systems can reveal a signal with two (or more) different periods into a combined light curve. This can be represented as a linear addition of two Fourier series, as initially proposed by Pravec et al. (2006) in the following general form:

$$F(t) = F_1(t) + F_2(t) \quad (1)$$

$$F_1(t) = C_1 + \sum_{k=1}^{m_1} [S_{1k} \sin \frac{2\pi k}{P_1}(t - t_0) + C_{1k} \cos \frac{2\pi k}{P_1}(t - t_0)] \quad (2)$$

$$F_2(t) = C_2 + \sum_{k=1}^{m_2} [S_{2k} \sin \frac{2\pi k}{P_2}(t - t_0) + C_{2k} \cos \frac{2\pi k}{P_2}(t - t_0)], \quad (3)$$

where $F(t)$ is the total reduced flux at time t , t_0 is a zero-point time, $F_j(t)$ are the reduced fluxes of the components at time t , C_j are mean reduced fluxes of the components, C_{jk} and S_{jk} are the Fourier coefficients, P_j are the rotational periods, and m_j are the highest significant order. It is worth mentioning that for the use this method it was assumed that the rotation for each component is around its principal inertia axis. A complex light curve can also be produced by a single asteroid in a state of non-principal axis rotation (Pravec et al. 2005).

Initially, the rotational period was determined using the MPO Canopus, which incorporates the Fourier analysis algorithm (FALC) developed by Alan Harris. As a first hypothesis, it was considered that both components rotate synchronously with their mutual orbital period, as a doubly synchronous binary (e.g. NEA 69230 Hermes).

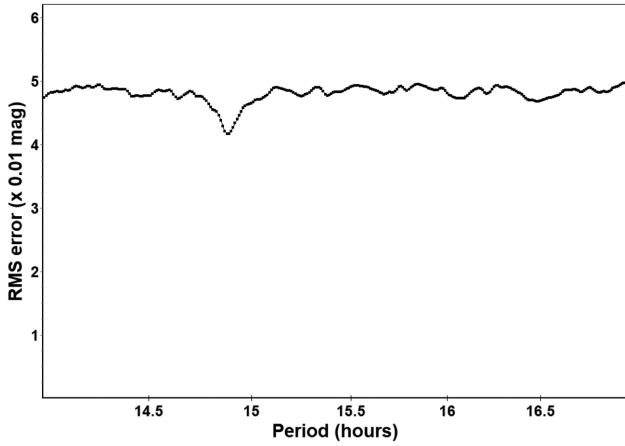


Figure 1. Period spectrum for the light-curve analysis of the 2017 YE5 system. The minimum at 14.88 h represents the rotational period of the primary component of 2017 YE5.

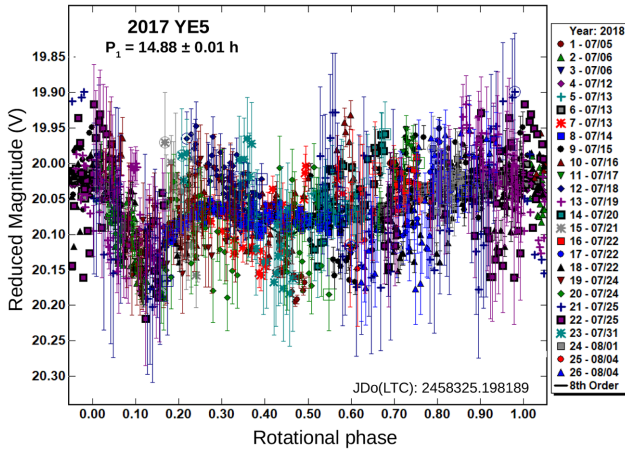


Figure 2. Rotational light curve of an asynchronous component in the 2017 YE5 system. The light-curve fits a period of $P = 14.88$ h.

Thus, applying a simple Fourier series analysis, we found a short primary period, indicated in the period spectrum shown in Fig. 1. In the figure is given the range of periods in the search along the x -axis while the RMS error values of the Fourier analysis are displayed along the y -axis. In general, the results found with the lowest RMS error corresponds very closely to the actual period. It is noteworthy that we performed the analysis using all light curves from BMO and only three from OASI, since the images obtained on July 15th, 16th, and 17th were rejected because the magnitudes of the asteroid were affected by the brightness of the field stars.

The best-fitting primary period displayed in the period spectrum is $P_1 = 14.88$ h. Its corresponding composite light curve is shown in Fig. 2. In the x -axis is given the rotational phase, ranging from -0.05 to 1.05 , and in the y -axis the reduced magnitude. The different symbols and colours indicate different nights of observation while the continuum line corresponds to the best fit. This result gives a value much shorter than the orbital period of about one day indicated by radar observations. Therefore, the primary period of 14.88 h is likely the rotational period of one of the components of 2017 YE5. This indicates that 2017 YE5 system may not be fully synchronized. Furthermore, the rotational light curve has a small amplitude of about 0.1 mag, indicating an approximately spherical shape for one of the

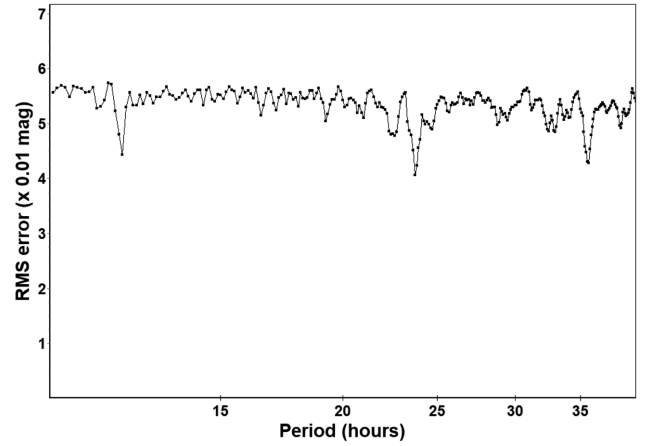


Figure 3. Period spectrum for the light-curve analysis of the 2017 YE5 system. The most likely solutions for the orbital period of the system are 11.9, 23.7, and 35.5 h, which represent the lowest RMS values in the period spectrum.

components, which is consistent with the radar images (Taylor et al. 2019).

With this in mind, we carried out a search for the orbital period of the 2017 YE5 system. For this, we used the ‘Dual Period Search’ tool in Canopus, an algorithm based on the work of Pravec et al. (2006). In the dual-period search initial process, the primary period is derived from the composite light curve, which is subtracted from the original data, leaving only the variations due to the secondary component and mutual events. Thus, the Fourier coefficients of the rotational light curve of $P_1 = 14.88$ h were used to subtract the primary curve from the data, leading to a first approximate orbital period (P_{orb}) of about 24 h. Once this is found, the orbital period is subtracted from the data, which allows finding a refined primary period. Then, we repeated these procedures iteratively until the results of the rotational and orbital periods stabilized. From this analysis using two Fourier series, we found a satisfactory fit for P_1 and P_{orb} . In Fig. 3 is shown the period spectrum of the last iteration for the orbital period, which displays three preferred secondary periods.

Looking at the period spectrum, it is possible to note three minima at about 11.9, 23.7, and 35.5 h, with a stronger signal for the middle one. The first and third are likely rotational aliases, which are usually caused by an miscount of the number of rotations over the time-span of the data. The shortest, for example, appears to be half of the orbital period. Therefore, we considered that the best-fitting solution of 23.706 h represents the orbital period (P_{orb}) of the components around their center of mass. The secondary light curve is shown in Fig. 4. This result is in good agreement with the previously results reported by radar observations, which provided an orbital period of roughly 24 h (Taylor et al. 2018, 2019). Another result was reported by Warner (2018), who found a period of 20.6 h from light curves obtained in 2018 June.

Despite their scatter, the orbital light-curve displays mutual events observed on at least four different nights at the BMO. These events appear to be partial, because the first minimum, for example, has a very low attenuation for a system of two components with nearly equal size. It is important to mention that the 2017 YE5 was initially observed very close to the mutual orbit pole in 2018 June by radar telescopes (Taylor et al. 2019). Because of this, the light curves presented in Warner (2018) do not show evidence of mutual events. Then, it is possible that we have observed the 2017 YE5 system in a geometric configuration still far from that which could exhibit

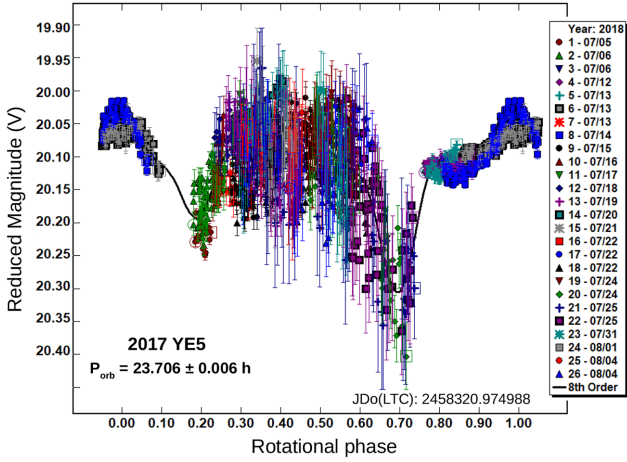


Figure 4. Composite light curve of 2017 YE5 system showing the mutual events. The light-curve fits an orbital period of about 23.7 h. The primary light curve component was subtracted.

total mutual events, with deeper attenuations. In addition, the light curves of binary asteroids can indicate whether the components are orbiting each other in a circular or elliptic orbit. In this case, the light curve of 23.7 h has symmetrically spaced mutual events of 0.5 in the rotational phase, indicating that the components are orbiting each other in a circular orbit.

We also searched for a third additive light curve, which could be related to the rotational period of the second component, presuming that it is not tidally locked, with a rotational period equal to the orbital period. To do this, we did another dual period search, but this time subtracting both the rotational and orbital light curves from the data in search of a third period in the system. However, we did not find a reasonable light curve, suggesting that the second component of the system rotates synchronously with its mutual orbital. On the other hand, it is also possible that the variations due to the rotation of the second component have been lost in the noise of the data.

Knowing that binary asteroids provide a unique opportunity to derive the mean density of the components, we used the determined physical characteristics of the 2017 YE5 system to derive its density. Radar estimates indicate that both components in the 2017 YE5 system are approximately 900 m in diameter and have an orbital separation of 1.8 km (four component radii) (Taylor et al. 2018, 2019). Here, we considered that the actual separation can be up to five component radii, since the two components may not be at their extreme elongation as they would be before/after maximum with a period of about 24 h, then the density would be from 0.6 to 1.2 g cm⁻³ as indicated by applying the third Kepler’s law. The latter being a more believable value consistent with various other binaries given in the literature (e.g. Margot et al. 2015).

2.3 Photometric spectrum

The photometric spectrum of an asteroid show how the reflectance of the asteroid’s surface varies with the wavelength and, depending of its behaviour, it is classified into a taxonomic class. Thus, the reflectance spectrum provides clues about asteroid surface physical properties and compositions. To derive the photometric spectrum we carried out the same procedure followed by Rondón et al. (2019). For OASI images, in the *SDSS* filters, we transformed the asteroid colour indices $(m_g - m_r)_A$, $(m_i - m_r)_A$, and $(m_z - m_r)_A$ to normalized reflectance at the *r* filter by removing the solar colours $(m_g - m_r)_\odot$,

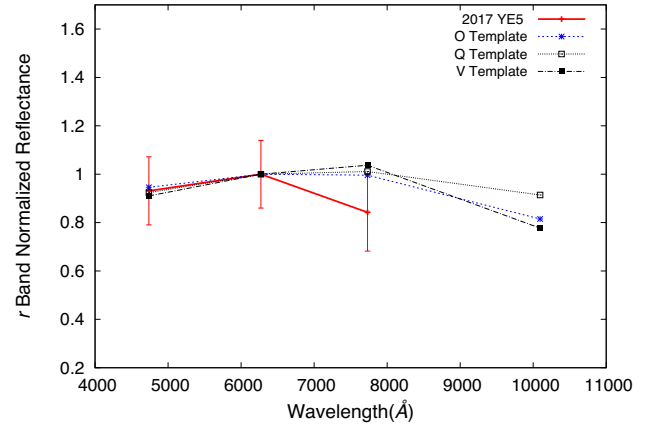


Figure 5. Normalized photometric spectrum of 2017 YE5 obtained using OASI data in the *SDSS* system. The points indicate the normalized reflectance and respective error calculated for each *SDSS* filter. The red solid line represents the observed spectrum while the segmented ones represent templates of three taxonomic types given in Carvano et al. (2010).

$(m_i - m_r)_\odot$, $(m_z - m_r)_\odot$,¹ and we rescaled the *g*, *i*, and *z* reflectance using the equation (4). For the OAN-SPM images, we normalized the obtained colour indices $(m_B - m_V)_A$, $(m_R - m_V)_A$, and $(m_I - m_V)_A$ to unity the reflectance at the *V* filter, and we rescaled the *B*, *R*, and *I* reflectance using the equation (4) modified for the Johnson–Cousins system. In this case, the solar colours removed were extracted of Ramírez et al. (2012)

$$\mathcal{R}_\lambda = 10^{-0.4[(M_\lambda - M_r)_A - (M_\lambda - M_r)_\odot]} \quad (4)$$

Subsequently, we compared the obtained photometric spectrum with several templates of the taxonomic scheme of Carvano et al. (2010), using a chi-square test to classify our spectra, as used in Rondón et al. (2019). In the case of the OASI spectrum, the comparison with the templates is direct. But, for the OAN-SPM spectrum, we had to first transform the templates of Carvano et al. (2010) from *SDSS* filters to Johnson–Cousins filters, using the transformation equations given in Jester et al. (2005).

In this way, using the previous procedure with the data acquired at OASI and OAN-SPM on 2018 August 9 and 18, respectively, we obtained the photometric spectra of 2017 YE5 (Figs 5 and 6). By applying the chi-square test with several templates of Carvano et al. (2010) to the spectrum obtained at OASI (Fig. 5) we found that the best fit correspond to Q-type, while the spectrum obtained at OAN-SPM correspond to a D-type (Fig. 6). It is noteworthy that in the OASI spectrum no data is available in the *z* filter, since the exposure time used to take images in this filter did not produce a good signal-to-noise ratio. Indeed, this lack introduces a large uncertainty in the classification of the OASI spectrum. However, it is known that changes in the reflectance spectrum can be caused by variations on surface composition (e.g. Murchie & Pieters 1996; Mothé-Diniz et al. 2000; Lazzaro et al. 2013), surface roughness (Hapke 1981, 1984), space weathering (e.g. Hapke 2001; Strazzulla et al. 2005; Pieters & Noble 2016), different phase angles and reddening effect (e.g. Reddy et al. 2012; Sanchez et al. 2012; Carvano & Davalos 2015), different shape (e.g. Carvano & Davalos 2015), and presence of coma (e.g. Rondón-Briceño, Carvano & Lorenz-Martins 2017).

Our photometric spectra were obtained at close phase angles, indicating that the difference between them is not associated with

¹<http://www.sdss.org/dr12/algorithms/ugrizvegasun/>

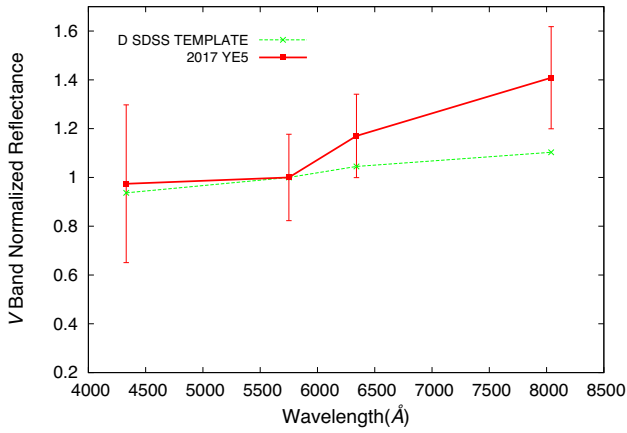


Figure 6. Normalized photometric spectrum of 2017 YE5 obtained using OAN-SPM data in the Johnson–Cousins system. The points indicate the normalized reflectance and respective error calculated for each Johnson–Cousins filter. The red solid line represents the observed spectrum while the segmented one is the template of D-type given in Carvano et al. (2010).

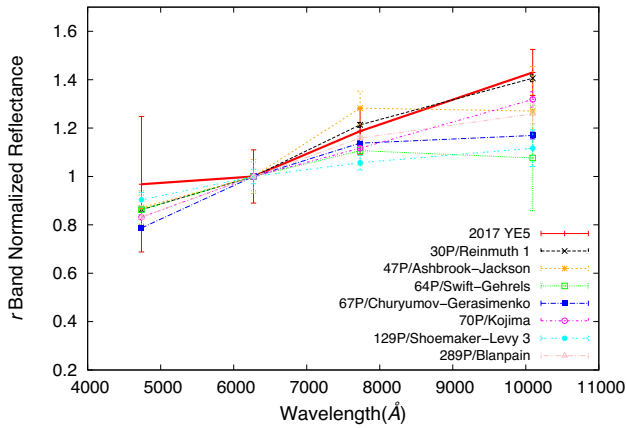


Figure 7. Normalized photometric spectrum of 2017 YE5 compared to different Jupiter-family comets in the SDSS system. The colour indices used to derive the reflectances of the comets were obtained in Solontoi et al. (2012).

change in phase angle. On the other hand, radar observations showed that this object is composed of two components with nearly equal size and shape, which exhibit different scattering radar properties (Taylor et al. 2018, 2019). Thus, the difference between our spectra may be due to the components having different compositions or the presence of a coma in one of them. The first hypothesis is plausible since the radar observations identified that the components of 2017 YE5 appear to show a distinct difference in their surface brightness and radar reflectivity, and the second is also plausible since our spectrum in Johnson–Cousins system is a D-type with a very strong red spectral slope, similar to obtained for some Jupiter-family comets (JFC; Fig. 7). This fact is also appreciable in the colour–colour diagram (Fig. 8), where again 2017 YE5 is seen as very reddish, falling among very low albedos objects, such as D-type asteroids and JFCs. This is in good agreement with an albedo of about 3 per cent, derived from the effective system diameter obtained from radar observations and an absolute magnitude of 19.2. It is important to reiterate that the 2017 YE5 system has a typical Jupiter-family comet orbit, with $T_J = 2.87$, implying in a dormant comet candidate due to its reddish surface. This classification is based on previous works (Fernández, Jewitt & Sheppard 2005; DeMeo & Binzel 2008; Kim, Ishiguro &

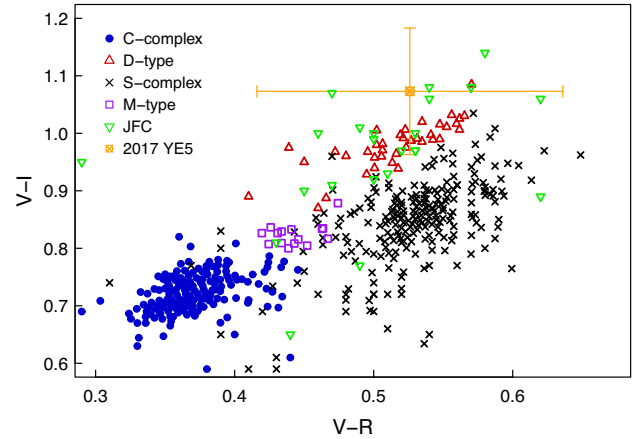


Figure 8. V–R versus V–I colour diagram for a sample with different taxonomic types, with 2017 YE5 falling among D-type asteroids and Jupiter-family comets (JFC). The asteroid data are taken from Zellner, Tholen & Tedesco 1985; Ieva et al. 2018, and the JFC data from Lamy & Toth 2009.

Usui 2014; Mommert et al. 2015) that identified comet candidates among asteroid-like NEAs using three criteria: $T_J \leq 3$, taxonomy (C, P, T, or D-types in Tholen classification), and/or low (<0.075) albedos. Next section, we will constrain the albedo through flux measurements at near-infrared (0.8–2.5 μm) wavelengths.

In addition, we computed the spectral slope of the D-type spectrum of 2017 YE5 following the S' definition in Luu & Jewitt (1996). We used the wavelength range 0.55 to 0.8 μm (corresponding to the V- and I-band center wavelengths in the Johnson–Cousins system) to measure the spectral slope in units of per cent/1000 \AA . Thus, the spectral slope of 2017 YE5 is $S' = 15 \pm 5$ per cent/1000 \AA . This value is very compatible with the mean slope of asteroids in cometary orbits (ACOs) ($S' = 9.7 \pm 4.6$ per cent/1000 \AA) and with the mean S' of the Damocloids ($S' = 12.2 \pm 2.4$ per cent/1000 \AA) presented in Licandro et al. (2018). According to Licandro et al. (2018), objects with $T_J \leq 3$ and $S' \leq 3$ per cent/1000 \AA are likely C- or B-type interloper asteroids, while objects in cometary orbits with $S' > 10$ per cent/1000 \AA are likely dormant comets.

3 SPECTROSCOPIC STUDY

3.1 Observations and data reduction

Near-infrared (IR) spectroscopic observations (0.8–2.5 μm) of 2017 YE5 were performed using the 3-m NASA’s Infrared Telescope Facility (IRTF) at Mauna Kea observatory (Hawaii) on 2018 June 23, within the framework of the MIT–Hawaii Near-Earth Object Survey (MITHNEOS). The near-IR spectrum of 2017 YE5 was obtained using the SpeX infrared spectrometer in prism mode (Rayner et al. 2003) on 2018 June 23 between 12:23 and 13:00 UTC when the apparent magnitude of the asteroid was 15.2 and at a phase angle of 79 deg. Weather conditions were photometric during the observation with an average atmospheric seeing of ~ 0.9 arcsec and a relative humidity of ~ 13 per cent. Apart from the asteroid, standard stars of solar type were observed to allow removal of the solar spectrum.

Reduction was carried out by the MITHNEOS team using the Image Reduction and Analysis Facility (IRAF) and Interactive Data Language (IDL). The object and standard stars spectra were then run through an IDL code to remove residual atmospheric effects, and finally the corrected object spectrum was divided by the average of the corrected standard star spectra to create the final reflectance

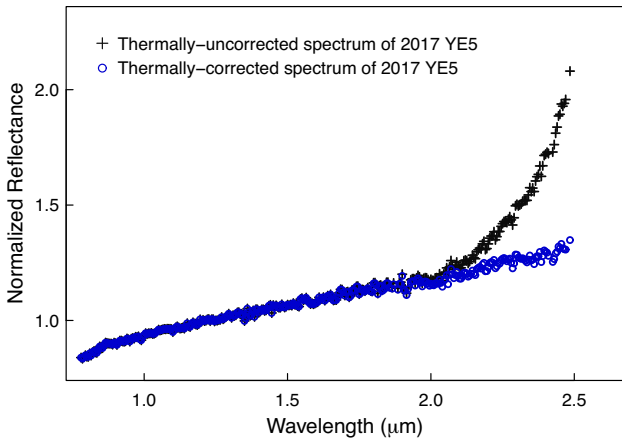


Figure 9. Near-IR spectrum of 2017 YE5 displaying a thermal emission at long wavelengths in the 2.5 μm range (black crosses) for which an albedo of 4 per cent was derived by fitting a thermal model. The blue circles depict the spectrum of the asteroid after removal of the modelled thermal excess. Both spectra have been normalized to unity at 1.25 μm . Taxonomic classification (D-type in this case) is derived from the thermally corrected spectrum.

spectrum for the object. A detailed description of the steps followed in the data reduction process can be found in Rivkin et al. (2004) and DeMeo & Binzel (2008). It is important to mention that the spectral data obtained by MITHNEOS has been continuously released for download and immediate use by the scientific community (e.g. Binzel et al. 2019).

3.2 Spectral characteristics of 2017 YE5

The spectrum of 2017 YE5 shows a distinct increase in reflectance in the near-IR wavelengths beyond 2 μm due to the presence of thermal emission (Fig. 9). Different studies have showed that, due to their relatively small distance from the Sun, low albedo NEAs usually show a thermal excess at the long wavelengths (Rivkin, Binzel & Bus 2005; Reddy et al. 2012). Thus, we were able to constrain the albedo value of 2017 YE5 using the methodology described in Rivkin et al. (2005) and references therein. This method includes the object's distances from Earth and Sun, the solar phase angle, slope parameter, albedo, emissivity (assumed to be 0.9), and the 'beaming' parameter (η).

Hence, to constrain the albedo of this object, we had to fit a thermal model to the measured thermal-infrared excess. This required estimating the reflectance without any thermal contribution emission in the 2.5 μm range. This was estimated by extrapolating a linear continuum from 1.5–1.8 μm to 2.5 μm . The measured thermal emission was fitted with a model thermal excess, using different beaming parameters (from 1 to 2), and allowing the albedo to be a fitted parameter. Then, this modelled thermal flux was subtracted from the measured thermal spectrum and the result is shown in Fig. 9. The best-fitting thermal model was found for an albedo of 0.04 and a thermal parameter $\eta = 1.25$. A reasonable fit was also found for an albedo of 0.02 and $\eta = 1.5$. The best-fitting albedo is determined as one that provides the lowest residual value between the thermally corrected spectrum and the extrapolation of the linear fit to the spectrum at wavelengths $< 1.8 \mu\text{m}$. This derived low-albedo confirms that 2017 YE5 is a possible dormant Jupiter-family comet.

Then, we used the thermally corrected spectrum to perform the taxonomic classification. It is important to mention that is very important to remove the thermal excess before carrying out the

classification procedures. According to Binzel et al. (2019), the spectrum of the asteroid after the removal of the modeled thermal excess is then representative of the intrinsic reflectance properties of the surface material. In addition, in the Bus-DeMeo taxonomy the spectral slope is calculated and removed prior to calculating principal components (PC1', PC2', etc), i.e. before the taxonomy classification (DeMeo et al. 2009). This is useful to minimize reddening effects due to phase angle and space weathering that can influence the Bus-DeMeo classification.

The classification into the Bus-DeMeo system (DeMeo et al. 2009) was accomplished using the online taxonomy calculator (<http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html>) developed by Stephen M. Slivan. Considering only the NIR spectrum, we classified 2017 YE5 as a D-type asteroid under this taxonomy system, with principal components $\text{PC}_{\text{ir}1}' = -0.1156$, $\text{PC}_{\text{ir}2}' = 0.1802$ and $\text{PC}_{\text{ir}3}' = 0.0340$. This spectrum shows a slope of 0.25, which is slightly larger than the minimum infrared slope for D-type asteroids (DeMeo et al. 2009). We also searched for the taxonomic classification using combined visible photometric and NIR spectra. This allowed us to note a very steep slope with a slight gentle curvature around 1.5 μm , which is common in D-types. The 0.45–2.5 μm spectral range of 2017 YE5 shows a slope of 0.43, within the slope range of 0.38–1.5 identified for D-type asteroids (DeMeo et al. 2009), and principal components $\text{PC}1' = 0.1456$, $\text{PC}2' = -0.2402$ and $\text{PC}3' = -0.1407$. This classification is in good agreement with the determined low albedo of 2–4 per cent. Assuming an absolute magnitude of 19.2 provided by the JPL, the effective diameter of this object has a value between 0.96 and 1.36 km. This interval is consistent with the effective diameter of 1.27 km, which was calculated for the combined components each about 0.9 km, indicated by the radar observations (Taylor et al. 2019).

Regarding to the taxonomic classification, our result supports that 2017 YE5 has surface properties to be considered a dormant comet candidate. It is important to note that the spectrum of 2017 YE5 can have been affected by space weathering, whose effects on primitive asteroids are not yet clear. For example, reddening and bluing trends in the colours and spectra of primitive asteroids have been reported in the literature (e.g. Nesvorný et al. 2005; Lazzarin et al. 2006). This could explain the fact that the spectral slope and the principal components of 2017 YE5 are also similar to those expected for T-type asteroids (DeMeo et al. 2009).

4 DISCUSSION

Applying the Fourier analysis of the sum of two series to the light curves obtained at OASI and BMO, we found two additive light curves for the 2017 YE5 system. The best-fitting orbital period, $P_{\text{orb}} = 23.7$ h, was derived after removing the rotational light curve of $P_1 = 14.88$ h from the data using the dual-period search tool available in Canopus software. Our orbital period of about one day is in accordance with the value estimated by radar observations (Taylor et al. 2018, 2019). The primary period suggests that one of the components can be in a kind of spin-orbit resonance 5:8, indicating a possible asynchronous component or tumbling rotator in the system. The possibility of a non-principal axis rotator in this system, as well as a misaligned between the spin axes of the components were also suggested from the analysis of the radar data (Taylor et al. 2018, 2019). We also speculated on the possibility of a third more distant component in this system, but according to Patrick Taylor (private communication), nothing was found to suggest it in the radar images.

As seen with binaries like (69230) Hermes and (90) Antiope, systems with nearly equal-size components can tidally evolve to a

fully synchronous end state very rapidly, unlike systems with one large component and a second component much smaller (Taylor & Margot 2011). This occurs because the tidal time-scale is similar for each component of a high-mass ratio² system, which makes systems of this type evolve to a fully synchronized state faster (Jacobson & Scheeres 2011). The fact the 2017 YE5 system presents a possible asynchronous component indicates that the system is not fully synchronized, as expected for equal-size binaries, such as Hermes. Thus, we speculate that 2017 YE5 had a more recent formation than (69230) Hermes (Taylor & Margot 2011), since both binaries have similar sizes and semimajor axes, and probably their tidal synchronization time-scales as well. This could explain why 2017 YE5 has not yet reached a fully synchronized state. Another possible explanation could be that the components of this system have different compositions, which makes the synchronization process longer due to the difference between the masses of the components (Jacobson & Scheeres 2011). It is important to mention that almost all the nearly equal-mass binary asteroids are found in the main belt with the exception of the four members discovered in the NEA population, including the 2017 YE5. According to several studies, after these systems reach the doubly synchronous state, they will continue to evolve into contact binaries or asteroid pairs (McMahon & Scheeres 2010; Jacobson & Scheeres 2011; Scheirich et al. 2021).

A possible variation in surface composition was observed by comparing the two photometric spectra obtained in different photometric systems. We have shown that the two spectra have different behaviours with respect to the variation of reflectance as a function of wavelength. While the spectrum obtained with OAN-SPM data revealed a larger spectral slope than for D-type asteroids, the spectrum from OASI showed an attenuation in reflectance of about 0.8 μm that we do not see as an observational artefact, though we do not have the reflectance in z band in this last one. This finding means that the 2017 YE5 system could have components with compositional difference (different densities). This hypothesis is supported by radar observations that showed a distinct difference in the radar reflectivity of the two components (Taylor et al. 2018, 2019). Another possible explanation, however, could be that this object has undergone a change in the spectrum due to the presence of a dust coma in one of the components or another characteristic that could alter the behaviour of the spectrum, such as for example, different surface roughnesses probably produced by different erosive processes (e.g. thermal fracturing, micrometeoroid impacts, and volatile outgassing).

In addition, the colour indices determined from OAN-SPM data in the Johnson–Cousins system indicate that 2017 YE5 has a very reddish surface. We found $B - V = 0.682 \pm 0.276$, $V - R = 0.526 \pm 0.112$, $V - I = 1.073 \pm 0.113$, $B - R = 1.21 \pm 0.27$, and $R - I = 0.546 \pm 0.09$, which are colours very similar to those of various comets (and main belt comets), including the JFC 67P/Churyumov–Gerasimenko with $V - R = 0.52 \pm 0.05$ (Lamy et al. 2006) and the binary main belt comet 288P with $B - V = 0.67 \pm 0.04$, $V - R = 0.50 \pm 0.03$, and $B - R = 1.17 \pm 0.04$ (Agarwal et al. 2016). For comparison, our colour indices are almost identical to the mean value $V - R = 0.51 \pm 0.02$ obtained for the nuclei of 44 ecliptic comets and $V - R = 0.50 \pm 0.03$ considering only the nuclei of JFCs (Lamy & Toth 2009). The active JFCs have a mean $B - R = 1.22 \pm 0.02$, while the nuclei of JFCs have a slightly higher value

($B - R = 1.31 \pm 0.08$) (Jewitt 2015). D-types asteroids have a mean $B - R = 1.21 \pm 0.06$ and $V - I = 0.89 \pm 0.03$ (Ieva et al. 2018). Thus, the colours obtained in this work indicate that 2017 YE5 has a reddish surface than typical D-type asteroids (as shown in Fig. 6), which is consistent with several cometary nuclei, as shown in colour–colour diagram (Fig. 7). It is important to mention that D-type asteroids, considered primitive bodies,³ have very low albedos and are expected to be rich in organic compounds, which could explain their strong red spectral slopes (Gradie & Veverka 1980; Emery et al. 2015).

We derived an average density for the 2017 YE5 system varying from 0.6 to 1.2 g cm^{-3} . It is worth mentioning that the density should increase slightly, assuming that the components are not spheres. This density interval is in good agreement with the reported densities for different D-type asteroids, including the binary Trojan asteroid (624) Hektor with $1.0 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$ (Marchis et al. 2014). It is also consistent with densities of comets and transneptunian objects (Carry 2012). The density range reported here also is in agreement with the value reported for the equal-size binary Trojan (617) Patroclus (P-type), whose density has been determined to be $0.88 \pm 0.15 \text{ g cm}^{-3}$ (Marchis et al. 2006). These low densities indicate a large internal macroporosity of order 50 per cent (Margot et al. 2015) and/or a significant low density material (i.e. ice) (Emery et al. 2015). Thus, very reddish objects (P- and D-types) and with low densities are thought to originate from the outer part of the Solar system (scattered disc) and afterwards implanted into the Trojans and the outer main-belt during the planetary migration (Morbidelli et al. 2005; Levison et al. 2009). In the case of 2017 YE5, a candidate binary comet ($T_J = 2.87$), its low density suggests that it was formed in a similar process to that of most small binary asteroids, that is, by rotational fission of a single progenitor with a rubble-pile structure.

Our near-infrared spectroscopic analysis confirmed that 2017 YE5 has a red featureless spectrum. We also noted that the photometric spectrum obtained with the OAN-SPM data is redder than the infrared spectrum. Both spectra were classified as a D-type in the Bus–DeMeo taxonomy, with the photometric spectrum showing a high slope of $S'_{\text{vis}} = 15 \pm 5$ per cent/1000 \AA , and the infrared spectrum a slope of $S'_{\text{ir}} = 4 \pm 1$ per cent/1000 \AA . The differences in the spectral slopes in the visible and near-infrared were analysed in Licandro et al. (2008, 2018) and are probably due to the typical curvature of D-type objects. Since the infrared spectrum of 2017 YE5 exhibits a thermal emission in about 2.5 μm , we were able to constrain its visible albedo to 2–4 per cent by applying a thermal model. This low albedo is within the typical values found for the comet nuclei, whose values vary from 2 to 6 per cent (Kim et al. 2014). For example, the JFC 67P has an albedo of 6 per cent (Bibring et al. 2015). Indeed, several studies have shown that the majority of NEAs in cometary orbits present featureless spectra (C-, P-, and D-types) and comet-like albedos (DeMeo & Binzel 2008; Licandro et al. 2008; Fernández & Sosa 2015; Licandro et al. 2018). In this regard, dynamical studies indicate that this sub-population of NEAs is composed of a significant fraction of objects come from JFCs (cometary origin) and from the outer main-belt (asteroidal origin) (e.g. Binzel et al. 2019). Therefore, it is possible that the 2017 YE5 system entered the NEAs space through one of these regions, with a greater probability for the first hypothesis, as indicated by different studies (e.g. Fernández et al.

²Mass ratio is defined as the mass of the smaller component divided by the mass of the larger component of the binary system.

³Primitive asteroids are objects with visible geometric albedo less than 0.15 and featureless spectra in the visible. In the Tholen & Barucci (1989) taxonomy, which considers albedo and spectra, primitive asteroids are those the B-, C-, D-, F-, G-, P-, and T- types.

2005; DeMeo & Binzel 2008; Mommert et al. 2015; Licandro et al. 2018).

Primitive objects are most abundant in the outer region of the main belt and beyond. These objects are also present in the inner main belt and the NEA population, indicating that primitive NEAs were delivered from different regions, including a strong contribution from the Jupiter Family Comets (Binzel et al. 2019). D- and P-types asteroids are located mainly in the outer main belt and in the Jupiter Trojan population (Gil-Hutton & Licandro 2010; Emery et al. 2015). In particular, almost all the published spectra of comet nuclei are similar to the P- and D-types asteroids (Licandro et al. 2008). According to different studies, both asteroid classes are presumed to be similar to carbonaceous chondrites, but with a fraction of organic matter to explain the high spectral slopes (Gaffey, Bell & Cruikshank 1989; Vilas, Jarvis & Gaffey 1994; Cloutis et al. 2011; Fornasier, Clark & Dotto 2011). D-types, in particular, are probably similar to the reddest CI/CM chondrites and also to the Tagish Lake meteorite (an unusual carbonaceous chondrite), which is considered as the best meteorite analogue of this class (Fornasier et al. 2011; Herd et al. 2011; Cloutis et al. 2012). In this context, using the Modeling for Asteroids tool (M4AST; Popescu, Birlan & Nedelcu 2012), we have found that the combined spectrum of 2017 YE5 has a reasonable match with the Tagish Lake meteorite and, secondly, with CM2 carbonaceous meteorites, obtained from a least-squares search in the RELAB spectral data base. In both meteorites, it was found that water is incorporated into the phyllosilicate minerals (e.g. serpentine and saponite) formed by aqueous alteration (Cloutis et al. 2011; Fornasier et al. 2011). The Tagish Lake, in particular, contains an abundance of organic materials, nearly 3 weight percent (wt per cent), including amino acids (Herd et al. 2011). The density of CM meteorites varies from 1.79 to 2.40 g cm⁻³ (Britt & Consolmagno 2003), while that of Tagish Lake is of 1.5 g cm⁻³ (Brown et al. 2000). These values are higher than the estimated interval for 2017 YE5, indicating again that it has a large macroporosity and/or is composed of two components of different densities.

Knowing that 2017 YE5 is likely a dormant comet, we analysed their photometric profiles in search of a possible residual cometary activity, following the method described in Martino et al. (2019). Thus, the photometric profiles of 2017 YE5 were compared with profiles of field stars, in search of a widening of the asteroid profile that would indicate traces of cometary activity. It was possible to obtain four photometric profile of 2017 YE5 from OASI data, but with no clear signs of cometary activity in any of them, just a slight difference between the profiles of the stars and the object. Fig. 10 shows an example of the photometric profile of 2017 YE5 obtained from images taken on July 11th. In addition, photometric profiles may not be useful for identifying cometary activity in binary systems, since this method has only been used successfully for active single asteroids (Martino et al. 2019). We do not reject the possibility that the profile of 2017 YE5 has been affected by the presence of two components of almost equal size. We will investigate this possibility in an upcoming article, which will cover other almost equal-mass binary asteroids, including (90) Antiope, (809) Lunda, and (1139) Atami, for which we already have data obtained from OASI.

We also performed another analysis to investigate the possibility that the cometary activity may have occurred in the past. In this context, if 2017 YE5 was active in a certain period of time, is possible that it has left a trail of dusty debris in its path, which could eventually cross the Earth's orbit. Thus, we attempt to seek for parenthood between the binary 2017 YE5 and meteor activity. In this sense, we used video meteors data bases of Sonotaco, EDMOND and EXOSS (Sonotaco 2009; Rudawska et al. 2015; Jenniskens et al.

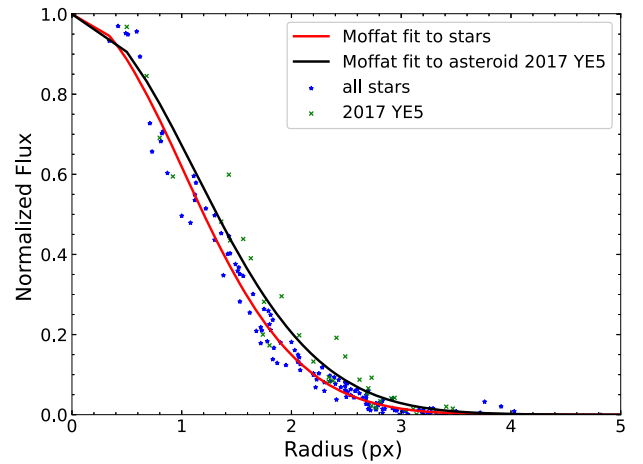


Figure 10. Photometric profile for the 2017 YE5 system. The plot contains the values of normalized flux as a function of the radius from the centroid (in pixels) for the stars (blue dots) and for the object (green dots), as well as the Moffat adjustment for the stars (red line) and for the object (black line).

2016; Fernandes et al. 2020), in order to search for associations. Applying the methodology of Guennoun et al. (2019), we were able to compare many methods to obtain the most suitable one using a criterion threshold $D_{sh} < 0.2$ (Southworth & Hawkins 1963), considering 8° for the difference in Solar Longitude and a fixed threshold value for angular distance to the apparent radiant. This method also combines the radiant equatorial coordinates (α and δ) and geocentric velocity of the NEA (computed by Neslusan, Svoren & Porubcan (1998) program) and the meteoroids. Thus, we found a sample of 18 meteor orbits, originally classified as sporadics, that could be associated with 2017 YE5. A more detailed analysis using statistical test and numerical integration backward time of the orbit of the potential progenitors, modelling particles ejections, will be presented in an upcoming article, which will cover other NEAs in cometary orbits in order to explore past cometary activities through association with meteor showers.

It is interesting to note that many NEAs in cometary orbits, most of which are low-albedo objects, displayed at least one comet-like activity. Examples include NEA (3552) Don Quixote ($T_J = 2.31$), which was found to show cometary activity many years after its discovery as asteroid (Mommert et al. 2014), and NEA P/2006 HR30 ($T_J = 1.78$, Halley-type orbit), which was discovered as an asteroid and reclassified with the detection of coma (e.g. Hicks & Bauer 2007). (3552) Don Quixote is probably a dormant comet, since it is not clear if its activity is persistent or an outburst (Mommert et al. 2015). Also, some NEAs, such as (5496) 1973 NA ($T_J = 2.53$), 289P/Blanpain (2003 WY25) ($T_J = 2.82$) and 3552 Don Quixote, were associated with meteor showers (Williams & Collander-Brown 1998; Jewitt 2006; Rudawska & Vaubaillon 2015). Some typical NEAs also have shown cometary activity, such as NEA (4015) Wilson-Harrington ($T_J = 3.08$), which exhibited comet-like activity in 1949, but never since (e.g. Fernández et al. 1997), and NEA (3200) Phaethon ($T_J = 4.50$), which has been identified as the parent for the Geminid meteor shower (e.g. Jewitt, Hsieh & Agarwal 2015). Therefore, the study of comet-like NEAs is very important to understand the origin of terrestrial planet volatiles, since these objects probably played a fundamental role in the delivery of volatiles, water and organic materials to early Earth (e.g. Morbidelli et al. 2000; Izidoro et al. 2013).

In this context, primitive NEAs have and continue to be targeted by spacecraft missions. Recent examples include NEA (101955) Benu, target of NASA's OSIRIS-REx (Lauretta et al. 2017), and (162173) Ryugu, target of JAXA's Hayabusa2 (Watanabe et al. 2017). In addition, various binary NEAs have been selected for different missions, including NEA (65803) Didymos, which is the target of the NASA's Double Asteroid Redirection Test (DART) mission (Naidu et al. 2020), NEAs (175706) 1996 FG3 and (35107) 1991 VH, which are the targets of the NASA's JANUS mission (Scheeres et al. 2021). Almost all these NEAs have been classified as primitive objects, except (35107) 1991 VH, a Sk-type, and Didymos, which was classified as Xk-type, and it is not clear if it is primitive. The active NEA (3200) Phaethon will be visited by JAXA's DESTINY+ mission, which is planned to be launched in 2024 (Arai et al. 2021). DART mission is a deflection experiment by kinetic impactor, while the others, in turn, have as their main focus the identification and understanding of the processes that lead to binary formation and evolution.

5 SUMMARY AND CONCLUSIONS

We observed the nearly equal-mass binary near-Earth asteroid 2017 YE5 after its close Earth flyby on 2018 June 21, when its binary nature was finally discovered. Our physical characterization of this system sheds light on its physical properties, including rotational and orbital period, albedo and taxonomic type, as well as its likely cometary origin. Based on our study we determined the following:

(i) We found that 2017 YE5 system has a mutual orbital period of $P_{\text{orb}} = 23.706 \pm 0.006$ h and a primary rotational period of $P_1 = 14.88 \pm 0.01$ h, indicating a possible asynchronous component or non-principal axis rotator in this system. These results are in good agreement with those reported by radar observations.

(ii) We derived the mean density of 2017 YE5 is from 0.6 to 1.2 g cm^{-3} , implying a rubble-pile internal structure for the components. We do not reject the possibility of the low density to be due to combination of large macroporosity and volatiles compounds.

(iii) We obtained two photometric spectra (Figs 5 and 6), one using OAN-SPM data, which exhibits a high-spectral slope corresponding to a D-type, with spectral slope $S' = 15 \pm 5$ per cent/1000 Å, and another using OASI data, which shows a different behaviour, such as a Q-type. This difference suggests that the components of the 2017 YE5 system can have different compositions. The OASI spectrum showed an attenuation of the reflectance in the *i* band (*SDSS* filter), which is not well understood due to the lack of the reflectance in the *z* band.

(iv) We found that the colour indices determined for 2017 YE5 from OAN-SPM data indicate a very red surface, consistent with the D-type asteroids and JFC nuclei. The colors found were $B - V = 0.682 \pm 0.276$, $V - R = 0.526 \pm 0.112$, $V - I = 1.073 \pm 0.113$, $B - R = 1.21 \pm 0.27$, and $R - I = 0.546 \pm 0.09$.

(v) We applied a thermal model fit to the infrared spectrum, yielding a dark albedo of 2–4 per cent, with a best fit $\eta = 1.25$. An effective diameter was estimated to be 0.96–1.36 km (assuming $H = 19.2$).

(vi) We classified the thermally corrected spectrum as a D-type in the Bus-DeMeo taxonomy and, using combined visible photometric and NIR spectra, we also found a reasonable match with D-type asteroids. This classification is very consistent with the best-fit albedo.

(vii) From the comparison with laboratory spectra (RELAB data base), we found that 2017 YE5 has a reasonable match with the

Tagish Lake meteorite. Therefore, it is very likely that 2017 YE5 to contain water incorporated into phyllosilicate minerals (e.g. serpentine) formed by aqueous alteration. Also, it is possible that there is a significant fraction of organic materials and volatiles compounds in its composition.

(viii) We suggest that 2017 YE5 has a cometary origin, due to its comet-like albedo and orbit ($T_J = 2.87$). It is important to mention that, while suggesting that 2017 YE5 is a dormant Jupiter-family binary comet, we do not reject that it came from the outer main-belt.

We were able to constrain some physical properties of the 2017 YE5 and compare them with those previously reported from radar observations. Only four nearly equal-size binary NEA have been reported in the literature, including this work, and only 2017 YE5 has been classified as D-type asteroid to date. In addition, 2017 YE5 is the first binary NEA discovered in a typical Jupiter-family comet orbit. Further observations of this object are needed to confirm the composition of the two components and to improve our understanding about its rotation state. The next favourable viewing geometry will only occur in 2037 February with $V \approx 19.5$, when it will pass at a nominal distance of approximately 0.238 au from Earth. Given its comet-like albedo and orbit, the next opportunities for additional observations with large telescopes may provide further clues to the origin and formation of this rare binary NEA.

ACKNOWLEDGEMENTS

F.M. thanks the Foundation for Research Support of the State of Rio de Janeiro (FAPERJ) for the financial support (E-26/201.877/2020). E.R., M.S., M.C. and P.A. acknowledge the diverse fellowships granted by Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) and National Council for Scientific and Technological Development (CNPq). D.L. thanks for research support given by CNPq (305409/2016-6) and FAPERJ (E-26/202.841/2017). L.S. thanks the fellowship granted by Research Support Foundation of the State of São Paulo (FAPESP) (2016/18418-0). The authors are grateful to the IMPACTON team and, in particular, to R. Souza and A. Santiago for the technical support, and the OAN-SPM team. The authors are also grateful to Andy Rivkin for help with the correction of spectrum for thermal excess in order to constrain the albedo. Finally, the authors thanks the referee Gonzalo Tancredi for useful comments that helped improve this paper.

The Infrared data utilized in this publication were obtained and made available by the MITHNEOS MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey. The IRTF is operated by the University of Hawaii under contract 80HQTR19D0030 with the National Aeronautics and Space Administration (NASA). The MIT component of this work is supported by NASA grant 80NSSC18K0849.

Taxonomic type result presented in this work was determined using a Bus-DeMeo Taxonomy Classification Web tool by Stephen M. Slivan, developed at MIT with the support of National Science Foundation Grant 0506716 and NASA Grant NAG5-12355.

This article is based on observations obtained at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI, Itacuruba) of the Observatório Nacional, Brazil, and at the Blue Mountains Observatory (Australia), and at the Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM) operated by the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). The research work at Blue Mountains Observatory is supported and promoted by the 2015 Shoemaker NEO Grant.

DATA AVAILABILITY

The data underlying this study are available in the article.

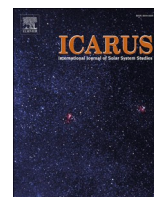
REFERENCES

- Agarwal J., Jewitt D., Weaver H., Mutchler M., Larson S., 2016, *AJ*, 151, 12
- Arai T. et al., 2021, Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference. p. 1896
- Bibring J. P. et al., 2015, *Science*, 349, 493
- Binzel R. P. et al., 2019, *Icarus*, 324, 41
- Britt D. T., Consolmagno G. J., 2003, *Meteorit. Planet. Sci.*, 38, 1161
- Brown P. G. et al., 2000, *Science*, 290, 320
- Carry B., 2012, *Planet. Space Sci.*, 73, 98
- Carvano J. M., Davalos J. A. G., 2015, *A&A*, 580, A98
- Carvano J. M., Hasselmann P. H., Lazzaro D., Mothé-Diniz T., 2010, *A&A*, 510, A43
- Cloutis E. A., Hudon P., Hiroi T., Gaffey M. J., Mann P., 2011, *Icarus*, 216, 309
- Cloutis E. A., Hudon P., Hiroi T., Gaffey M. J., Mann P., 2012, *Icarus*, 221, 984
- DeMeo F., Binzel R. P., 2008, *Icarus*, 194, 436
- DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., Bus S. J., 2009, *Icarus*, 202, 160
- Emery J. P., Marzari F., Morbidelli A., French L. M., Grav T., 2015, *Asteroids IV*. p. 203–220
- Fernández J. A., Sosa A., 2015, *Planet. Space Sci.*, 118, 14
- Fernández Y. R., McFadden L. A., Lisse C. M., Helin E. F., Chamberlin A. B., 1997, *Icarus*, 128, 114
- Fernández Y. R., Jewitt D. C., Sheppard S. S., 2005, *AJ*, 130, 308
- Fernandes F. C. R., Carita L. A., Rodrigues I., Pimentel G. J. A., Silva R. C. A., Matos P. B., Reis de Castro V. D., Oliveira J. C., 2020, *J. Int. Meteor. Organ.*, 48, 173
- Fornasier S., Clark B. E., Dotto E., 2011, *Icarus*, 214, 131
- Gaffey M. J., Bell J. F., Cruikshank D. P., 1989, in Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S., eds, *Asteroids II*. p. 98
- Gil-Hutton R., Licandro J., 2010, *Icarus*, 206, 729
- Gradie J., Veverka J., 1980, *Nature*, 283, 840
- Guenoun M., Vaubaillon J., Čapek D., Kotten P., Benkhaldoun Z., 2019, *A&A*, 622, A84
- Hanuš J. et al., 2011, *A&A*, 530, A134
- Hanuš J. et al., 2013, *A&A*, 551, A67
- Hapke B., 1981, *J. Geophys. Res.*, 86, 3039
- Hapke B., 1984, *Icarus*, 59, 41
- Hapke B., 2001, *J. Geophys. Res.*, 106, 10039
- Harris A. W. et al., 1989, *Icarus*, 77, 171
- Herd C. D. K. et al., 2011, *Science*, 332, 1304
- Hicks M. D., Bauer J. M., 2007, *ApJ*, 662, L47
- Ieva S. et al., 2018, *A&A*, 615, A127
- Izidoro A., de Souza Torres K., Winter O. C., Haghighipour N., 2013, *ApJ*, 767, 54
- Jacobson S. A., Scheeres D. J., 2011, *Icarus*, 214, 161
- Jenniskens P. et al., 2016, *Icarus*, 266, 384
- Jester S. et al., 2005, *AJ*, 130, 873
- Jewitt D., 2006, *AJ*, 131, 2327
- Jewitt D., 2015, *AJ*, 150, 201
- Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J., 2015, *Asteroids IV*. p. 221
- Kim Y., Ishiguro M., Usui F., 2014, *ApJ*, 789, 151
- Lamy P., Toth I., 2009, *Icarus*, 201, 674
- Lamy P. L., Toth I., Weaver H. A., Jorda L., Kaasalainen M., Gutiérrez P. J., 2006, *A&A*, 458, 669
- Landolt A. U., 1992, *AJ*, 104, 340
- Lauretta D. S. et al., 2017, *Space Sci. Rev.*, 212, 925
- Lazzarin M., Marchi S., Moroz L. V., Brunetto R., Magrin S., Paolicchi P., Strazzulla G., 2006, *ApJ*, 647, L179
- Lazzaro D., Barucci M. A., Perna D., Jasmim F. L., Yoshikawa M., Carvano J. M. F., 2013, *A&A*, 549, L2
- Levison H. F., Duncan M. J., 1994, *Icarus*, 108, 18
- Levison H. F., Bottke W. F., Gounelle M., Morbidelli A., Nesvorný D., Tsiganis K., 2009, *Nature*, 460, 364
- Licandro J., Alvarez-Candal A., de León J., Pinilla-Alonso N., Lazzaro D., Campins H., 2008, *A&A*, 481, 861
- Licandro J., Popescu M., de León J., Morate D., Vaduvescu O., De Prá M., Ali-Laoga V., 2018, *A&A*, 618, A170
- Luu J. X., Jewitt D. C., 1996, *AJ*, 111, 499
- Marchis F. et al., 2006, *Nature*, 439, 565
- Marchis F. et al., 2014, *ApJ*, 783, L37
- Margot J. L., Nolan M. C., Benner L. A. M., Ostro S. J., Jurgens R. F., Giorgini J. D., Slade M. A., Campbell D. B., 2002, *Science*, 296, 1445
- Margot J.-L., Pravec P., Taylor P., Carry B., Jacobson S., 2015, in Michel P., DeMeo F. E., Bottke W. F., eds, *Asteroids IV*. p. 355
- Martino S., Tancredi G., Monteiro F., Lazzaro D., Rodrigues T., 2019, *Planet. Space Sci.*, 166, 135
- McMahon J., Scheeres D., 2010, *Icarus*, 209, 494
- Merline W. J., Weidenschilling S. J., Durda D. D., Margot J. L., Pravec P., Storrs A. D., 2002, *Asteroids II*. p. 289
- Mommert M. et al., 2014, *ApJ*, 781, 25
- Mommert M. et al., 2015, *AJ*, 150, 106
- Morbidelli A., Chambers J., Lunine J. I., Petit J. M., Robert F., Valsecchi G. B., Cyr K. E., 2000, *Meteorit. Planet. Sci.*, 35, 1309
- Morbidelli A., Levison H. F., Tsiganis K., Gomes R., 2005, *Nature*, 435, 462
- Mothé-Diniz T., Lazzaro D., Carvano J. M., Florczak M., 2000, *Icarus*, 148, 494
- Murchie S. L., Pieters C. M., 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 2201
- Naidu S. P. et al., 2020, *Icarus*, 348, 113777
- Neslusan L., Svoren J., Porubcan V., 1998, *A&A*, 331, 411
- Nesvorný D., Jedicke R., Whiteley R. J., Ivezić Ž., 2005, *Icarus*, 173, 132
- Pieters C. M., Noble S. K., 2016, *J. Geophys. Res. (Planets)*, 121, 1865
- Popescu M., Birlan M., Nedelcu D. A., 2012, *A&A*, 544, A130
- Pravec P., Harris A. W., 2007, *Icarus*, 190, 250
- Pravec P. et al., 2005, *Icarus*, 173, 108
- Pravec P. et al., 2006, *Icarus*, 181, 63
- Pravec P. et al., 2010, *Nature*, 466, 1085
- Ramírez I. et al., 2012, *ApJ*, 752, 5
- Rayner J. T., Toomey D. W., Onaka P. M., Denault A. J., Stahlberger W. E., Vacca W. D., Cushing M. C., Wang S., 2003, *PASP*, 115, 362
- Reddy V., Gaffey M. J., Abell P. A., Hardersen P. S., 2012, *Icarus*, 219, 382
- Rivkin A. S., Binzel R. P., Sunshine J., Bus S. J., Burbine T. H., Saxena A., 2004, *Icarus*, 172, 408
- Rivkin A. S., Binzel R. P., Bus S. J., 2005, *Icarus*, 175, 175
- Rondón E., Arcoverde P., Monteiro F., Medeiros H., Navas G., Lazzaro D., Carvano J. M., Rodrigues T., 2019, *MNRAS*, 484, 2499
- Rondón E. et al., 2020, *PASP*, 132, 065001
- Rondón-Briceño E., Carvano J. M., Lorenz-Martins S., 2017, *MNRAS*, 468, 1556
- Rubincam D. P., 2000, *Icarus*, 148, 2
- Rudawska R., Vaubaillon J., 2015, *Planet. Space Sci.*, 118, 25
- Rudawska R., Matlovič P., Tóth J., Kornoš L., 2015, *Planet. Space Sci.*, 118, 38
- Sanchez J. A., Reddy V., Nathues A., Cloutis E. A., Mann P., Hiesinger H., 2012, *Icarus*, 220, 36
- Scheeres D. J. et al., 2021, Lunar and Planetary Science Conference.. p. 1706
- Scheirich P., Pravec P., 2009, *Icarus*, 200, 531
- Scheirich P. et al., 2021, *Icarus*, 360, 114321
- Smith J. A. et al., 2002, *AJ*, 123, 2121
- Solontoi M. et al., 2012, *Icarus*, 218, 571
- SonotaCo, 2009, *J. Int. Meteor. Organ.*, 37, 55
- Southworth R. B., Hawkins G. S., 1963, *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 7, 261
- Strazzulla G., Dotto E., Binzel R., Brunetto R., Barucci M. A., Blanco A., Orofino V., 2005, *Icarus*, 174, 31
- Taylor P. A., Margot J.-L., 2011, *Icarus*, 212, 661

- Taylor P. A. et al., 2018, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. p. 50 508.07
- Taylor P. A. et al., 2019, Lunar and Planetary Science Conference. p. 2945
- Tholen D. J., Barucci M. A., 1989, in Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S., eds, Asteroids II. p. 298
- Vilas F., Jarvis K. S., Gaffey M. J., 1994, *Icarus*, 109, 274
- Vokrouhlický D., Nesvorný D., Bottke W. F., 2003, *Nature*, 425, 147
- Walsh K. J., Jacobson S. A., 2015, Asteroids IV. p. 375
- Walsh K. J., Richardson D. C., Michel P., 2008, *Nature*, 454, 188
- Warner B. D., 2018, *Minor Planet Bull.*, 45, 366
- Watanabe S.-i., Tsuda Y., Yoshikawa M., Tanaka S., Saiki T., Nakazawa S., 2017, *Space Sci. Rev.*, 208, 3
- Williams I. P., Collander-Brown S. J., 1998, *MNRAS*, 294, 127
- Zellner B., Tholen D. J., Tedesco E. F., 1985, *Icarus*, 61, 355

This paper has been typeset from a $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ file prepared by the author.

A.3 “Lifetime of cm-sized zodiacal dust from the physical and dynamical evolution of meteoroid streams”



Lifetime of cm-sized zodiacal dust from the physical and dynamical evolution of meteoroid streams

Peter Jenniskens^{a,b,*}, Stuart Pilorz^a, Peter S. Gural^c, Dave Samuels^a, Steve Rau^d, Timothy M.C. Abbott^e, Jim Albers^a, Scott Austin^f, Dan Avner^g, Jack W. Baggaley^h, Tim Beckⁱ, Solvay Blomquist^g, Mustafa Boyukata^j, Martin Breukers^d, Walt Cooney^k, Tim Cooper^l, Marcelo De Cicco^m, Hadrien Devillepoixⁿ, Eric Eglund^a, Elize Fahl^o, Megan Gialluca^g, Bryant Grigsby^a, Toni Hanke^o, Barbara Harris^p, Steve Heathcote^e, Samantha Hemmelgarn^g, Andy Howell^p, Emmanuel Jehin^q, Carl Johannink^d, Luke Juneau^r, Erika Kisvarsanyi^s, Philip Mey^t, Nick Moskovitz^g, Mohammad Odeh^u, Brian Rachford^v, David Rollinson^w, James M. Scott^x, Martin C. Towner^m, Ozan Unsalan^y, Rynault van Wykⁿ, Jeff Wood^w, James D. Wray^a, Jérémie Vaubaillon^z, Dante S. Lauretta^{aa}

^a SETI Institute, 339 Bernardo Ave, Mountain View, CA 94043, USA

^b NASA Ames Research Center, Mail-Stop 244-11, Moffett Field, CA 94035, USA

^c Gural Software and Analysis LLC, 12241 Eliza Court, Lovettsville, VA 20180, USA

^d CAMS BeNeLux, Am Ollenkamp 4, D 48599 Gronau, Germany

^e CAMS Chile, Cerro Tololo Inter-American Observatory, NSF's National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory, Casilla 603, La Serena, Chile

^f Dep. of Physics and Astronomy, University of Central Arkansas, 201 Donaghey Ave, Conway, AR 72035, USA

^g LOCAMS, Lowell Observatory, 1400 West Mars Hill Road, Flagstaff, AZ 86001, USA

^h CAMS New Zealand, Dept. of Physics & Astronomy, University of Canterbury, Christchurch 8140, New Zealand

ⁱ Mendocino College, 1000 Hensley Creek Road, Ukiah, CA 95482, USA

^j CAMS Turkey, Yozgat Bozok University, Department of Physics, 66100 Yozgat, Turkey

^k CAMS Texas, 4635 Shadow Grass Dr., Katy, TX 77493, USA

^l CAMS South Africa, 258 Ninth Road, Bredell 1623, Kempton Park, South Africa

^m CAMS EXOSS, Observatorio Nacional, Rua Gal. José Cristino 77, Rio de Janeiro, RJ 20921-400, Brazil

ⁿ CAMS Australia, Space Science and Technology Centre, Curtin University, Perth, WA 6102, Australia

^o CAMS Namibia, High Energy Stereoscopic System Experiment, Windhoek 11009, Namibia

^p CAMS Florida, Gainesville, FL 32605, USA

^q CAMS Chile, STAR Institute, University of Liège, B-4000 Liège 1, Belgium

^r CAMS Arkansas, North Little Rock, AR 72118, USA

^s College of Central Florida, 3001 SW College Road, Ocala, FL 34474-4415, USA

^t South African Radio Astronomy Observatory, HarTRAO, Farm 502 JQ, Broederstroom Road, Hartebeesthoek 1740, South Africa

^u UACN, International Astronomical Center, P.O. Box 224, Abu Dhabi, United Arab Emirates

^v Embry-Riddle Aeronautical University, 3700 Willow Creek Road, Prescott, AZ 86301, USA

^w Bindoon, WA 6502, Australia

^x Department of Geology, University of Otago, P. O. Box 56, Dunedin 9054, New Zealand

^y CAMS Turkey, Ege University, Faculty of Science, Department of Physics, 35100 Bornova, Izmir, Turkey

^z IMCCE, Observatoire de Paris - PSL, 77 av. Denfert-Rochereau, 75014 Paris, France

^{aa} Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA

ARTICLE INFO

Keywords:

Meteors
Meteoroids
Comets, dust
Interplanetary dust

ABSTRACT

While comets eject mass mostly at cm-sizes and larger, that size range of particles is mostly absent from the interplanetary medium. Such particles are thought to be lost from the solar system by grain-grain collisions. Here, we investigate the lifetime of cm-sized meteoroids from their abundance in meteoroid streams of different age. For 487 streams, we measured the orbital element dispersions, the magnitude size distribution index, the

* Corresponding author at: SETI Institute, 339 Bernardo Ave, Mountain View, CA 94043, USA.

E-mail address: petrus.m.jenniskens@nasa.gov (P. Jenniskens).

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116034>

Received 29 December 2023; Received in revised form 4 March 2024; Accepted 5 March 2024

Available online 9 March 2024

0019-1035/© 2024 The Authors. Published by Elsevier Inc. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Interplanetary medium
Zodiacal light

ratio of fluffy and dense materials in the stream and their bulk densities, and the meteor light curve shape-parameter. We find that older long-period comet meteoroid streams tend to be more dispersed and evolve towards smaller semi-major axis, higher magnitude size distribution index, and contain relatively more high-density material. Meteoroids that approach the Sun closer than 0.2–0.3 AU are mostly young and composed of denser materials poor in sodium. We compare the observed properties of the streams to age estimates from the literature and to a set of new age estimates for long-period comet streams based on observed dispersions. We find that streams broaden with age inversely proportional to the perihelion distance (q). By selecting narrow ranges of age, we find that their magnitude distribution index changes proportional to $1/\sqrt{q}$, less steep than expected from meteoroid destruction by collisions. Instead, this shallow dependence suggests a lifetime inversely proportional to the peak grain temperature along its orbit, with the lifetime limited by thermal stresses if $0.3 < q < 1.02$ AU and by sublimation if $q < 0.2$ AU.

1. Introduction

Comets and primitive asteroids lose most mass in the form of grains that are centimeter (cm) to tens of cm-sized (e.g., [Curdt and Keller, 1990](#); [Levasseur-Regourd et al., 2018](#); [Lauretta et al., 2019](#); [Chesley et al., 2020](#)). In contrast, the interplanetary (zodiacal) dust cloud that results from this mass loss (e.g., [Nesvorný et al., 2010](#); [Lasue et al., 2020](#)) contains three orders of magnitude less mass at 1-cm than at 0.01-cm size ([Love and Brownlee, 1993](#); [Ceplecha et al., 1998](#)). The total mass per log-mass interval of matter impacting Earth annually peaks at 0.015 cm and falls off by 2–3 orders of magnitude towards cm-sized meteoroids on the large size end, and even more towards the small size end where solar radiation pressure removes dust from the solar system ([Fig. 1](#)).

The lack of cm-sized meteoroids in the zodiacal cloud is usually explained by loss due to grain-grain collisions. With a constant supply of larger grains, the rate of collisions at different grain size ranges is at the heart of interplanetary dust models that describe the impact hazard to satellites in orbit (e.g., [Grün et al., 1985](#); [Divine, 1993](#); [Soja et al., 2019](#); [Moorhead et al., 2023](#)) and the overall appearance of the zodiacal cloud (e.g., [Nesvorný et al., 2010](#)).

In the [Grün et al. \(1985\)](#) grain-grain collision model, the mass dependence of the influx rate of meteoroids on a spinning surface at Earth's orbit is analytically described by assuming a collisional equilibrium among interplanetary meteoroids and a specific mechanism of grain destruction. Target particles with mass m_1 are assumed to be

catastrophically disrupted, whereby the largest fragment is half the size of the original mass, by particles of given impact speed V (km/s) that exceed a minimum mass m_2 (and corresponding kinetic energy):

$$m_2 \geq 0.00102 S_c^{0.45} \rho_1^{0.075} V^{-2} m_1^{0.925} \quad (1)$$

with S_c the unconfined compressive strength (kbar) and ρ_1 the target meteoroid density (g/cm^3).

This collision model makes distinct predictions about how the meteoroid lifetime depends on mass ([Table 1](#)). In this model, the 0.015-cm grains at the peak of the max influx curve are preferably destroyed by the comparatively few small grains of mass 10^{-13} kg (which in [Fig. 1](#) have low total mass and therefore low total kinetic energy), while the larger 1-cm grains are destroyed by the abundant 10^{-8} kg meteoroids. The collisional lifetime increases again for larger grains, because the number density of the projectile meteoroids is less. In this model also, higher inclined orbits tend to have about a factor of two longer collisional lifetimes because they spend less time at the core of the interplanetary dust cloud near the ecliptic plane.

Using the same collisional model as [Grün et al. \(1985\)](#), but applied to a modern meteoroid environment model of dust densities and impact velocities, [Soja et al. \(2016\)](#) calculated a collisional lifetime of 30,000 years for 0.01-cm grains and 2500 yr for 1-cm grains that are moving on a short-period comet 2P/Encke-like orbit, and about 10 times higher lifetimes for dust on a 55P/Tempel-Tuttle orbit ([Table 1](#)). Lifetimes are assumed to increase exponentially for the smallest grains with mass less than $\sim 10^{-16}$ kg. The mass-dependence of this relationship is independent of the meteoroid orbit.

Important, too, are the dynamical lifetimes of the grains. Sub-microns sized grains are put on unbound orbits by solar radiation pressure. The drop-off towards small sizes in [Fig. 1](#) was thought to be due to Poynting-Robertson drag, decreasing eccentricity over time and causing meteoroids to spiral in towards the Sun. However, small mm-sized grains on near-circular orbits in the asteroid belt require longer than the age of the zodiacal cloud to reach Earth's orbit (e.g., [Nesvorný et al., 2010](#); [Haranas et al., 2018](#)).

The lifetime of the grains may not be limited by collisions or dynamics. [Fig. 2](#), for example, shows the rate of Leonid storms and outbursts from 1333 CE to 1932 ejecta from Halley-type comet 55P/Tempel-Tuttle, predicted from two models by E. Lyytinen and J. Vaubaillon published in [Jenniskens \(2006\)](#) and [Jenniskens et al. \(2008, 2009\)](#), and compares those predicted rates to the observed values. The predicted activity is scaled to the encounters with the young 1–4 revolution dust trails. The predictions assume a constant activity of the comet in each return and include all possible dynamical effects. The models systematically predict higher rates than observed in the case of older trails, with the ratio showing an e-folding scale of 259 ± 17 y ([Fig. 2](#), dashed line). That rate is a factor of 4–10 more rapid than expected from grain-grain collisions ([Table 1](#)). While the comet could also have become correspondingly more active over time, this is less likely because the perihelion distance has not significantly decreased since 1333 CE ([Yeomans et al., 1996](#)) and the ratio does not correlate with the comet's perihelion distance during ejection.

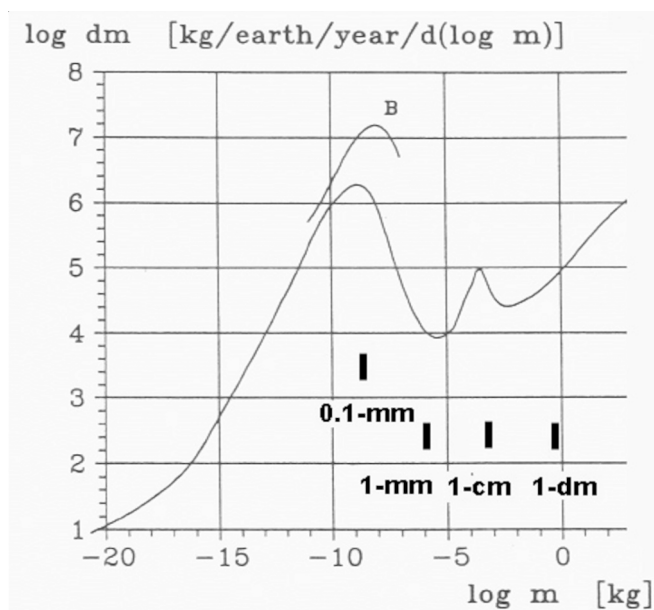


Fig. 1. Mass influx curve from [Ceplecha et al. \(1998\)](#), with approximate size markers added. Curve “B” is the influx profile proposed by [Love and Brownlee \(1993\)](#).

Processes other than collisions can act on different timescales for different grain morphologies and strengths. Indeed, some Leonid meteoroids survive and evolve into an annual Leonid shower over a much longer timescale (Jenniskens, 2006). Further evidence for meteoroid fragmentation in the interplanetary medium by processes other than collisions are the relatively frequently observed clusters of meteors observed from the breakup of 1–10 cm sized meteoroids just before reaching Earth, which have been ascribed to thermal stresses (e.g., Piers and Hawkes, 1993; Koten et al., 2017, 2024; Vaubaillon et al., 2023).

On very short timescales, dust bursts observed by the Rosetta mission to comet 67P/Churyumov-Gerasimenko show that some mm- and cm-sized grains fragment into smaller grains while ice is sublimating from the grains (e.g., Fulle et al., 2018). Clusters of dust were also observed in the flyby's of the 81P/Wild 2 and 9P/Tempel 1 comae (Levasseur-Regourd et al., 2018). It is the ice-free grains that survive which form the cometary dust trails and subsequently evolve into annual streams and the zodiacal cloud.

Cometary meteoroids are porous and diverse and, importantly, a mixture of aggregates and compact particles (Langevin et al., 2016; Bentley et al., 2016). Derived dust densities were between 0.05 and 0.5 g/cm³ in the coma of comet 1P/Halley (Fulle et al., 2000), and <1 g/cm³ for other encounters (Levasseur-Regourd et al., 2018). Short-period comet 67P particles had a bulk density of 0.7–1.4 g/cm³ (Fulle et al., 2017), centered on 0.8 g/cm³. Some particles are extremely fluffy (>90% porosity), while compacted and dried particles had density 1.3–3.9 g/cm³, centered on 1.9 g/cm³. Collected particles of 81P/Wild 2 contained small particles of different tensile strength (Brownlee et al., 2006). Cometary dust contains organic components (~45% in mass for comet 67P, Bardyn et al., 2017) and amorphous silicates, but also crystalline silicate materials that experienced some heat in the past (Crovisier, 1997; Wooden et al., 1999). About half of the silicates in 81P/Wild 2 samples were crystalline, and ~ 1% are highly refractory minerals reminiscent of Calcium-Aluminum-rich Inclusions (Westphal et al., 2009).

The grains that survive long enough to become part of a zodiacal dust cloud do not fully behave as predicted by the Grün et al. model. To explain the observed infrared emission, dynamical models of the interplanetary dust cloud require about the same collisional lifetimes for 0.1-cm particles as for 0.01-cm particles (Nesvorný et al., 2010, 2011; Pokorný et al., 2014). The ~0.1-cm sized meteoroids in the sporadic background observed by the Canadian Meteor Orbit Radar CMOR (Brown et al., 2010) move on similar orbits as the ~0.01-cm sized grains observed by the more sensitive AMOR radar (Galligan and Baggaley, 2002). Both populations seem to be about 300,000 years old (Nesvorný et al., 2010), but the Grün et al. model predicts about 7 times higher lifetimes against collisions for the smaller 0.01-cm AMOR radar particles than the 0.1-cm CMOR particles (Table 1).

The smaller particles also should evolve faster by Poynting-Robertson drag. To match the AMOR orbits, the CMOR meteoroids require 3 times more drag than expected for the collisional lifetime available. Even smaller ~10 μm grains that scatter light to create the visible zodiacal light do not impact Earth on near-circular orbits from Poynting-Robertson drag as predicted in earlier zodiacal cloud models, but on orbits of eccentricity $e \sim 0.3$, based on relatively wide Doppler broadened spectral features in the zodiacal cloud (e.g., Reynolds et al.,

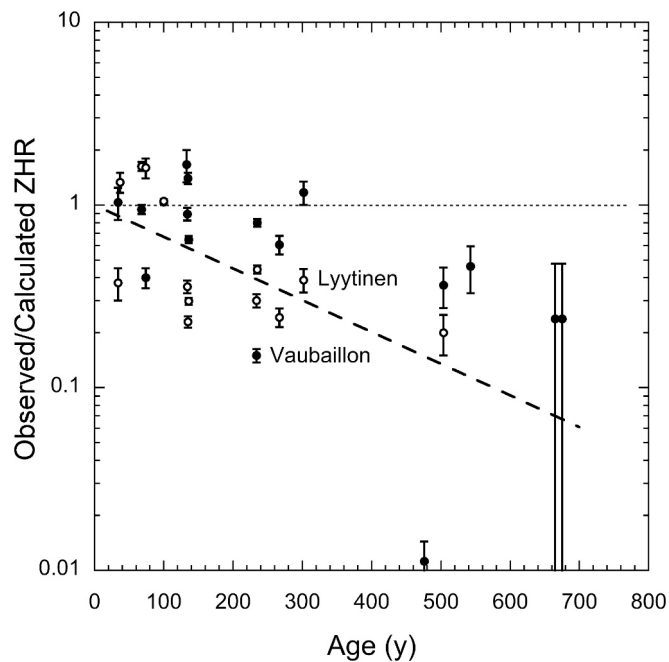


Fig. 2. Ratio of observed versus predicted Leonids meteor shower activity, with predicted activity from the models by Vaubaillon (●) and Lyytinen (○) published in Jenniskens (2006) and Jenniskens et al. (2007; 2009).

2004; Rowan-Robinson and May, 2013) and the relatively high impact speeds inferred from helium loss in interplanetary dust particles (e.g., Flynn, 2001). While Poynting-Robertson drag lowers the eccentricity over time, some mechanism appears to remove the grains before their orbits can fully circularize.

There are other ways than grain-grain collisions to remove large grains from the population. For example, repeated cycles of heating and cooling could disrupt a meteoroid over time by loosening bonds or creating tension. The spin rate of a meteoroid could increase to the point where centrifugal forces disrupt the grain, and repulsive electrical forces could build up over time when the grains are charged by radiative processes. Such mechanisms will display a different mass-dependence of lifetimes and a different dependence on radial distance from the Sun and vertical distance from the ecliptic plane.

To test the importance of these mechanisms in removing cm-sized grains from meteoroid streams and the zodiacal cloud, it is necessary to do meteor observations. These cm-sized meteoroids do not efficiently emit infrared radiation or scatter sunlight for direct observations, and also cannot be detected by the small dust collectors onboard spacecraft.

From low-light level video observations of meteor showers caused by cm-sized meteoroids (Jenniskens et al., 2011), we derived the dispersions of 487 meteoroid streams, as well as the particle size distribution, the altitude at which 0-magnitude meteors first light up in the atmosphere, and the meteoroid density from deceleration in the atmosphere. The raw data was published in the book “Atlas of Earth’s Meteor Showers” (Jenniskens, 2023).

Here, we use this data to investigate how the particle size

Table 1
Calculated and observed lifetimes of meteoroids in the zodiacal cloud.

Diameter (cm)	Mass* (g)	Magn. (V)	Lifetime calc. (ky)	Ref.	Lifetime obs. (ky)	Method	Ref.
0.001	1e-9	+22.5	1600	[1]	--	--	--
0.01	1e-6	+15	269	[1]	~300	IR, zodiacal cloud dynamical model	[2]
0.1	1e-3	+7.5	40	[1]	≥300	IR, zodiacal cloud dynamical model	[2]
1	1e+0	+0	13	[1]	--	--	--
10	1e+3	-7.5	440	[1]	--	--	--

Notes: [1] For Grün model of 2 g/cm³ particles on a 55P/Tempel-Tuttle ($q \sim 1$ AU) orbit; Soja et al. (2016, 2019); *) for density of 2 g/cm³; [2] Nesvorný et al. (2010).

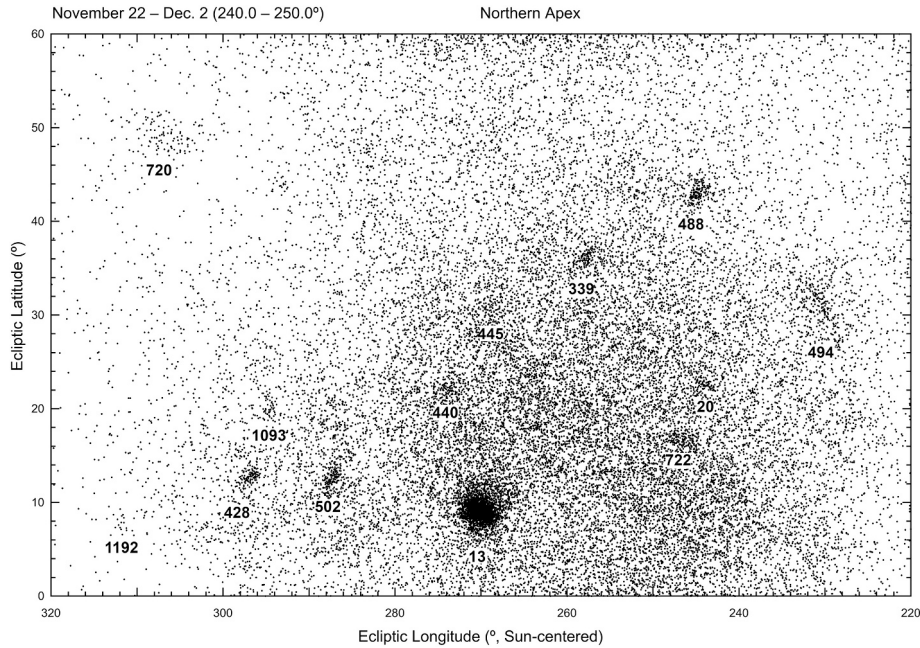


Fig. 3. Example of meteor showers (labeled with their IAU number) in the radiant distribution towards the northern apex direction during solar longitudes 240° to 250° (Nov. 22 to Dec. 2). From: [Jenniskens \(2023\)](#).

distribution, the meteor light curve, the meteoroid density, and the ratio of fluffy to dense materials change with age, both as a function of perihelion distance and inclination of the meteoroid orbit. Some age estimates were taken from the literature. For a range of long period comet orbits, we investigated the stream dispersion over time. From the observed changes over time, we will discuss what mechanisms may be responsible where for the loss of cm-sized grains in the interplanetary medium.

2. Methods

2.1. Meteoroid streams observed as meteor showers

The Cameras for Allsky Meteor Surveillance (CAMS) project ([Jenniskens et al., 2011](#)) deploys networks of low-light video cameras in different regions of the world to detect and triangulate the atmospheric path of +4 to −5 magnitude meteors and calculate meteoroid trajectories, initial velocity and orbits, as well as light curves, decelerations, and meteor magnitude distributions. The network was significantly expanded in the southern hemisphere in 2019.

From 2010 to 2023, CAMS triangulated over 2.7 million meteoroid trajectories. From clusters in the distribution of meteor arrival time, radiant and speed (e.g., [Fig. 3](#)), individual showers were extracted and median orbital elements were published by [Rudawska and Jenniskens \(2014\)](#), [Jenniskens et al. \(2016a–c\)](#), [Jenniskens and Nénon \(2016\)](#), and [Jenniskens et al. \(2018\)](#). This database was again examined for clusters using the same methods as before ([Jenniskens et al., 2016c, 2018](#)), after adding the most recent data up to July 3, 2023, after adding about 1.1 million other published meteoroid trajectories derived by the SonotaCo ([Kanamori, 2009](#)), EDMOND ([Kornos et al., 2013](#)), CMN ([Adreic and Segon, 2010](#)), and GMN ([Vida et al., 2020; 2021](#)) networks. In all, 122 new showers were added to the IAU Working List as numbers 1050–1108, 1110, 1129–1130, 1132–1178, and 1180–1192. While working on [Jenniskens \(2023\)](#), the process for shower naming was changed, in which the assignment of numbers, codes and names was postponed until an undefined later time. In order to be able to include these in [Jenniskens \(2023\)](#), eight additional showers were given the provisional numbers 674, 676, 678, 682, 690, 697, 699 and 700, previously assigned but not used for [Jenniskens et al. \(2016a\)](#), as well as

codes and names. In all, 23% of video-detected meteors belong to 487 identified meteor showers, while another 26 showers described in [Jenniskens \(2023\)](#) are only detected by radar.

The meteoroid orbit at the time of entry can be calculated by tracking the meteoroid's motion along its path through the atmosphere, expressed as orbital elements perihelion distance (q), eccentricity (e), inclination (i), argument of perihelion (ω), and longitude of the ascending node (Ω) ([Jenniskens et al., 2011](#)). Hereinafter, the longitude of ascending or descending node will be referred to as node. For the extracted orbits of each meteoroid stream, the median values of these orbital elements are calculated, as well as the 1- σ dispersion (σ), and the rate of change in the orbital elements as a function of solar longitude along Earth's path (the orbital element drift). [Jenniskens \(2023\)](#) gives the dispersion in orbital elements rather than the radiant dispersion, which depends on entry speed (e.g., [Tsuchiya et al., 2017](#)).

The dynamic type of a meteoroid orbit follows from its Tisserand's parameter with respect to Jupiter:

$$T_J = a_J/a + 2 \cos(i) \sqrt{a/a_J (1 - e^2)} \quad (2)$$

with a_J the semi-major axis of the orbit of Jupiter. Parent bodies are typically described as long-period comets having ($T_J \leq 1$), Halley-type comets ($1 < T_J \leq 2$), Jupiter family comets ($2 < T_J \leq 3$), and asteroids having ($T_J > 3$).

2.2. Average physical properties of the meteoroids in showers

These optical observations pertain to meteoroids of diameter about 0.7–cm for fast showers from the apex source, and to about 1.8–cm for slow showers from the antihelion source ([Fig. 4](#)). Once a shower has been extracted from the sporadic background, the properties of the individual meteors in that shower can be examined.

How those parameters were extracted is given in [Jenniskens \(2023\)](#). In short, the magnitude distribution index (χ) describes the ratio of how many meteors are in neighboring magnitude bins of brightness. The observed count (N) per magnitude bin (m) depends on the detection probability for each magnitude $P(m)$:

$$N(m) = P(m) \chi^m \quad (3)$$

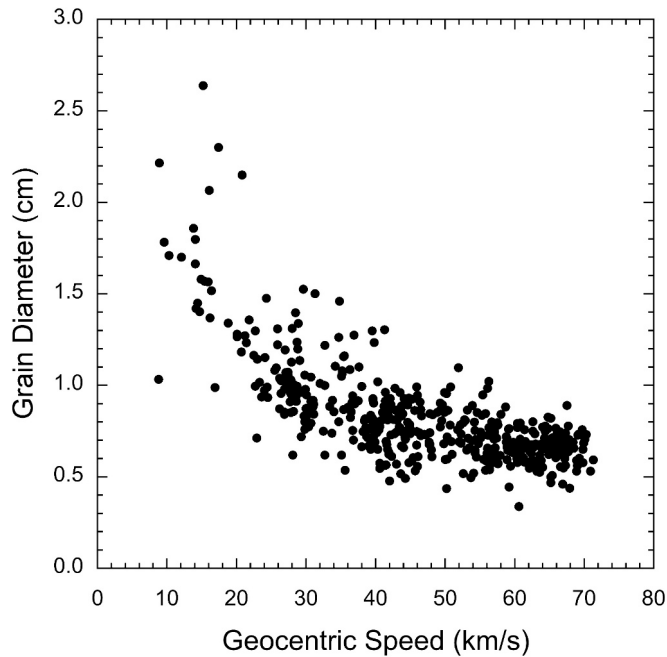


Fig. 4. Median grain diameter of a zero-magnitude meteor for all showers over the full range of entry speed. Vertical dispersion is due to differences in the measured meteoroid density.

The mass distribution index $s = 1 + 2.5 \log(\chi)$. While nearly all meteors brighter than +0 magnitude are detected, few faint meteors are. This is mainly because the contributing stations in a triangulation are often at different distances from the meteor and meteors are fainter when further away. Also, fast meteors tend to move rapidly over the sensor and are less efficiently detected. Meteors slower than 20 km/s are also more easily missed. In addition, the detection efficiency of a given shower depends on whether it can be detected by southern hemisphere stations, which have newer cameras on average and are located under darker skies. When CAMS-detected rates were high enough to populate the bright -4 to -1 magnitude range, where $N(m) \sim \chi^m$, then χ could be derived directly. Extrapolation to fainter $+5$ magnitudes resulted in the observed versus expected number ratio $P(m)$. In this way, probability functions were derived for a range of entry speed and shower radiant latitude. If a minor shower had a radiant near one of the calibrated showers, then that efficiency curve was used.

Each meteor has a beginning height where it is first detected (H_{begin}), a height of peak brightness (H_{max}), and an end height (H_{end}). The lightcurve shape parameter is defined as (e.g., Beech and Murray (2003):

$$F = (H_{\text{max}} - H_{\text{begin}}) / (H_{\text{end}} - H_{\text{begin}}) \quad (4)$$

The shape factor is a low $F \leq 0.59$ if the meteoroid is fragile, while $F \sim 0.76$ if the meteoroid is a single body.

Looking at the beginning heights of meteors in a given shower, there is a range of values (Fig. 5). Often, there are two groups in a shower, a group that is first detected at a relatively high altitude (I) and a group that is only detected further down (III). The orbital elements of each group are the same, hence particles with these different beginning heights belong to the same stream. Differences in beginning height are expected for meteoroids of different density, different thermal conductivity, but also different strength (Ceplecha and McCrosky, 1976). Our spectroscopic measurements of meteors show that the lower group is associated with meteors poor in sodium (Jenniskens, 2023), meaning that these grains experienced sufficient heating to lose some of the sodium-containing minerals. Heating tends to result in an increase in strength and an increase in density. Hence, throughout this paper we

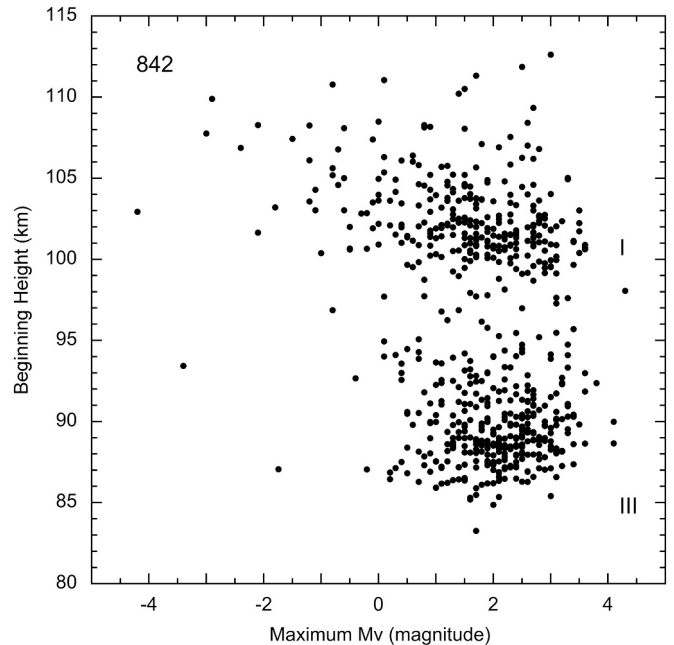


Fig. 5. Beginning height of all shower IAU#842 meteors triangulated by CAMS cameras. Symbols “I” and “III” indicate the two main meteor beginning-height classes present in the shower.

will refer to these groups as “fluffy” or “low density” (I) and “dense” or “high density” (III). While the number of members in each group depends on the activity of the shower, the ratio of members in the two groups, e.g. $\text{III}/(\text{I} + \text{III})$, is diagnostic for the process that created the type III particles.

The beginning height is to first order dependent on the square of the entry velocity (V_{∞}). After correcting for this effect, we define a *beginning height parameter* k_c as:

$$H_b \text{ (km)} = k_c \text{ (km)} - [2.86 - 2.00 \log(V_{\infty} \text{ (km/s)})] / 0.0612 \quad (5)$$

The equation is written this way because the air mass density ρ_{air} as a function of height over the full 0 to 150 km range is approximated by (Ceplecha and McCrosky, 1976; Jenniskens, 2023):

$$^{10}\log \rho_{\text{air}} \text{ (g/cm}^3\text{)} = -2.86 - 0.0612 H \text{ (km)} \quad (6)$$

Values of k_c (valid for $M_v = 0$ meteors) are mostly in the narrow range of 85–103 km. The range of k_c was divided up in three-km bins, from which meteors were assigned to belong to type Ia, I, Ib, IIa, II, IIb and IIIa, IIIb, and IV (Fig. 6). They are shown with these symbols throughout the paper. The numbering (from high to low beginning altitudes) is opposite to that used in the classification by Ceplecha and McCrosky (1976), which may help avoid confusion.

Roughly, showers Ia–II are part of band I in Fig. 5, while IIb–IV are part of band III. We added the number of meteors in the sub-classifications Ia to II into a “low-density” or “fluffy” class, and the number of meteors in the subclassification IIb to IV into a “high-density” or “dense” class (Fig. 6). The fraction of dense meteoroids in the population was determined from the number of meteors with low beginning height over the total $\text{III} / (\text{I} + \text{III})$:

$$f_d = N(\text{IIb-IV}) / N(\text{Ia-IV}) \quad (7)$$

Defined in this manner, f_d ranges from 0 to 1.

The meteoroid density was derived from the measured deceleration parameters a_1 (unit: km) and a_2 (unit: /s), defined as (Jacchia et al., 1967):

$$V = V_{\infty} + a_1 a_2 (1 - \exp(a_2 t)) \quad (8)$$

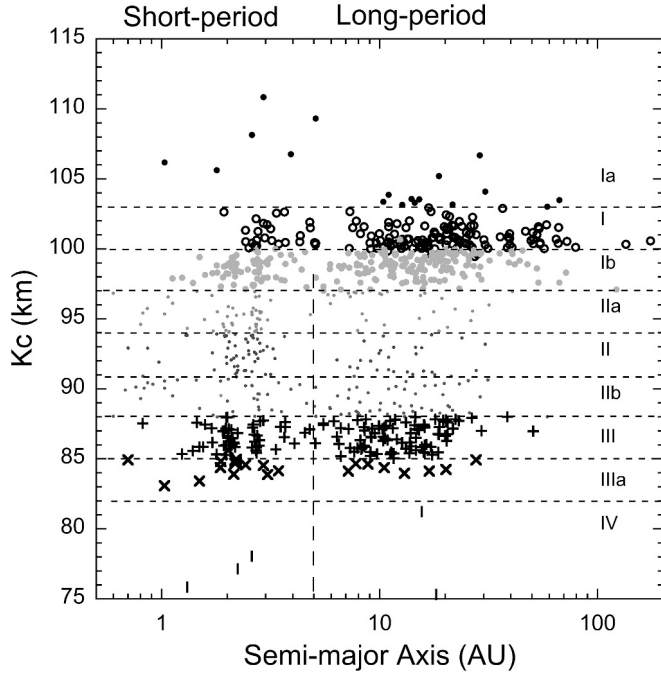


Fig. 6. The median beginning height of all CAMS-detected meteor showers, corrected for velocity-dependence (K_c). Different symbols (used in later graphs) define 3-km bins in the K_c -heights distribution and correspond to the shower type Ia – IV, as defined by Jenniskens (2023).

Here we should point out that not all CAMS data were reduced with this type of fit. The software allows for three options for the deceleration fit and sometimes another option was set by mistake, usually following the manual analysis of a fireball that required a different fit. The reported deceleration parameters were sorted to only include the ones reduced with Eq. 8.

We assume that the luminous efficiency does not depend on speed. If it does (e.g., Koschny et al., 2017), then the dependency of beginning height with entry speed would be different than observed. In that case, the mass (m) of a zero magnitude ($M_V = 0$) meteor is derived from the emitted energy being equal to the energy passing through a sphere at a distance from:

$$\tau \times 0.5 \times m \times V_\infty^2 = 3.67 \cdot 10^{-11} \times \Delta t \times \Delta \lambda \times 4 \pi R^2 \quad (9)$$

with $3.67 \cdot 10^{-11}$ W/m²/nm being the V-band irradiance of magnitude 0 star Vega (Jenniskens, 2006), Δt the meteor duration, $\Delta \lambda$ the full-width-half-maximum range in wavelength covered by the camera, R the distance from camera to meteor and V_∞ the entry speed. The duration Δt of a zero-magnitude meteor in CAMS data depends on V_∞ as $\Delta t \sim V_\infty^{0.73}$ (by plotting the observed values of $\log \Delta t$ vs. $\log V_\infty$). This makes the mass of a zero-magnitude meteor proportional to $m \sim V_\infty^{2.73}$.

The density of the meteoroid (ρ) follows from the transfer of momentum from air with density ρ_{air} to the meteoroid. During Δt , a meteoroid with speed V and mass m will strike a mass of air $m_{\text{air}} = A_E \rho_{\text{air}} V \Delta t$. The deceleration to first order (from Taylor expansion of Eq. 8) at the beginning of the trajectory is (with ρ_{air} the air density at the beginning altitude):

$$\delta V / \delta t = -0.5 C_d A_E / m \rho_{\text{air}} V_\infty^2 = -a_1 \cdot a_2^2 \quad (10c)$$

For a spherical grain with radius r : $m = A_E \rho r / 3$, so that.

$$\rho \sim \rho_{\text{air}} V_\infty^2 / (a_1 a_2^2 r) \quad (10b)$$

If we use the beginning height of 0-magnitude meteors only, and taking into account that the mass of a zero-magnitude meteor scales with $V_\infty^{2.73}$, in that case we have $r \sim V_\infty^{-2.73/3} = V_\infty^{-0.91}$ and the bulk meteoroid

density (ρ) scales with (Jenniskens, 2023):

$$\rho \sim \rho_{\text{air}} V_\infty^{2.91} / (a_1 a_2^2) \quad (10c)$$

The scale was chosen so that the highest densities measured were that of molten silicate droplets (3.5 g/cm^3). While there are higher density iron particles in the cm-sized meteoroid population, at a rate of 21 such Fe particles detected among 1005 random meteors (Jenniskens, 2023), they are not associated with meteor showers.

The results can be compared to the rigorously determined meteoroid densities from high temporal and high spatial resolution imaging and lightcurves of cometary meteoroids. The approach above puts the October Draconid density at 0.28 g/cm^3 (measured from lightcurves: 0.30 g/cm^3 by Borovicka et al., 2008), the tau-Herculids at 0.28 g/cm^3 (0.26 g/cm^3 by Buccongello et al., 2023, 2024, using the same method as Borovicka et al., 2008), the eta-Aquariids and Orionids at 0.41 g/cm^3 ($\sim 0.40 \text{ g/cm}^3$ by Buccongello et al., 2023; 0.26 ± 0.11 by Buccongello et al., 2024), the Lyrids at 0.41 ± 0.07 ($0.44 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ by Buccongello et al., 2024), the eta-Lyrids at 0.78 g/cm^3 (0.86 g/cm^3 by Buccongello et al., 2024), the Southern Taurids at 1.38 ± 0.05 ($0.68 \pm 0.17 \text{ g/cm}^3$ by Buccongello et al., 2024), and the Geminids at 1.27 g/cm^3 ($1.39 \pm 0.24 \text{ g/cm}^3$ by Buccongello et al., 2024).

2.3. Meteoroid stream models

To investigate the changes over time in the parameters discussed in Sect. 2.2, we investigated the age of long-period comet showers in our sample, which comprise of almost half of all showers. To date, there are very few published dynamical studies of long-period comet showers and the studies that have been published are not focused on how the showers disperse as a function of time, but rather how the complex can evolve to created multiple showers (Hajduková et al., 2015; Hajduková and Neslusan, 2017, 2019, 2021; Neslusan and Hajduková, 2018, 2019, 2020, 2021).

The theoretical work follows methods developed by Vaubaillon et al. (2005), Jenniskens (2006) and Jenniskens and Vaubaillon (2010), taking into account the planetary perturbations of all the planets from Mercury to Pluto as well as radiation pressure, solar wind pressure and Poynting-Robertson drag on the meteoroids. Orbital elements of known comets were used during testing. Integrations were carried out on a Dell Precision 7820 Tower Workstation dedicated to this project. The techniques used have been successfully applied in the past (e.g., Vaubaillon et al., 2005; Wiegert et al., 2009; Moorhead et al., 2014; Abedin et al., 2015; Tomko and Neslusan, 2019).

The PINTEM code by Vaubaillon et al. (2005) was adapted to speed up the integrations and remove redundancies. This code is built around a 15th order implicit Bulirsch-Stoer-like routine (Everhart, 2014). Comparisons of integrated orbits with NAIF SPK kernels for known comets indicated that requiring convergence to 14 or 15 digits was attainable. With less than that, the exchange of kinetic and potential energy around perihelion is slightly different than that obtained using NAIF kernels. The code is configured now to run with either the SPICE library and NAIF SPK kernels (Acton et al., 2017), or with the Calceph library and INPOP files (Gastineau et al., 2015; Fienga et al., 2008). The latter are necessary for longer period integrations that extend beyond the 15,000 years that the JPL De441 kernels allow.

Comet 55P/Tempel-Tuttle was used for validation of short term integrations, with good agreement obtained with previous studies by McNaught and Asher (1998) and Vaubaillon et al. (2005) using NAIF kernels. The z-plane crossing locations for ejecta streams from all perihelia from 1699 to 1965 were compared, and the width and temporal profile of streams were analyzed, in order to catalog the mass distribution versus time for streams of various ages.

For longer integrations, our workhorses are two 500kyr INPOP ephemerides centered on the present, and readable with the Calceph library (Gastineau et al., 2015). Our implementation of the Calceph

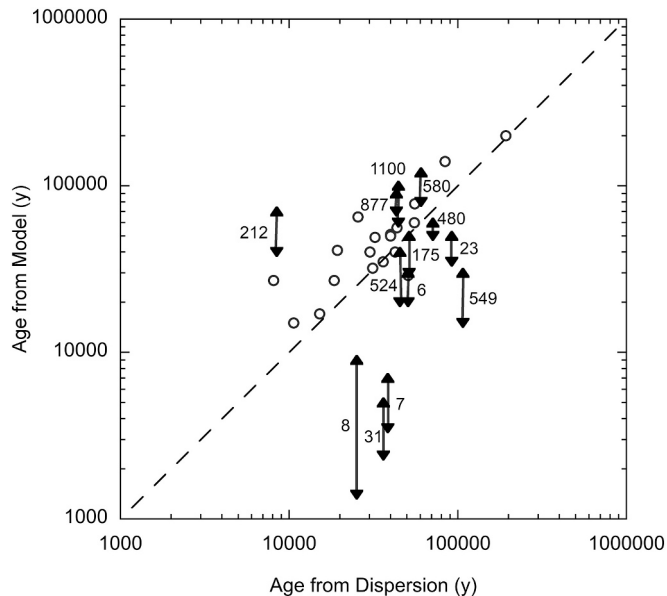


Fig. 7. Age estimates for long-period comet showers based on dynamical models of meteoroid stream dispersions (o, Table 5). Triangles show ages derived from published work (as listed in Jenniskens, 2023).

library was checked by finding consistent agreement between integrations performed from 10,000 BCE to the present for a number of initial conditions, using the Calceph library and ephemerides versus using the SPICE library with the NAIF de441 kernel.

The method to study the dynamical evolution of meteoroid streams (e.g., Kondrat'eva and Reznikov, 1985; Harris et al., 1995; Vaubaillon et al., 2005; Jenniskens, 2006) focuses on quantifying the growth in dispersion of the stream particles' orbital elements as the stream is integrated forward in time. Initial conditions are found by first integrating the orbit of the parent body, or of a body with the stream's orbital elements when the parent body is not known, back in time for 60,000 to 100,000 years. We adopt initial orbits with orbital periods between 250 and 4000 years, similar to that of known dynamically long-period comets with observed showers (Jenniskens et al., 2021). Comets on longer orbital periods have streams too dilute to be detected. Non-gravitational forces are taken into account only if they are tabulated in the NAIF Small Bodies database.

Fig. 7 shows our calculated ages for long-period comet showers by matching the observed stream dispersion in Earth's path to that modeled as a function of age (open circles, Table 5 below). The derived ages are plotted against ages calculated from a general equation based on dispersion (Jenniskens (2023)). We tend to find similar, on average $\sim 27\%$ higher, ages than derived from other work (dashed line). Solid triangles show results from comparing observed dispersions to those calculated for different ages in graphs published by Hajduková et al. (2015), Hajduková and Neslusan (2017, 2019, 2021), and Neslusan and Hajduková (2018, 2019, 2020, 2021). Showers are identified with the IAU shower number. The age of the Orionids (8), eta-Aquariids (31) and Perseids (7) are discussed in the "Brief history" sections in Jenniskens (2023) and may be higher than given here.

3. Results: Shower properties and dependencies

3.1. Detected streams

A total of 487 meteor showers were extracted from the video data, while 26 additional showers were identified unique to radar. The nature of these showers is shown in Fig. 8A, which plots the median orbital inclination versus semi-major axis. Nearly half of the showers (247)

originated from long-period and Halley-type comets. These showers have semi-major axis larger than 5 AU and inclinations between 20 and 180°. Short-period showers (semi-major axis < 5 AU) are mostly found in the antihelion and helion sources (inclination < 20°) and in the toroidal sources (inclination 20–90°). The radar-detected showers are mostly short-period showers in the helion and toroidal sources, as well as some strong Halley-type showers (open circles in Fig. 8A). The showers unique to radar are not considered here.

Fig. 8B plots the orbital elements in terms of the Tisserand parameter with respect to Jupiter. The traditional distinctions between asteroids ($T_J > 3$), Jupiter family comets ($2 < T_J < 3$), Halley-type comets ($1 < T_J < 2$), and long-period comets ($T_J < 1$) are also recognized, but the borders are slightly different because the meteoroid streams have evolved over time. Solid lines in Fig. 8B show the approximate new borders.

The dynamic type of a meteoroid stream is long-period comet like for $T_J < 0.65$, Mellish-type for $0.65 < T_J \leq 2.0$, Jupiter-family comet type $2.0 \leq T_J \leq 3.5$, and asteroid like for $T_J > 3.5$. The borders reflect the observed distribution of median Tisserand parameters of meteor showers, not the dynamical class of the parent body.

"Mellish-type" showers are mostly prograde highly inclined ($i = 20\text{--}80^\circ$) showers in the toroidal source. The December Monocerotids of comet C/1917 F1 (Mellish) is the lowest-numbered example. Dynamical models suggest they originated mostly from Halley-type comets, but can also originate from Jupiter-family comets, and even from asteroids. Halley-type comets 1P/Halley, 109P/Swift-Tuttle, and 55P/Tempel-Tuttle have "Long-period comet" type meteor showers (Jenniskens, 2023). The "toroidal source" consists of short-period meteoroids in highly inclined $i \sim 60^\circ$ orbits, and is named this way because these orbits form a cylindrical toroid in space (Hawkins, 1963).

We notice here that many Jupiter-family comet showers come as a group that evolves smoothly from the Mellish-type group into the asteroidal group. Examples are the showers from the Machholz Complex for 96P/Machholz. Other Jupiter-family comet showers scatter to higher Tisserand parameters, with higher semi-major axis and having evolved less since capture by Jupiter.

The meteoroid streams of primitive asteroids have similar Tisserand parameters to the evolved Jupiter-family comets. Based on identified parent bodies, only a few showers appear to have originated from primitive asteroids, and most of those have low perihelion distance (Jenniskens, 2023).

Long-period comet streams are detected from parent comets with orbital periods in the range from 250 to 4000 y (Jenniskens et al., 2021). Those streams come in two different dynamical groups. Fig. 9 shows that most retrograde moving streams have a value of the rate at which the argument of perihelion (ω) changes along Earth's path follows a strong function of the inclination of the orbit (Jenniskens, 2023). This group defines a class of parent bodies that are perturbed by planetary perturbations in a systematic way, showing mostly the effect of precession and conditions needed for the meteoroids to intersect Earth's orbit. A similar but weaker effect is seen in the drift of the perihelion distance versus inclination.

3.2. Measured dispersions

Fig. 10A–C show the measured dispersions as a function of their values in the orbital elements node (Ω), argument of perihelion (ω), and inclination (i). The dispersions describe the 1-sigma spread in the orbital elements, after correcting for daily drift along Earth's path. The dispersions in node were corrected for the geometry of the encounter, showing $\Omega * \sin(\delta)$, where the attack angle δ is given by:

$$\delta = 180^\circ - \arccos(\sin(\lambda - \lambda_0) \cos(\beta)) \quad (11)$$

with λ and β the ecliptic longitude and latitude of the radiant and λ_0 the solar longitude. The dashed lines in Fig. 10A and B show prograde ($i \leq$

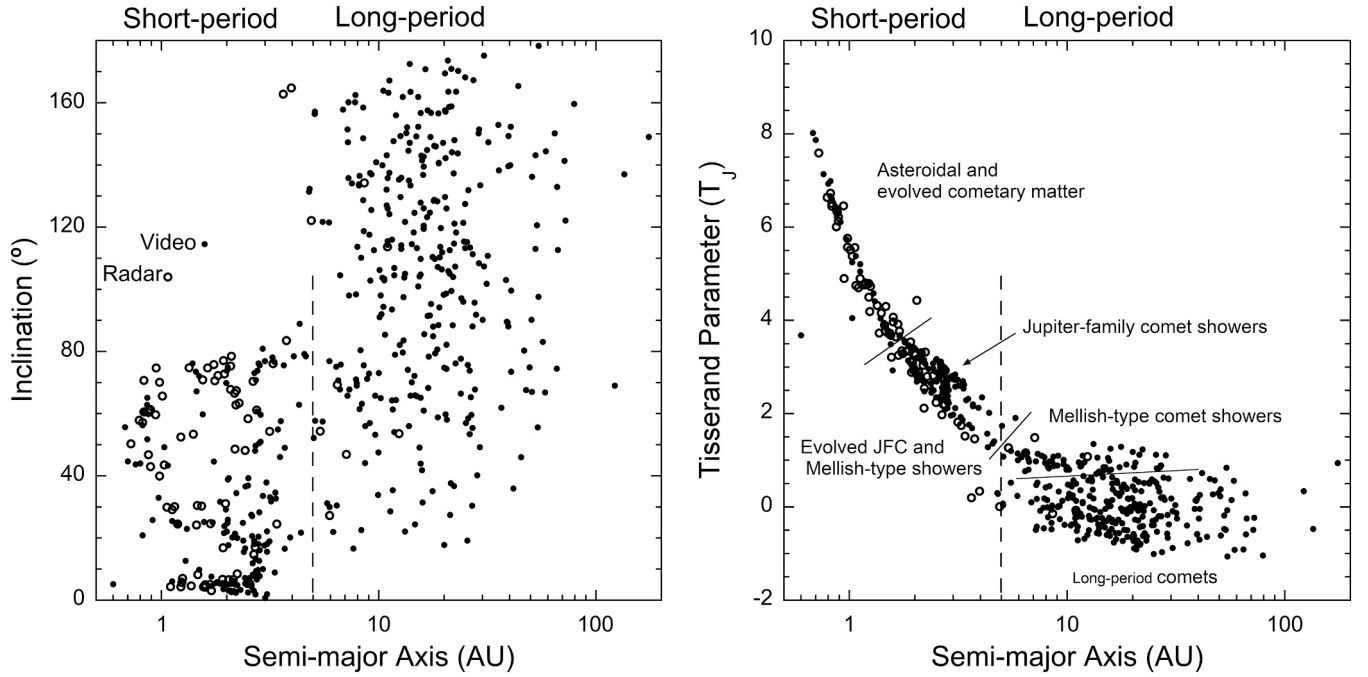


Fig. 8. A The median inclination of all video (●) and radar (○) detected meteor showers are plotted against the semi-major axis of the orbit. A dashed line gives the approximate distinction between short-period and long-period comet showers. B – The Tisserand parameter with respect to Jupiter for all meteor showers based on their median orbital elements. The meteoroid streams are dynamically evolved and traditional boundaries (< 1 for long period comets, 1-2 for Halley-type comets, 2-3 for Jupiter-family comets, and > 3 for asteroids) differ slightly from those of their parent bodies.

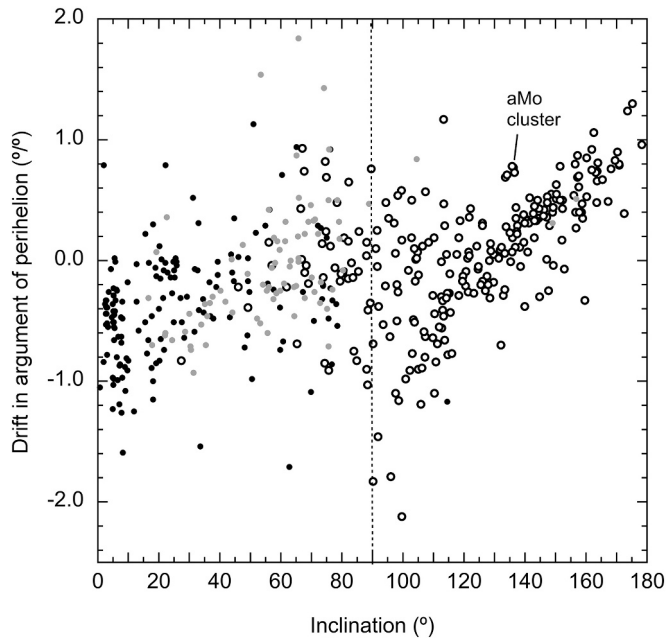


Fig. 9. The drift in argument of perihelion versus inclination for all showers. Long-period comet showers with $T_J < 0.64$ are shown as open circles and Mellish-type showers with $0.64 < T_J < 1.7$ as gray solid symbols. The remainder are Jupiter-family comet and primitive asteroid showers. A small grouping identified as “aMo cluster” contains the long-period alpha-Monocerotids shower (IAU#246). Dashed line marks the distinction between prograde (left) and retrograde (right) orbits.

90°) showers to the left and retrograde showers to the right.

As expected, the dispersions in argument of perihelion and inclination correlate with those in node. Each measure of dispersion includes an amount of measurement error. All video-detected showers combined

have a median dispersion $\pm 3.8^\circ$ in node, $\pm 3.8^\circ$ in argument of perihelion, and 2.0° in inclination. The nodes are measured precisely, and measurement error in the dispersion of the node can be neglected. Most uncertainty in the nodal dispersion is from extracting the shower from the sporadic background. The median measurement error as determined from propagating Monte Carlo type error estimates in time, radiant and speed for individual meteors amounts to about $\pm 0.5^\circ$ in inclination and $\pm 0.7^\circ$ in argument in perihelion (Jenniskens et al., 2011).

Dispersions in inclination (Fig. 10A) are low for Jupiter family comet showers in the antihelion and helion sources that have inclination $< 20^\circ$. Dispersions are high for toroidal sources that have inclinations in the range $20 < i < 90^\circ$. Both trends could signify age, with Jupiter-family comet showers typically being dispersed rapidly by planetary perturbations, so most showers are young, while toroidal showers are dynamically evolved by Kozai cycles and tend to be old (e.g., Jenniskens, 2006). The dispersions do not correlate with the sine of the inclination of the orbit, for $20 < i < 160^\circ$.

The dispersions in argument of perihelion (Fig. 10B) tend to be lower when $\omega \sim 0^\circ$ and 180° , which is on account of geometry. Increased dispersion tends to move the meteoroids out of Earth’s orbit so that each shower measures only a narrow range in ω .

As expected, the dispersion in node (Fig. 10C) does not correlate with the node itself. After correcting for attack angle, the dispersion is about half the dispersion in argument of perihelion for long-period comet showers, with no dependency on inclination $65^\circ < i < 175^\circ$. Among prograde Mellish-type showers (gray symbols in Fig. 9), most with $i < 65^\circ$ have a dispersion in node about two times higher than the dispersion in argument of perihelion. The dispersion in node is about equal to the dispersion in inclination, except for $i < 20^\circ$, where the dispersion in node is typically higher. The dispersion in inclination is about half the dispersion in argument of perihelion, except in the inclination range $20 < i < 65^\circ$, where the dispersion is about equal.

Neglecting a possible factor of two weight for inclination, we defined a combined dispersion simply as:

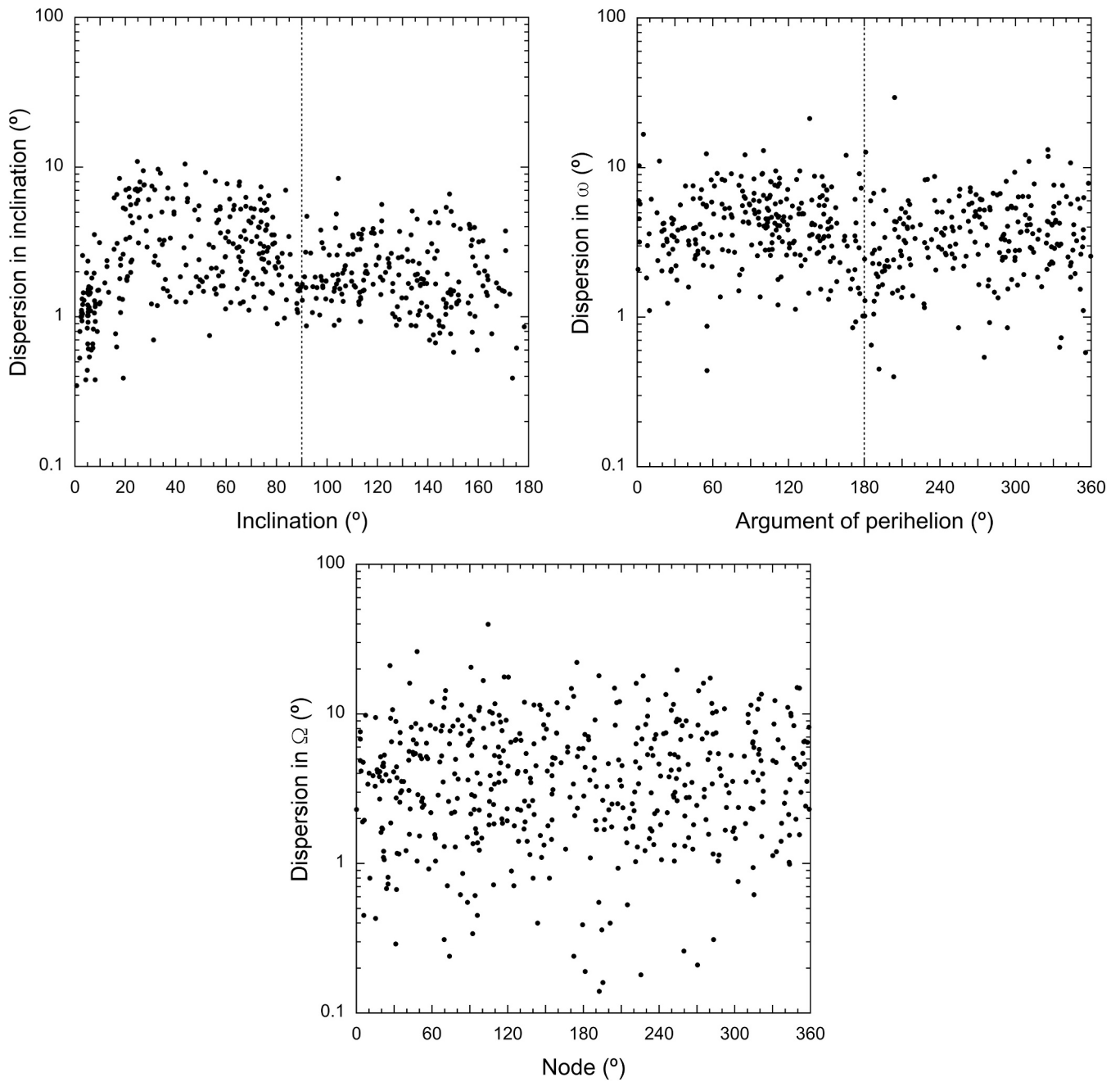


Fig. 10. A The dispersion of inclination as a function of inclination, with prograde showers on the left side of the dashed line and retrograde showers on the right side. B – As Fig. 10A for the dispersion of the argument of perihelion as a function of the argument of perihelion. C – As Fig. 10A, for the dispersion of node as a function of node.

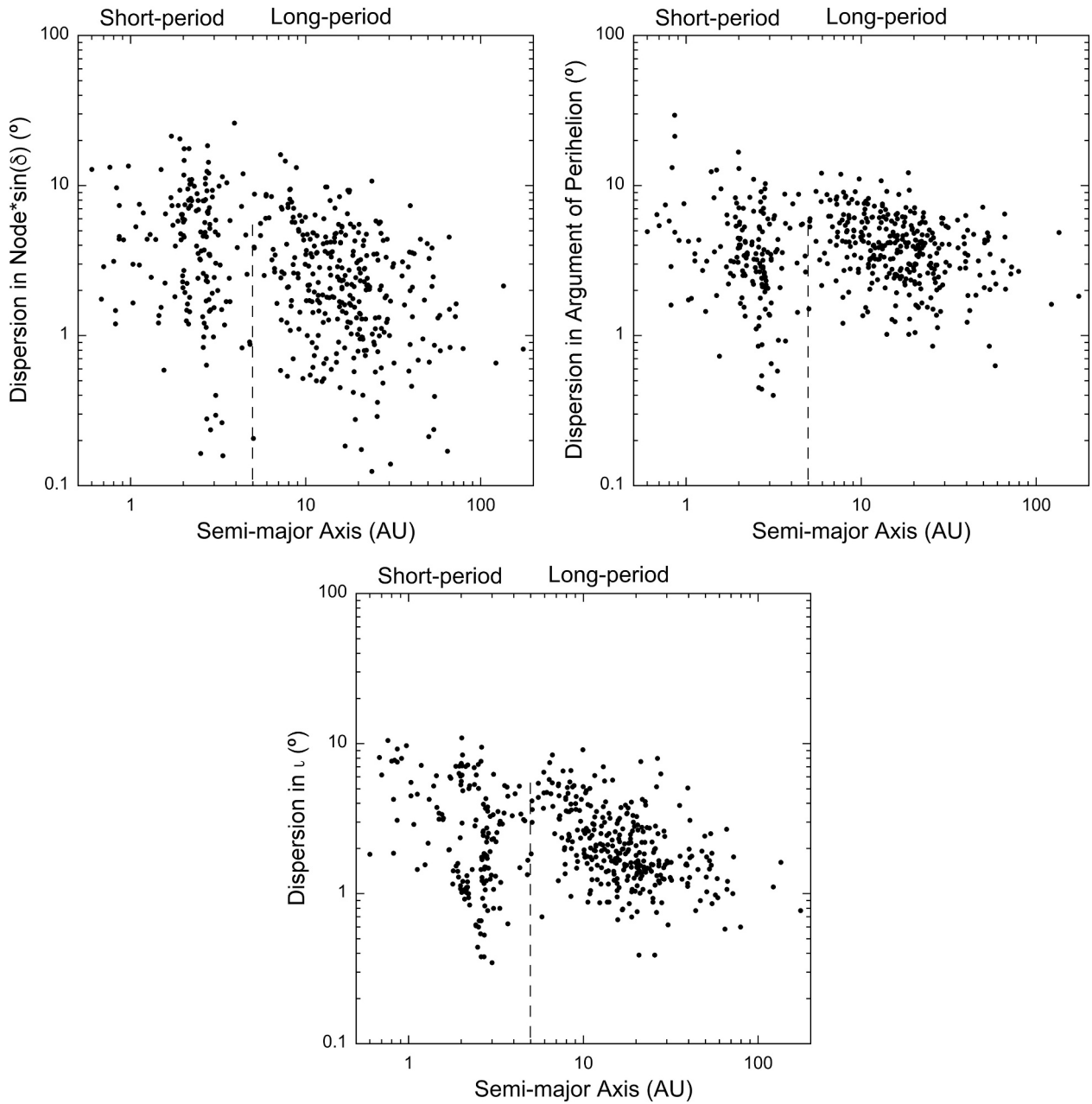


Fig. 11. A – The dispersion in node, corrected for attack angle δ , for each shower is shown versus semi-major axis in the manner of Fig. 8A. B – Same as Fig. 11A, for dispersion in argument of perihelion (ω). C – Same as Fig. 11A, for dispersion in inclination (i).

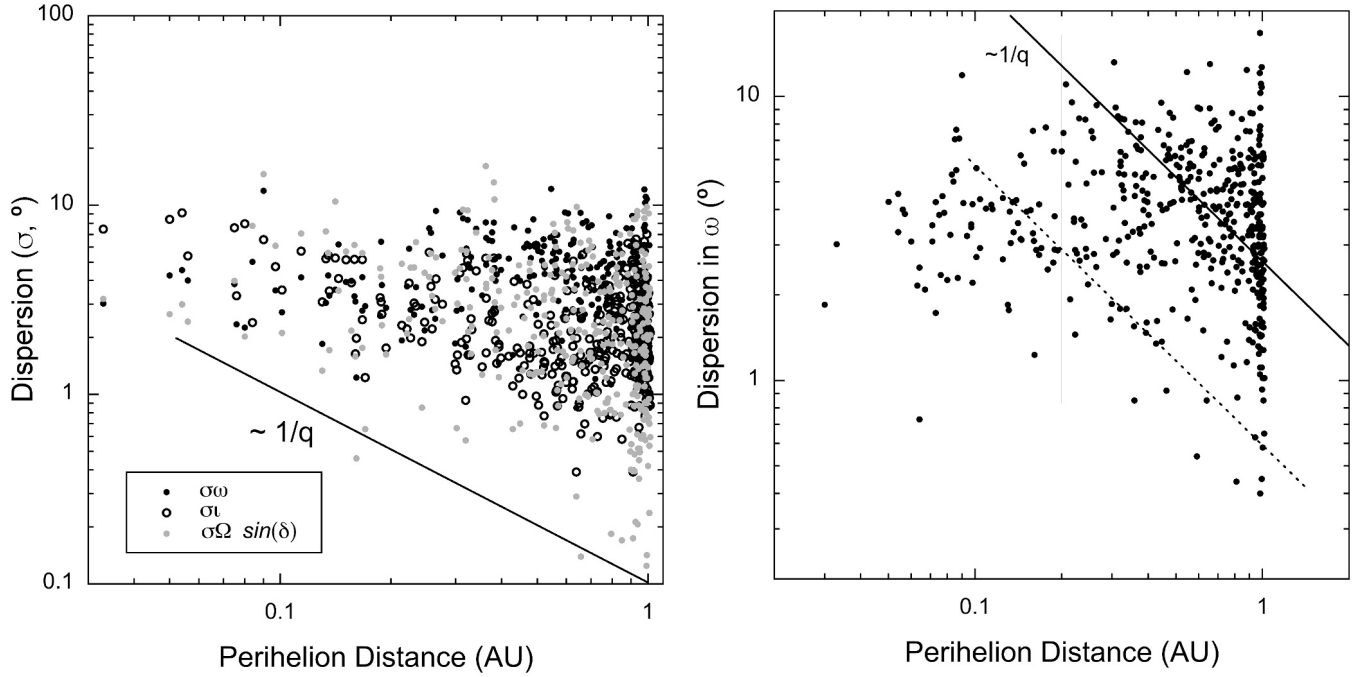


Fig. 12. A – Dependence of the three angular dispersions on the perihelion distance (q) of the orbit for all long-period and Mellish-type showers. The solid line shows the expected slope of a $1/q$ dependence. B – As Fig. 12A, but for all meteor showers. The slanted lines are proportional to $1/q$ and are scaled to match older showers (solid line) and young showers (dashed line).

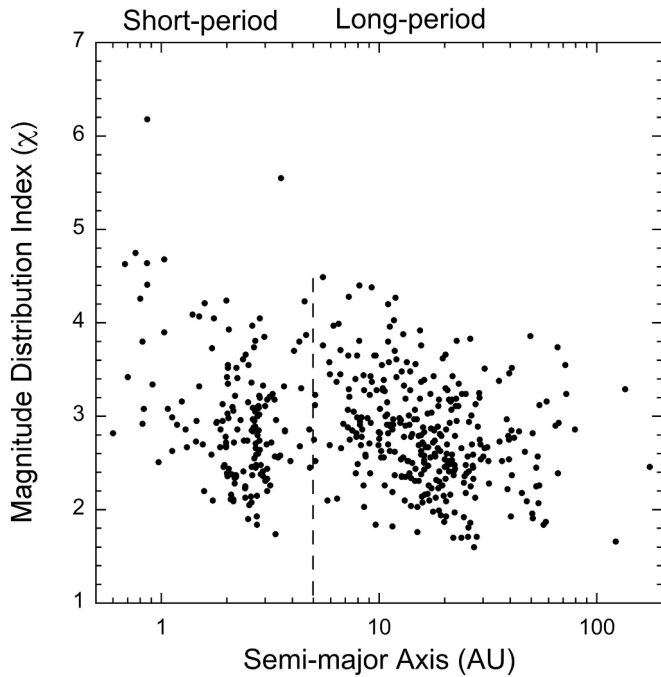


Fig. 13. Same as Fig. 11A, for the value of the magnitude size distribution index (χ) of each shower.

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{(\sigma^2 - 0.5^2) + (\sigma\omega^2 - 0.7^2) + (\sigma\Omega\sin(\delta_v))^2} \quad (12)$$

Fig. 11A–C compare the dispersions for different comet types. The dispersion in node (Fig. 11A) tends to increase for shorter period orbits, but no longer for a < 2 AU. For long-period comets, the dispersion in inclination also tends to increase with decreasing semi-major axis. The dispersion in inclination is clustered among short-period showers, reflecting the presence of shower complexes (e.g., Taurid Complex).

Finally, we examined the dependence of dispersions on the perihelion distance, assuming all values of perihelion distance sample the same range of shower ages. Fig. 12A shows the dispersions for all long-period and Mellish-type showers. The lower limit of dispersion follows a $1/q$ dependence as indicated by the slope of the solid line. The showers near this lower limit have the lowest dispersions and are the young showers in each bin of q . The population of older showers may follow a similar trend, but only until reaching a maximum dispersion of about 10° . There is likely an upper limit to the dispersions based on what showers can still be separated from the sporadic background. The most dispersed showers have $\sigma\Omega * \sin(\delta) \sim 20^\circ$. Hence, this upper limit could be an observational limitation to detecting very dispersed showers in the apex source, or it could be an effect of age, where the meteoroids are lost from the stream when reaching this limit.

Fig. 12B plots the dispersion of the argument of perihelion for all showers (including Jupiter-family comet showers) as a function of perihelion distance on a log-log scale. Solid and dashed lines are proportional to $\sim 1/q$. For $q \sim 1$ AU, there is a full range of dispersions, but for $q < 0.2$ AU there are only small values. We interpret this to mean that showers with $q < 0.2$ AU do not sample the same range in age and are mostly young showers.

3.3. Magnitude size distribution index

The magnitude size distributions show much the same patterns with semi-major axis as seen in the orbital elements: broader (older) streams have on average higher magnitude size distribution indices (Fig. 13).

Magnitude size distributions are measured independently from the stream dispersions. Because radiation forcing plays such a small role, the main cause of the dispersions in orbital elements is gravitational perturbations, which are independent of mass in the size range considered here.

Showers with high magnitude distribution index tend to be more dispersed (Fig. 14). The correlation coefficients are not high, however. Looking at individual orbital element dispersions, we have for $\sigma\omega$ a correlation coefficient $r = 0.41$, for σ : $r = 0.46$, and $\sigma\Omega$: $r = 0.32$. Restricting the sample to only long-period comet showers (shown in

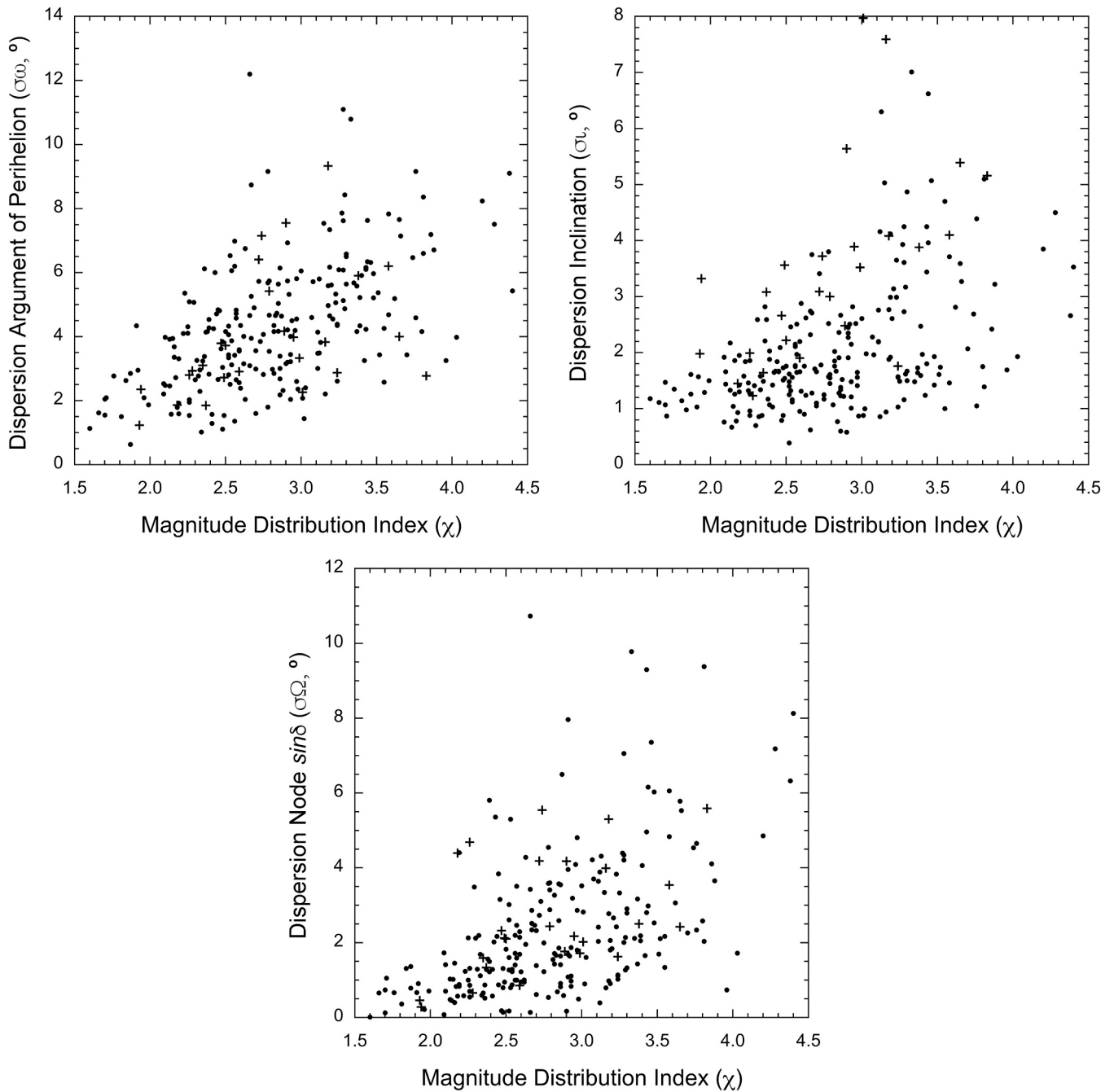


Fig. 14. A – The observed dispersion in argument of perihelion is shown as a function of the magnitude distribution index for long-period comet showers. Solid points are showers with perihelion distance $q \geq 0.3$ AU, while crosses are those with $q < 0.3$ AU. B – As Fig. 14A, for the dispersion in inclination. C – As Fig. 14A, for the dispersion node corrected for attack angle.

Table 2

Correlations coefficients (r) in bins of perihelion distance (q) of shower dispersions versus magnitude distribution index for long-period comet showers with $20 < i < 160^\circ$.

q (AU)	r_{\perp}	r_{ω}	r_{Node}
0.05	0.079	0.132	0.165
0.15	0.378	0.096	0.391
0.25	0.847	0.325	0.503
0.35	0.415	0.475	0.330
0.45	0.401	0.700	0.669
0.55	0.583	0.601	0.187
0.65	0.558	0.672	0.489
0.75	0.531	0.397	0.269
0.85	0.545	0.654	0.503
0.95	0.433	0.543	0.292
1.007	0.024	0.216	0.291

Fig. 14A–C) does not change this picture: for $\sigma\omega$: $r = 0.55$ (Fig. 14A), σi : $r = 0.48$ (Fig. 14B), $\sigma\Omega$: $r = 0.51$ (Fig. 14C). Either showers start out with different magnitude distribution index, they disperse at different rates depending on orbital elements, or the larger particles are lost at different rates depending on orbital elements or physical properties. Likely, all these issues play a role.

Checking to see if the dispersion is affected by perihelion distance (shown schematically as two groups of different symbols in Fig. 14A–C), we first excluded the low prograde $i < 20^\circ$ and retrograde $i > 160^\circ$ inclinations. Then, calculating correlation coefficients in steps of 0.1 AU in q shows that highest correlation coefficients for $20 < i < 160^\circ$ are for $0.20 < q < 0.90$ AU, with $\sigma\omega$: $r = 0.55$, σi : $r = 0.55$, $\sigma\Omega$: $r = 0.42$; and lower values for $q < 0.20$ AU and $q > 0.90$ AU (Table 2).

3.4. Light curve shape parameter

Fig. 15 shows the light curve shape parameter F values for the fluffy type Ia–II shower component (Fig. 15A) and the dense shower components IIb–IV (Fig. 15B), with symbols indicating shower type as in Fig. 6. Values for the Ia–II component mostly scatter between 0.45 and 0.76 and appear to be slightly higher on average for Jupiter-family comet streams (Fig. 15A). The difference is less clear for the dense shower

component (Fig. 15B), where both comet types show the same range of F .

Among the fluffy type Ia–II shower components, long-period comets have two types of materials, with a group at relative high $F \sim 0.65$ (mostly type Ib showers) and a group at $F \sim 0.53$ (mostly type I showers). Going from high median values of semi-major axis $a \sim 60$ AU to low values $a \sim 8$ AU in this population shows initially a preponderance of type I showers, but then a preponderance of type Ib showers.

Showers with small perihelion distance tend to be type II showers, not type I. Among the type I showers, there is no clear dependence of F value with perihelion distance, except that there are significantly few low values of F for $q < 0.3$ AU (Fig. 16).

3.5. Meteoroid density

The median meteoroid densities calculated are plotted in Fig. 17. Long-period comet showers tend to have lower densities than Jupiter-family comet showers, but there are exceptions. Notably the Draconids of comet 21P/Giacobini-Zinner have the lower density of 0.3 g/cm^3 typical of long-period comet showers. The long-period comet shower group also has some showers with properties more similar to those of Jupiter family comets.

Low density meteoroids do tend to have a lower F -value (Fig. 18), as expected if low density meteoroids fragment more easily.

Meteoroids in orbits with low q tend to have higher densities (Fig. 19). For $q < 0.2$ AU, the type II showers dominate. The type II showers in Fig. 19 that have $q \sim 0.3$ AU are members of the Taurid shower Complex. Overall, there is a $1/q$ dependence among Type I showers (open circles and gray dots).

3.6. Fraction of dense (low beginning height) meteors over total

Fig. 20A shows the fraction of dense over total meteoroids (f_d) as a function of semi-major axis to show the different comet shower populations separately. Fig. 20B shows this ratio as a function of perihelion distance.

We find that for the long-period comet population, the fraction of dense meteoroids in the population increases when the shower evolves

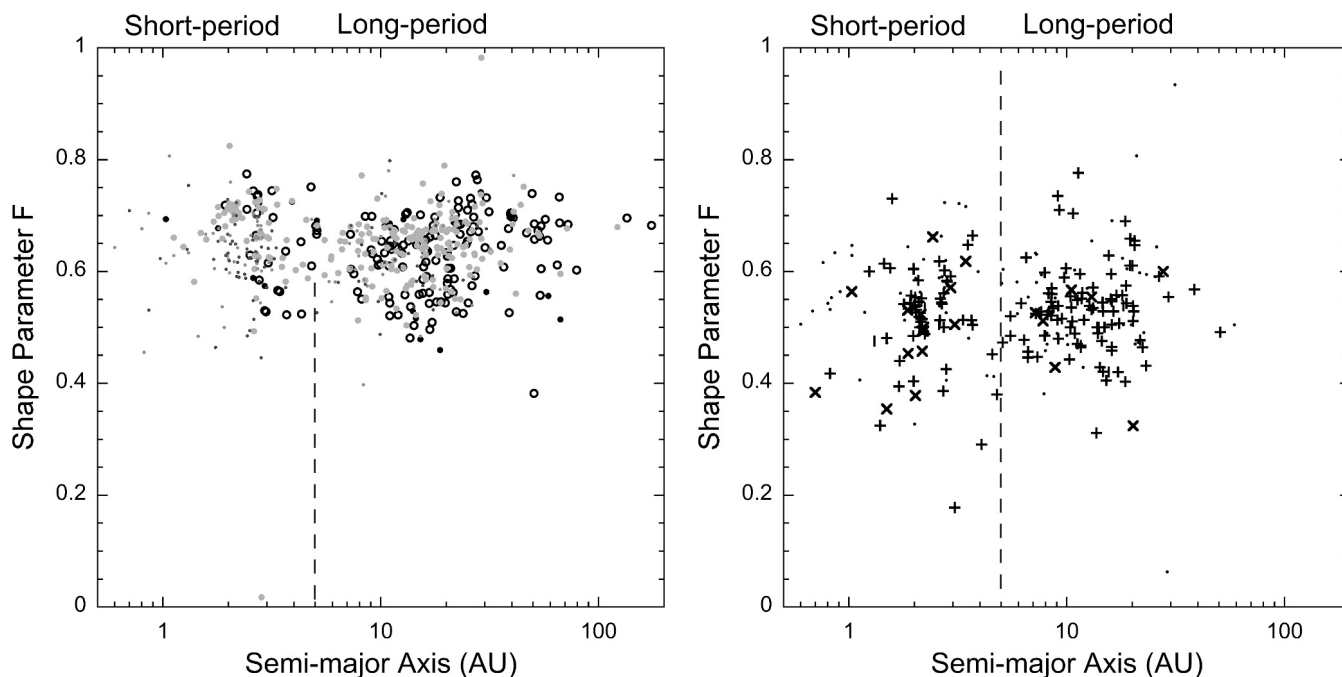


Fig. 15. A – The value of the light curve shape parameter (F) for fluffy shower components of type Ia – II, with each type shown with the symbols of Fig. 6. B – As Fig. 15A, for the shower components of type IIb – IV, with symbols as in Fig. 6.

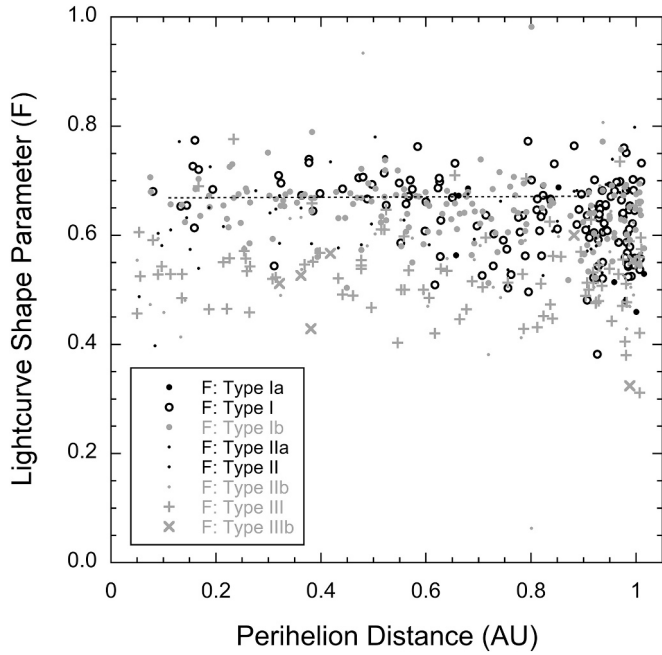


Fig. 16. The lightcurve shape parameter (F) of all showers as a function of the current perihelion distance of the orbit. Symbols as in Fig. 6.

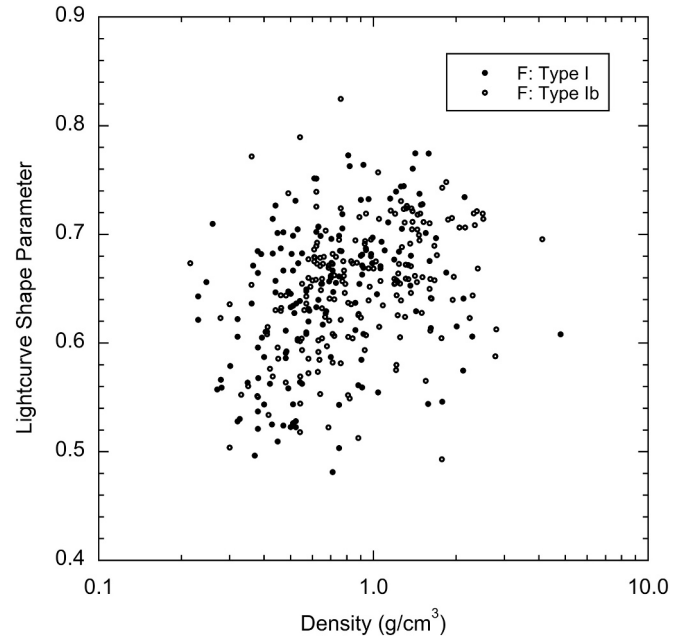


Fig. 18. The lightcurve shape parameter F-values as a function of meteoroid density for two “fluffy” types I and Ib (core of the band I).

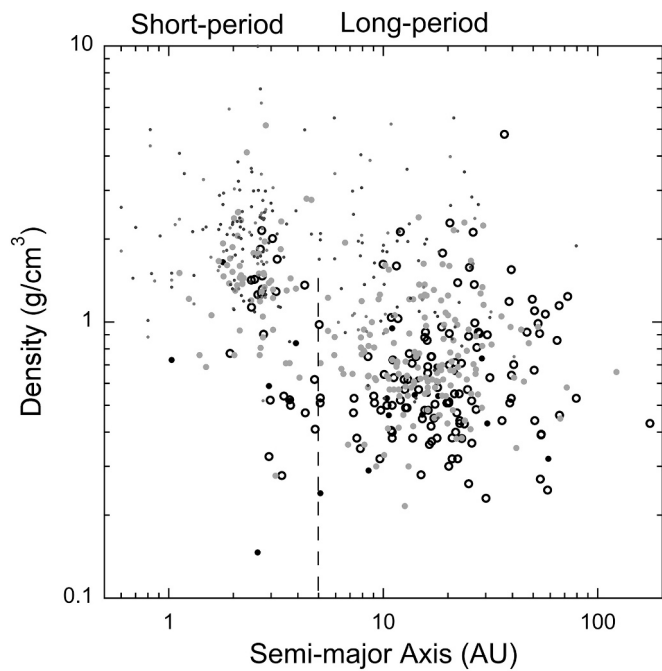


Fig. 17. Same as Fig. 11A, for the meteoroid density (ρ), with symbols as in Fig. 6.

(with age) to lower semi-major axis. Low-fractions of dense material are found in some of the Jupiter-family comet showers. High fractions, up to 100%, are found in low- q showers, with $q < 0.2$ – 0.3 AU.

4. Dispersions and physical parameters as a function of age

Meteoroid streams are expected to disperse over time. In order to quantify these changes, and catalog the changes in the size distribution index and meteoroid physical properties over time, the ages of observed meteoroid streams need to be determined.

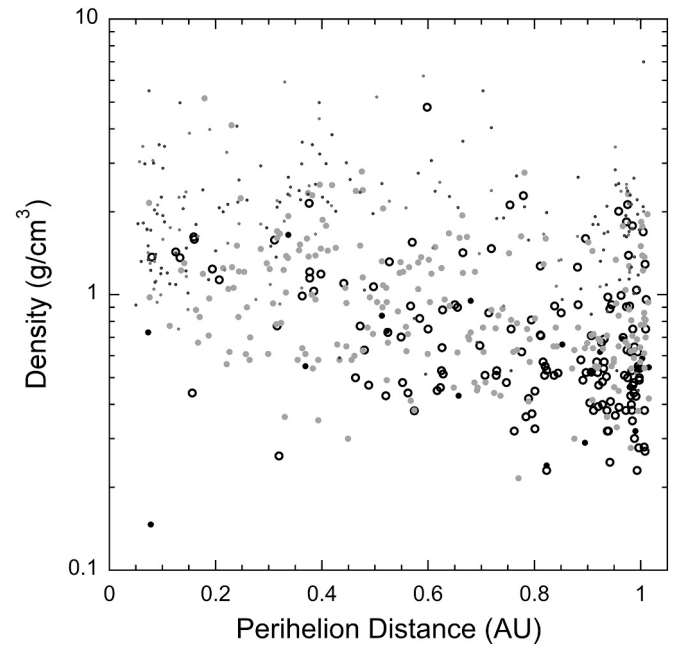


Fig. 19. The density of meteoroids in all showers as a function of perihelion distance. Symbols as in Fig. 6.

Numerous published dynamical models of meteoroid streams attempt to do just that, but show a lot of discrepancies between studies. A summary of that literature is provided in Jenniskens (2006, 2023). These studies require that the parent body, if known, be integrated back in time, then a cloud of meteoroids be integrated forward in time. The backward integration of the parent comet is not unique, and a subsequent forward integration doesn’t necessarily bring the comet back to its observed orbit. In addition to the random nature of planetary perturbations, there are the unknown non-gravitational perturbations on the comet orbit. Finally, the comet activity may not be constant over time. Indeed, fragmentation is a dominant mechanism of meteoroid stream

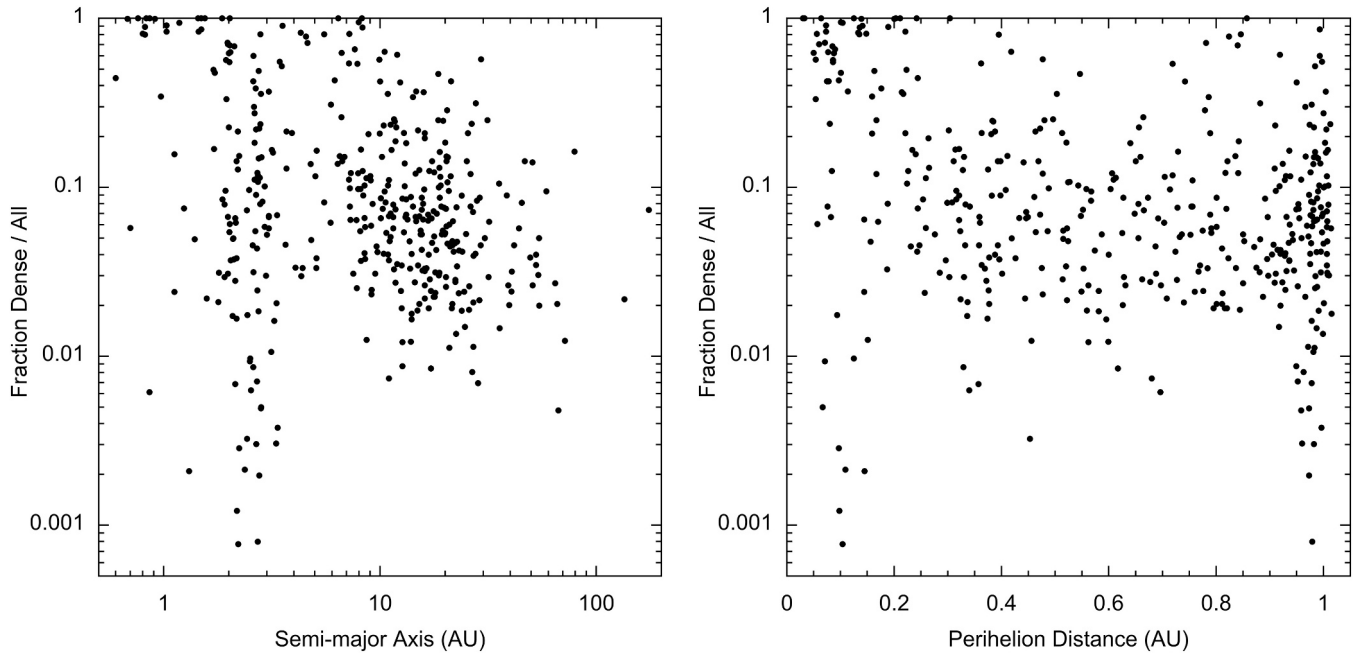


Fig. 20. A – The fraction of dense particles (types IIB–IV) relative to the total for all showers. B – As Fig. 20A, but now plotted as a function of perihelion distance q .

Table 3

Perseid meteor shower components, with orbital elements perihelion distance (q), inclination (i), dispersion in inclination, argument of perihelion (ω) and Node (Ω), the magnitude distribution index (χ), the age of the stream and the literature reference for the age information.

#	Component	q (AU)	i ($^\circ$)	σ_i ($^\circ$)	σ_ω ($^\circ$)	σ_Ω ($^\circ$)	χ	Age (y)	Ref
7	1862-dust trail $\lambda_o \sim 140^\circ$	0.960	113.39	0.23	0.58	0.040	1.72 ± 0.07	~ 130	[1,2]
7	1610-dust trail $\lambda_o \sim 140^\circ$	0.960	113.39	0.23	0.58	0.040	1.96 ± 0.07	~ 381	[1,2]
7	1079-dust trail $\lambda_o \sim 140^\circ$	0.960	113.39	0.23	0.58	0.040	2.12 ± 0.07	~ 939	[1,2]
7	Filament $\lambda_o \sim 140^\circ$	0.959	113.42	0.24	0.61	0.048	1.99 ± 0.13	390–1500	[1,2]
7	Annual Peak $138 < \lambda_o < 142^\circ$	0.949	113.0	2.85	6.15	0.90	2.36 ± 0.03	3000–20,000	[4,5,6]
7	July-Tail $125 < \lambda_o < 130^\circ$	0.956	111.6	4.00	5.84	1.39	2.83 ± 0.06	27,000–40,000	[3,4,6]
7	July-Tail $\lambda_o \sim 117.5^\circ$	1.002	109.7	4.11	5.82	2.17	3.09 ± 0.06	100,000–160,000	[1,6]

Notes: References to age estimates: [1] Jenniskens (2006); [2] Jenniskens et al. (1998); [3] Hamid, 1954; [4] Jones & Brown (1998); [5] Harris et al., (1995); [6] Jenniskens (2023).

formation among short-period comets (Jenniskens, 2006).

Here, we will first discuss the cases of Perseids and Taurids, from which Earth samples different parts of the stream complex, and then expand on the population of long-period comets, which are least affected by resonances and close encounters with the main planets.

4.1. The Perseid shower components of comet 109P/swift-Tuttle

Perseid shower parent comet 109P/Swift-Tuttle has a large ~ 26 km nucleus and passes relatively close to Earth's orbit. Due to its large size, the comet orbit is unaffected by non-gravitational forces and its past orbit can be traced comparatively reliably (Yau et al., 1993). It is not known, however, what was the activity of the comet in the past.

Halley-type showers such as the Perseids of comet 109P/Swift-Tuttle move in orbits that resonate with the orbit of Jupiter, or they librate

about such resonances, so that the stream is relatively little perturbed from close encounters with Jupiter itself. That can also limit the rate of dispersion. The number of meteoroids in these confined configurations can build up over time, making these some of the richest meteoroid streams. The comet orbit itself may have evolved away from the part of the stream that is now encountered at Earth, but that is not the case for the Perseids.

Recent comet ejecta of 109P/Swift-Tuttle encountered at Earth tend to be rich in bright meteors, with dust thought to have ejected during the previous 1862 CE return having a low magnitude distribution index of $\chi \sim 1.72 \pm 0.07$ (e.g., Brown and Jones, 1998; Jenniskens, 2006, 2023). Some other dust trail encounters have also been identified (Table 3), but those identifications are uncertain because of the similarity in width to the Filament component. The measured magnitude distribution index is also uncertain due to the strong annual shower background.

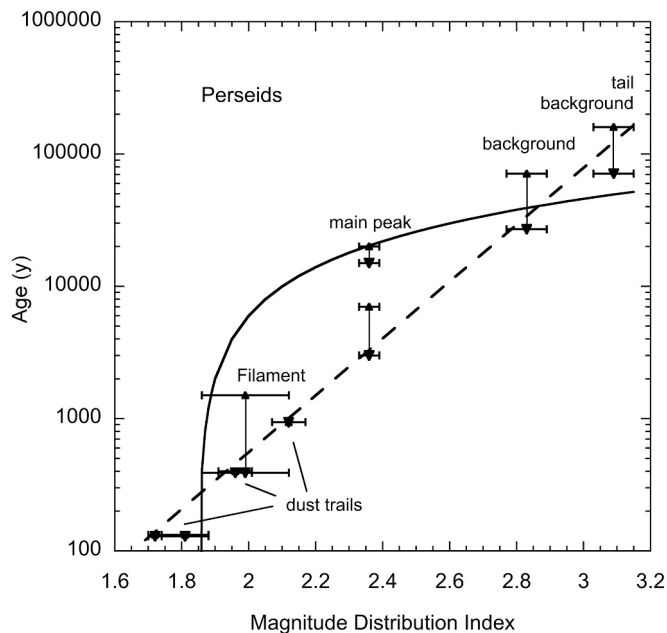


Fig. 21. The magnitude distribution index of Perseids for different age components. The solid line assumes that the magnitude distribution index increases proportional to age, while the dashed line shows a dependence proportional to the logarithm of age.

Other Perseid meteor shower outbursts appear to be accumulated dust from multiple returns forming what was called a “Filament” (Jenniskens et al., 1998). These also tend to have low magnitude distribution index. Measured values varied from $\chi \sim 1.86 \pm 0.14$ in 1991, 2.12 ± 0.15 in 1992, 2.02 ± 0.04 in 1993, and 1.9 ± 0.2 in 1994 (Jenniskens, 2006) (Table 3). The Filament has about twice the dispersion in node as the 1-revolution 1862 dust trail. The age is uncertain, presumably representing a number of comet orbits.

The peak of the annual meteor shower contains relatively more faint meteors ($\chi \sim 2.36 \pm 0.03$) and is significantly wider. The main peak is due to dust particles produced in the last 5000 years according to Harris et al. (1995), while Brown and Jones (1998) suggest the meteoroids accumulated over a 15,000–20,000 year period.

The Perseid main activity peak has a broad background component with an early onset in July. The Perseid maximum has $\sigma\Omega < \sigma\omega$, while

Table 4

As Table 3, for the Taurid Complex meteor shower components.

#	Component	q (AU)	i (°)	σi (°)	$\sigma\omega$ (°)	$\sigma\Omega$ (°)	χ	Source	Age(y)	Src
628	s-Taurids *	0.372	5.3	1.02	3.42	8.16	2.11 ± 0.12	2015 TX24	2,6-5200	[1]
17	Northern Taurids	0.360	2.9	1.32	5.31	18.0	2.72 ± 0.06	2P	10,500	[2]
173	Daytime β -Taurids	0.230	3.3	1.45	8.37	10.4	2.96 ± 0.73	2P	7–14,000	[2]
2	Southern Taurids	0.333	5.5	1.59	6.18	21.1	2.95 ± 0.13	2P	14,500	[2]
172	Daytime ζ -Perseids	0.330	5.5	1.41	8.31	9.64	3.13 ± 0.14	2P	16,000	[2]
624	xi-Arietids	0.337	5.6	1.16	2.60	1.87	2.93 ± 0.37	2011 UD	4–8000	[3]
625	lambda-Taurids	0.464	5.0	1.02	4.03	2.74	2.36 ± 0.10	2005 UR	5200	[3]
626	lambda-Cetids	0.359	5.4	1.13	4.47	2.57	2.67 ± 0.10	2007 RU17	16,000	[3]
627	nu-Piscids	0.316	5.3	1.53	3.11	7.62	2.86 ± 0.18	2010 RV3	4000	[3]
629	A2 Taurids	0.396	2.7	1.03	2.52	1.65	2.11 ± 0.05	2014 NK52		[3]
630	tau-Arietids	0.336	3.0	1.05	1.79	1.29	2.11 ± 0.05	2005 TF50	2–5200	[3]
631	delta-Arietids	0.296	3.1	1.21	1.64	2.01	2.44 ± 0.16	2P	1–2000	[3]
632	November eta-Taurids	0.357	2.8	1.07	1.55	1.22	2.09 ± 0.14	2004 TG10	4–8000	[3]
633	p-Taurids	0.419	2.6	1.07	2.71	2.26	2.38 ± 0.02	2012 UR158		[3]
634	tau-Taurids	0.426	2.6	1.11	1.35	1.82	2.37 ± 0.08	2003 UL3	16,000	[3]
635	A1-Taurids	0.374	2.7	1.01	1.52	1.47	2.28 ± 0.09	2019 UN12	8000	[3]
637	f-Taurids	0.401	5.3	1.08	3.83	2.32	2.69 ± 0.14	2010 TU149	8–16,000	[3]
25	North. Oct. δ -Arietids	0.316	3.6	1.29	5.37	4.94	2.46 ± 0.05			[3]
28	South. Oct. δ -Arietids	0.285	5.8	1.42	3.15	4.12	2.94 ± 0.11		8000	[3]
286	omega-Taurids	0.515	5.2	0.92	5.07	1.48	2.16 ± 0.02			[3]

Notes: *) Breakup of 2015 TX24 from 2P; [1] Egal et al. (2021); [2] Egal A., et al. (2022a,b); [3] Tomko and Neslusan (2019).

this background has $\sigma\Omega \sim \sigma\omega$. The dust has a magnitude distribution index of $\chi = 2.83 \pm 0.06$. Harris et al. (1995) showed that this component is now understood to be debris located just outside Earth’s orbit ejected in the past, when precession of the node had not yet advanced into August. Dust in the longest period orbits took more time to return and the node precessed less quickly over the years (Jenniskens, 2006). From the calculated rate of precession of the comet orbit, at the moment $+0.0002029^\circ/\text{year}$ (Yau et al., 1993), the age of dust at 130° solar longitude is $\leq 47,000$ y, at $125^\circ \leq 71,000$ y. An early estimate put the age of the extended stream at about 40,000 y (Hamid, 1954).

The comet was last near Jupiter’s orbit $\sim 160,000$ y ago, when it may have been captured (Harris et al., 1995). The magnitude distribution index is $\chi = 3.09 \pm 0.06$ for $\lambda_0 = 117.5^\circ$, when the meteoroids were ejected at least 108,000 y ago.

All data combined (Table 3) suggests that the magnitude distribution index ($\chi = N(m + 1)/N(m)$) changes logarithmically with age (Fig. 21, dashed line):

$$\text{Age (y)} = 0.028 \exp(4.95\chi) \quad (13)$$

On the other hand, if we accept the Brown and Jones (1998) age of the main peak as opposed to that of Harris et al. (1995), then a linear fit to the age would also satisfy the data. The solid line in Fig. 21 is the relationship (with q the perihelion distance, see below):

$$\text{Age (y)} = 40,000\sqrt{q} (\chi - 1.85) \quad (14)$$

These Perseids range from +4 to -5 magnitude, corresponding to masses of about 0.0008 to 3 g, centered on 0.03 g (+0 magnitude). Because the magnitude distribution index is increasing in time, that means that the 0.03-g grains disappear faster than small 0.0008 g grains. If the relationship is logarithmic, remaining dust grains would need to live exponentially longer over time.

4.2. The Taurid complex of comet 2P/Encke

There are not many other meteor showers that have components of a variety of ages for which the ages were estimated. The most interesting short-period case is that of the Taurid Complex showers of comet 2P/Encke. The Complex consists of night-time northern and southern branches for the stream on the way towards the Sun (in anhelion source), and day-time northern and southern branches on the way out (in helion source). The night-time branches have been studied best with video cameras and there appear to be a number of distinct components that cause the radiant of the stream to jump from component to

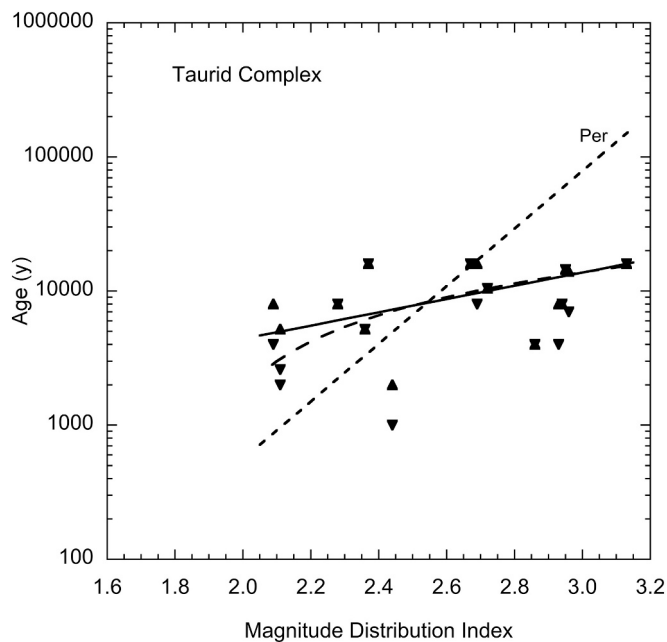


Fig. 22. The magnitude distribution index of Taurid Complex showers for different age components. The solid line is an exponential fit to the data, the dashed line a linear fit. The dashed line labeled “Per” is the dashed line in Fig. 21.

component (Jenniskens et al., 2016a; Jenniskens, 2023). These components have individual parent objects associated with them, all with orbits that could make these fragments of comet 2P/Encke. Table 4 gives an overview.

2P/Encke moves in an orbit decoupled from Jupiter. Showers in the Taurid Complex evolve gradually by rotating the nodal line over a timescale of about 5000 y (Hamid, 1954). The streams are only observed when one of the nodes evolves into Earth’s path. In addition, the longitude of perihelion precesses, which changes the node over time. If showers are relatively short-lived, the Complex as a whole will be distributed as much as the parent bodies are.

The case of the Taurids was discussed in Jenniskens et al. (2016a). The key observation was that the Taurids do not strictly have twin showers. While the Northern and Southern Taurids are considered twin streams, they do not have the same nodal distribution as would have

Table 5

As Table 3, for the modeled long-period comet meteor showers.

#	Component	q (AU)	i (°)	σ_i (°)	σ_ω (°)	σ_Ω (°)	χ	Source	Age (y)
6	April Lyrids	0.920	79.4	2.17	3.92	1.17	2.13 ± 0.03	C/1861 G1	29,000
130	delta-Mensids	0.963	59.6	2.51	2.96	5.88	2.70 ± 0.06	C/1804 E1	51,000
145	eta-Lyrids	1.000	74.4	1.66	1.60	1.53	2.70 ± 0.04	C/1983 H1	49,000
206	Aurigids	0.677	148.0	1.45	5.74	7.43	2.79 ± 0.02	C/1911 N1	78,000
331	alpha-Hydrids	0.314	61.5	4.67	8.52	10.54	2.94 ± 0.07		65,000
410	delta-Piscids	0.920	178.3	0.86	3.49	2.15	3.12 ± 0.14		50,000
427	February eta-Draconids	0.971	55.4	1.53	2.02	0.62	2.45 ± 0.20		17,000
458	June epsilon-Cygnids	0.920	95.7	1.33	2.46	0.62	2.13 ± 0.05		32,000
510	June rho-Cygnids	1.007	88.5	1.50	1.87	0.86	1.99 ± 0.05		40,000
517	April lambda-Ophiuchids	0.303	110.8	1.62	4.06	4.09	2.52 ± 0.28		41,000
519	beta-Aquariids	0.919	156.0	1.24	3.25	5.63	3.42 ± 0.15		40,000
569	omicron-Hydrids	0.680	114.3	3.85	8.24	7.41	4.20 ± 0.36		140,000
571	26-Bootids	0.497	83.1	0.98	2.63	1.55	1.84 ± 0.11		27,000
647	beta-Comae Berenicids	0.640	22.1	1.98	3.79	9.83	2.35 ± 0.09		10,000
681	omicron-Aquariids	0.363	161.9	3.22	6.71	6.78	3.88 ± 0.17		35,000
798	August Caelids	0.994	83.6	7.01	10.79	11.47	3.33 ± 0.14		200,000
822	Nu Taurids	0.562	135.9	1.93	5.21	10.77	3.48 ± 0.27		60,000
828	31 Pegasids	0.247	49.2	2.41	2.18	4.76	2.70 ± 0.45		27,000
839	phi-Serpentids	0.429	69.0	1.11	1.62	0.73	1.66 ± 0.55		15,000
1047	gamma-Crucids	0.929	102.8	1.48	3.44	1.54	2.93 ± 0.19		56,000

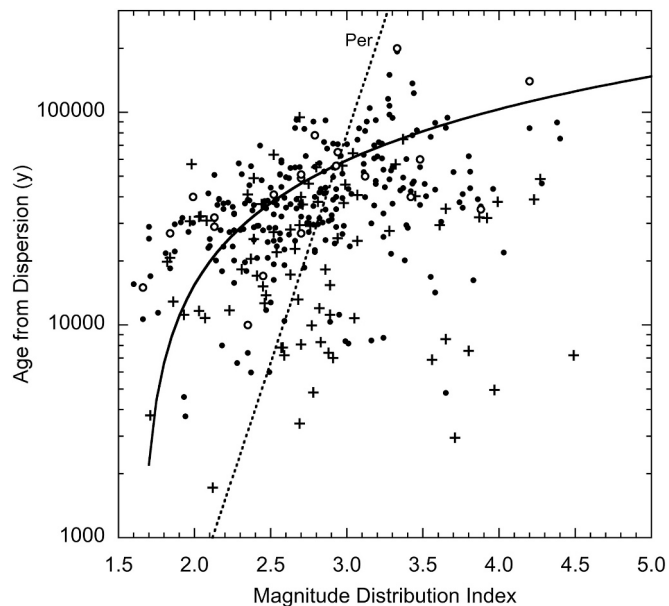


Fig. 23. The shower age derived from dispersions as a function of the magnitude distribution index for all long-period comets. Ages derived from modeling are shown as open circles, while the ages derived from a generalized equation proportional to dispersion are shown for long-period comets (●) and Mellish-type comets (+). The solid line has the magnitude distribution index increase proportional to age, while the dashed line labeled “Per” is the exponential-fit dashed line of Fig. 21.

been expected from rotation of the nodal line. Individual components of the Southern Taurids do not have a counter part in the Northern Taurids.

That is most obvious for shower 628, the s-Taurids, which cause meteor outbursts every 3 years from the Southern Taurid component, with no similar component in the Northern Taurids, likely due to dust trapped in the 7:2 mean motion resonance (Asher and Izumi, 1998; Spurny et al., 2017). The likely parent body is asteroid 2015 TX₂₄, which broke from comet 2P/Encke about 5200 years ago (Devillepoix et al., 2019). The stream may have that same age if most of the dust is from that breakup, or half that value, if ongoing activity from 2015 TX₂₄ is responsible. Note that for this low-inclined Jupiter-family shower, there is a significant dispersion in both the node (Ω) and the argument of perihelion (ω), despite the young age of the stream, but the longitude of perihelion ($\omega + \Omega$) is nearly constant.

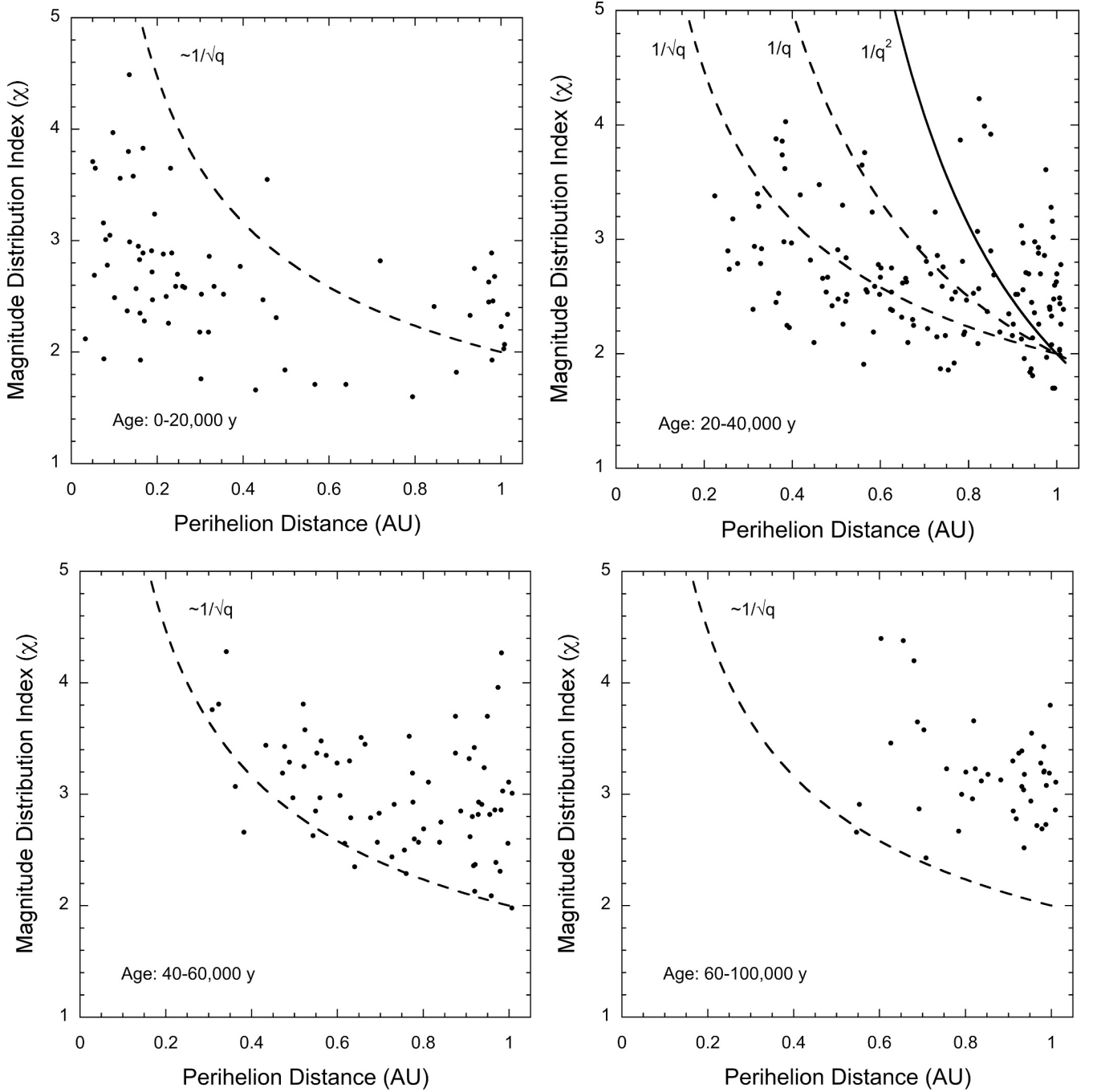


Fig. 24. A – Magnitude distribution index as a function of perihelion distance only for young showers of 0–20,000 y age. The dashed line is proportional to $1/\sqrt{q}$. B – As Fig. 24A, for showers of 20–40,000 y age. The lower dashed line is that of Fig. 24A. Two other lines show the steeper dependence expected of $1/q$ and $1/q^2$. C – As Fig. 24A, for old showers of 40–60,000 y age. The dashed line is that of Fig. 24A. D – As Fig. 24A, for the oldest showers of 60–100,000 y age. The dashed line is that of Fig. 24A.

The evolution of other Taurid shower component streams was recently modeled by Tomko and Neslusan (2019). Different filaments were found to cross Earth’s orbit that roughly correspond to the observed components. Table 4 gives the corresponding ages for each component.

In this case, the past orbit of the parent body is critical. Recently, an alternative explanation was found for why the broad Northern and Southern Taurids as a whole do not have matching distributions in node. Egal et al. (2021, 2022a, 2022b) found that the nodal distribution could be reproduced if comet 2P/Encke itself spent some time in the 7:2 mean-motion resonance with Jupiter in the recent past. This model suggested

that some of the observed Taurid stream components are due to planetary perturbations on ejecta by 2P/Encke itself. From this model, the nominal ejection age of the dust contributing to the meteor shower seen today was given (Table 4).

Taken together, the Taurid Complex shows an increase of magnitude distribution index with age as shown in Fig. 22. Again, the data suggest a relationship proportional to the log of age, in this case best fit by a relation:

$$\text{Age (y)} = 450 \exp(1.14 \chi) \tag{15}$$

This relation is much less steep than found for the Perseids (dashed

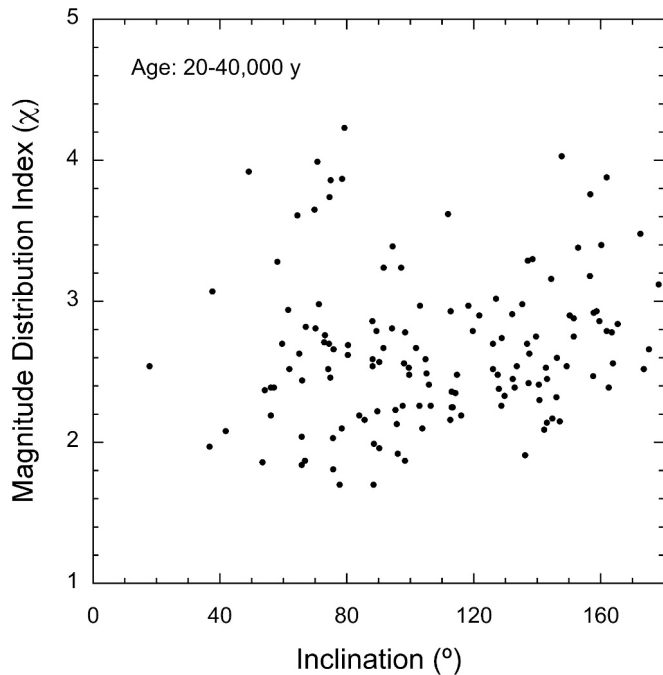


Fig. 25. Measured magnitude size distribution as a function of inclination, for all showers with calculated ages from dispersions in the range 20,000 to 40,000 years.

line). However, a similarly good relation linear fit would be the dashed line in Fig. 22, which is only a factor of two different than found for the Perseids (Eq. 14):

$$\text{Age (y)} = 20,000\sqrt{q}(\chi - 1.85) \quad (16)$$

4.3. Long-period comet showers

The dispersion of the 247 long-period comet meteoroid streams in our sample is expected to gradually increase over time. We fitted the observed dispersion of inclination, argument of perihelion and node to the calculated ages of the long-period dynamical models (Table 5), taking into account the apparent increase of dispersion with $1/q$ shown in Fig. 12, and found a relationship:

$$\text{Age (y)} \sim 12,000 q \sigma_{\text{tot}} \quad (17)$$

Fig. 23 plots the age estimates based on the observed dispersion as a function of the measured magnitude distribution index. All long-period comet showers (\bullet) and Mellish-type comets ($+$) with age estimates according to Eq. 17 are shown, those that were modeled and of which the dispersion was matched to the observed dispersions are shown as open circles.

Again, we identified an empirical age based on the magnitude distribution index χ . The Perseid-derived relationship (dashed line) is not a good fit to the distribution. We assume a common starting point, which may or may not be true for all streams, and set it at the lowest measured values of $\chi = 1.85$, the value where there is an equal combined cross sectional area per magnitude bin:

$$\text{Age (y)} = 40,000 (\pm 8000)\sqrt{q}(\chi - 1.85) \quad (18)$$

This is the same relationship as Eq. 14 for the Perseids. We then noticed that a similar Age- σ relationship holds true for Mellish-type showers ($0.65 < T_J < 2$, $< 90^\circ$). These relations differ in having a \sqrt{q} dependence (see below), rather than q dependence as in Jenniskens (2023), and there being no longer a significant difference between Mellish type showers and long-period comet showers.

After using Eq. 17 with dispersion to define narrow ranges of age, the

magnitude distribution index of those showers is plotted as a function of perihelion distance (Fig. 24) and inclination (Fig. 25) for all long-period comet and Mellish type showers. With each bin of age, the magnitude distribution index increases (Fig. 24).

In each age bin, the measured magnitude distribution index depends on perihelion distance, according to $1/\sqrt{q}$ (Fig. 24), but only if we ignore a number of high- χ showers near $q \sim 1$ AU that appear to have dispersions that do not represent the full dispersion of the shower. Taken together, the power-law fit implies a lower exponent of ~ 0.16 – 0.22 .

There is no clear dependence on inclination (e.g., Fig. 25). A group of toroidal streams in prograde orbits appear not to belong in the 20–40,000 y age bracket, given that they have a high magnitude size distribution index. Perhaps the dispersion in Earth's path here underestimates the full dispersion of the stream due to the encounter geometry when $\omega \sim 0^\circ$ or 180° .

5. Discussion

5.1. Physical mechanisms of long-period comet stream dispersions

Numerical integrations of long period comet meteoroid streams that remain in Earth's path indicate that the dispersions of orbital elements i , ω and Ω of particles ejected from a single perihelion increase linearly in time, over a time interval between 10,000 and 120,000 years after ejection, following an initial brief exponential or power law inflation until the along-orbit spreading is complete.

The linear increase is due to random changes of the orbital elements in combination with the change in orbital periods of the particles over time starting from the initial comet orbital periods between 250 and 4000 years. Particles in short orbits are perturbed more than those in longer orbits. The particles that evolve to short ~ 120 – 250 y orbits are the most frequent to return to Earth.

Numerical simulations indicate that the dispersions of superpositions of ejecta from multiple perihelia also increase linearly with time, at similar rates. We surmise that there is a balance between loss and injection, with particles that are pumped to large periods being effectively lost to observation, and particles that drop to periods of under about 120 years being lost from the stream due to interaction with the inner solar system.

The orbital element dispersion growth of all elements increases fairly linearly with the orbital frequency (inverse of the period). The growth rate of the dispersion is generally larger for comets with lower perihelion, q . There is an additional change to the orbital elements due to precession/regression of the node that is also dependent on the orbital frequency. This contribution is less for higher inclined ($20^\circ < i < 160^\circ$) orbits.

The physical effects associated with this are discussed in Pilorz et al. (2023). First, the non-radial radiation forces are small for cm-sized ejecta over short time periods, so the dispersion growth is entirely due to gravitational effects for all practical purposes. There is a randomization due to perturbations as the various particles encounter the inner solar system at different epochs from each other, resulting in a rate of spread that is simply proportional to the number of orbits the particles have undergone.

Low inclined orbits have an increase in dispersion over time due to rotation of the nodal line, causing an azimuthal motion of the node, with particles in short orbits receiving many kicks and those in longer orbits being perturbed less. The rate of precession is effected by gravity acting over an orbit, hence also is inversely proportional to period.

The orbits with low q pass close to the Sun and experience perturbations due to the Sun's motion relative to the barycenter. These are in the form of a non-radial force with respect to the solar system barycenter, in which the torque should be expected to go generally as $1/q$.

Altogether, we then expect the stream to reach a steady state in which particles are lost from the stream (either in reality, for the short period particles, or effectively, for the long period ones) at the rate they

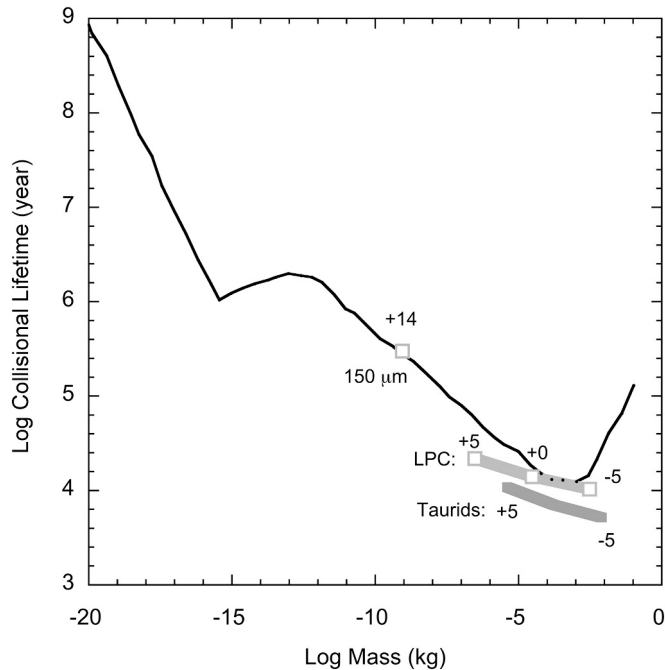


Fig. 26. Measured e-folding lifetime of meteoroids in long-period comet (LPC) and Taurid meteoroid streams (on a $^{10}\log$ scale) compared to the MEMS2 collisional model for meteoroids in the orbit of comet 55P/Tempel-Tuttle (Soja, 2016). The MEMS2 lifetimes for Taurids are a factor of 3 lower. Also shown is the lifetime of $150\ \mu\text{m}$ meteoroids at the peak of the mass influx curve according to Nesvorný et al. (2010).

are injected or larger. As long as this is true, the rate of dispersion growth of particles ejected together at a single perihelion governs the rate of dispersion growth of the stream as a whole. These effects accumulate over time in inverse proportion to the orbital period, and in strength as the inverse of the distance of perihelion.

5.2. Lifetime at different masses: How meteoroid streams evolve in magnitude distribution index

What is the mm- and cm-sized meteoroid lifetime under different orbital conditions? The relationship of magnitude versus age of Eq. 18 implies a difference in meteoroid lifetime for meteoroids of different mass and size in a given stream. Meteoroids of a given size can break by erosive effects, increasing bins of smaller size at the expense of the larger sizes, or by catastrophic disruptions where the meteoroids of given size are disrupted into small fragments with sizes outside of the observed range. In either mechanism, Eq. 18 translates to lifetimes of about 10,300 years for magnitude -5 meteors (mass ~ 3 g), 14,000 years for $+0$ magnitude meteors (~ 0.03 g), and 21,700 years for magnitude $+5$ meteors (mass ~ 0.0003 g). This is shown in Fig. 26.

5.3. Implications for the mechanisms that limit the lifetime of cm-sized meteoroids

The lifetimes for long-period comet streams for $q = 1$ AU (Fig. 26) match well to the lifetime of cm-sized dust particles in a 55P/Tempel-Tuttle orbit as calculated from the IMEM2 meteoroid environment models (Soja et al., 2016, 2019). Any discrepancy between observation and model is well within the factor of two or so uncertainty in our age scale for long-period comets, suggesting that these ages are at most $\sim 40\%$ too low. Within this uncertainty, the results offer independent confirmation that the assumed meteoroid lifetimes for cm-sized particles in models like IMEM2 are correct, but it does not give insight into what is the main contributor to limiting the lifetime.

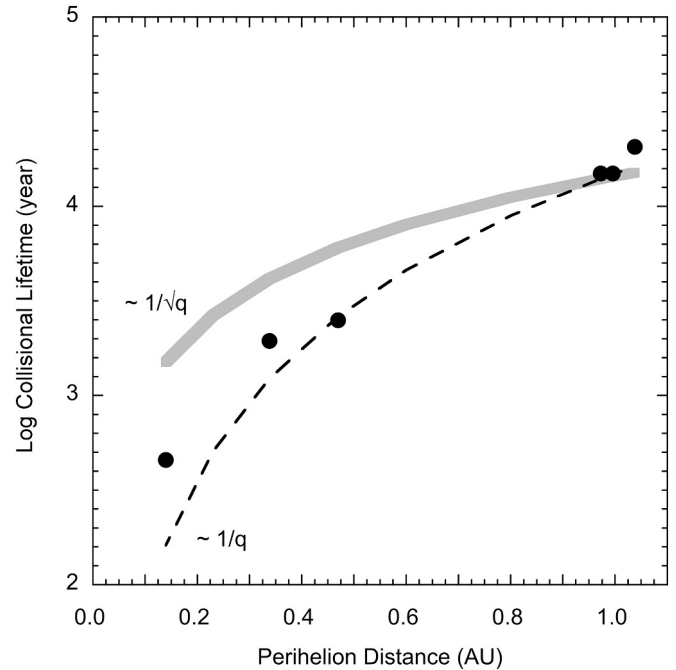


Fig. 27. Measured e-folding lifetime (on a $^{10}\log$ scale) as a function of perihelion distance. The gray line is the $1/\sqrt{q}$ dependency observed, while solid points are the collisional lifetime from the IMEM2 model of 0-magnitude meteors that move in the orbits calculated by Soja et al. (2016). The dashed line shows a $1/q$ dependence for reference.

Orbital period does not seem to influence the meteoroid lifetime significantly. The lifetime of short-period Taurid shower meteoroids are only a factor of two lower than those of long-period comet showers based on Eq. 17. The orbital period of observed long-period comet meteoroids are mostly in the range 20–200 years (Fig. 8A), while Taurids have an about 3.3-y period. This too is consistent with the lifetimes calculated by Soja et al. (2016, 2019), who found very similar lifetimes for Leonids from comet 55P/Tempel-Tuttle with a 33.2-y orbit, Quadrantids from 2003 EH₁ with a 5.5-y orbit, and Draconids from comet 21P/Giacobini-Zinner with a 6.5-y orbit, all having orbits with a range of inclinations but similar mean $q \sim 1$ AU perihelion distance over the lifetime considered (Fig. 26).

The IMEM2 model results presented in Soja et al. predict a lifetime decrease for orbits with lower perihelion distances as shown in Fig. 27. The Grün et al. (1985) model predicts a q^{-1} dependence for the minimum mass that collisionally destroys a target mass due to increase of impact speeds closer to the Sun. The q -dependency in results from the model appears to be less steep than the $1/q$ (adopted in Jenniskens (2023), shown as a dashed line), but not quite as shallow as the $1/\sqrt{q}$ found here in Fig. 24. The about $q^{-0.77}$ dependency that results from the IMEM2 model may reflect the heliocentric dependence on dust density used in the model, which is consistent with results from radar-based orbital element surveys (e.g., Galligan and Baggaley, 2002).

If that heliocentric distribution of dust density in the IMEM2 model is correct, an $1/\sqrt{q}$ dependence would imply that the lifetime of cm-sized grains in the $q < 1.02$ AU range is not limited by collisions, but rather by properties proportional to temperature. The peak temperature (T) of meteoroids along their orbit is proportional to $T \sim 1/\sqrt{q}$, based on the Stefan-Boltzmann equation flux $\sim T^4$ and the fact that distance loss implies heat flux being proportional to $1/q^2$ (Poynting, 1904).

A dependence on temperature could mean that the meteoroid lifetime is limited by thermal stresses in the range $0.3 < q < 1.02$ AU, given that it is generally assumed that the temperature gradient in a meteoroid $\Delta T \sim T$ (Delbo et al., 2014). The effect of these processes appears to be removing both the fluffy and dense particles from the population over

time, but results in a faster removal of the fluffy material. The preferential loss of fluffy particles over dense particles of the same mass in Fig. 20 implies a different lifetime. Fluffy particles have lower thermal conductivity and can more easily set up thermal stresses. Moreover, they have higher grain cross-sections due to a lower density. Densities of long-period comet and Mellish-type showers have a median value of $\rho \sim 0.69 \text{ g/cm}^3$ for fluffy particles and $\rho \sim 2.06 \text{ g/cm}^3$ for dense particles (Jenniskens, 2023). This corresponds to fluffy particles having a diameter 44% larger and a surface area difference of a factor of 2.

Near the Sun ($q < 0.3 \text{ AU}$), the observed streams tend to be dominated by dense grains, poor or free in sodium (Borovicka et al., 2005; Jenniskens, 2023). Given that half of a cometary meteoroid is thought to consist of organic matter, it is likely that temperature plays a more direct role here. Around 0.3 AU, the grain temperature reaches 500 K, high enough to start sublimating some of the organic components that hold the mineral grains together. At $q = 0.2 \text{ AU}$, that temperature has risen to about 610 K, at which much of organic matter is lost. The 50% condensation temperature for Na is about 960 K (Li et al., 2020), suggesting that if grain orbits evolve q to below 0.08 AU, all sodium will soon be lost.

No showers are observed for streams with $q < 0.03\text{--}0.04 \text{ AU}$. At those distances, silicate materials sublime by the heat of the Sun. At 0.04 AU, the grain temperature reached is $\sim 1400 \text{ K}$, at which time mineral components will start to sublime and the grains are lost. The 50% condensation temperature for the core elements Mg and Fe is about 1336 and 1335 K, respectively (Li et al., 2020).

5.4. Implications for understanding other parts of the mass influx curve

If the lifetime of cm-sized meteoroids with $q < 1.02 \text{ AU}$ is dominated by processes other than collisions, how can we understand the shape of the mass influx curve at Earth (Fig. 1)? Dynamical models of the zodiacal cloud need a lifetime of about 300,000 years for 100 μm meteoroids at the peak of the mass influx curve to explain the zodiacal infrared emission distribution (Nesvorný et al., 2010). That value compares well to the lifetime adopted in the MEMS2 model (Fig. 26). In the Grün et al. collision model, the longer lifetimes for smaller sizes reflect a relative lower abundance of small impactor particles. On the other hand, smaller grains are less susceptible to thermal stresses because it is harder to set up a temperature gradient across the grain.

Temperature will affect the lifetime of small grains on orbits with $q < 0.3 \text{ AU}$ in a different way than for large cm-sized grains. Their lifetime is relatively longer because small grains are more efficient in radiating heat and more efficient at scattering light. Moreover, as they warm, their structure and chemical composition will change, which will also change their optical properties, increasing albedo with the loss of organics, resulting in less absorption of sunlight.

The longer lifetimes for particles larger than 1-cm may have a non-collision rate related reason also. The upward curvature in the collisional lifetime model for meteors brighter than -5 magnitude may not be due to fewer suitably-sized impactors at larger sizes, but rather the changing composition of the meteoroids, from being dominated by cometary matter for meteors fainter than -5 magnitude to being dominated by asteroidal matter for meteors brighter than -15 magnitude. While asteroidal objects of 0.1 to 1-m in size are known to exist and survive for up to 100 million years, based on meteorites that fall on the ground, there are few large cometary boulders in the sporadic population and most are associated with the Leonid shower (Ozerov et al., 2014). Larger objects in the Taurid complex often belong to the s-Taurids, a relatively young shower component (Devillepoix et al., 2019). The bright Leonid fireballs, too, may be part of such a ‘‘Filament’’ component, a young stream.

6. Conclusions

The dispersion of meteoroid streams from long-period comets with

perihelion distances $0.3 < q < 1.02 \text{ AU}$ increases in time and at a faster rate for streams with shorter perihelion distances, proportional to $1/q$. When long period comet showers age, their magnitude size distribution increases, the fraction of dense materials increases, and their mean densities increase. Low-density materials are lost before high density materials.

Showers with shorter perihelion distances $q < 0.2 \text{ AU}$, and a fraction of $q < 0.3 \text{ AU}$, appear to be mostly young. The meteoroids in these young streams are already highly modified, with a high fraction of dense materials, poor or free in sodium, and predominantly high lightcurve shape parameter F-values. This includes meteoroid streams on both short period and long period orbits.

Based on literature data on the age of stream components, the Taurids of comet 2P/Encke (3.3-y orbit, approaching the Sun to $\sim 0.34 \text{ AU}$) show a linear increase of χ with age, while the Perseids of comet 109P/Swift-Tuttle (133-y orbit, approaching the Sun to $\sim 0.96 \text{ AU}$) hint at the same, depending on the correctness of the various proposed age estimates.

Based on new dynamical modeling, we derived age estimates for long-period comet showers based on their observed dispersions. Modeled dispersions increase more or less linearly with age for ages of about 10,000 to 120,000 years, after an initial rapid increase when grains first spread along the orbit. Perihelion distance does not change much over time, but low-inclination showers show strong precession in the form of a rotation of the nodal line, so they remain in Earth’s path only for a short period of time. We confirm that low perihelion distance streams spread faster, proportional to $1/q$. Taking this into account, we again find a linear increase of χ with age, at a rate similar to that found for the Perseids, and only a factor of two slower than that found for the Taurids.

While the lifetime of grains is calculated correctly in current zodiacal cloud models, to within a factor of two, the reason for those lifetimes is not due to grain-grain collisions. When restricting the sample of observed showers in narrow groups of age (based on dispersion), we find that in each age group the value of χ increases towards smaller values of q . The magnitude distribution index is proportional to $1/\sqrt{q}$. This shallow dependence on perihelion distance is less steep than in current meteoroid environment models that assume that the meteoroid lifetime is limited by collisions.

Instead, our $1/\sqrt{q}$ dependence on perihelion distance suggests that the meteoroid lifetime of grains that move in orbits with $0.3 < q < 1.02 \text{ AU}$ is limited by the peak grain temperature along the orbit. This is possible if that lifetime is limited by thermal stresses. For perihelion distances $q < 0.3 \text{ AU}$, temperature may be a more direct factor in that sublimation of organic compounds can limit the lifetime of the grains. For $q < 0.08 \text{ AU}$, minerals containing sodium are lost from the grains and for $q < 0.04 \text{ AU}$ the core minerals sublime. No meteoroid streams are observed with $q < 0.03 \text{ AU}$.

We conclude that processes other than grain-grain collisions are responsible for the loss of cm-sized grains from meteoroid streams and the zodiacal cloud for particles on orbits with $q < 1.02 \text{ AU}$.

Funding

This research was performed as part of NASA’s Solar System Workings grant 80NSSC19K0563 and Emerging Worlds grant NNH18ZDA001N. Support for the development and operation of CAMS over the years was provided by earlier NASA grants and individual networks are supported by local grants, notably CAMS Turkey by TUBITAK (Project code MFAG/113F035). This work is supported by NASA under Contract NNM10AA11C issued through the New Frontiers Program.

CRedit authorship contribution statement

Peter Jenniskens: Writing – original draft, Visualization,

Supervision, Resources, Project administration, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Stuart Pilorz**: Writing – original draft, Software, Methodology, Investigation. **Peter S. Gural**: Writing – review & editing, Software, Methodology, Data curation. **Dave Samuels**: Writing – review & editing, Software, Methodology, Data curation. **Steve Rau**: Writing – review & editing, Software, Methodology, Data curation. **Timothy M.C. Abbott**: Writing – review & editing, Data curation. **Jim Albers**: Writing – review & editing, Data curation. **Scott Austin**: Writing – review & editing, Data curation. **Dan Avner**: Writing – review & editing, Data curation. **Jack W. Baggaley**: Writing – review & editing, Data curation. **Tim Beck**: Writing – review & editing, Data curation. **Solvay Blomquist**: Writing – review & editing, Data curation. **Mustafa Boyukata**: Writing – review & editing, Data curation. **Martin Breukers**: Writing – review & editing, Data curation. **Walt Cooney**: Writing – review & editing, Data curation. **Tim Cooper**: Writing – review & editing, Data curation. **Marcelo De Cicco**: Writing – review & editing, Data curation. **Hadrien Devillepoix**: Writing – review & editing, Data curation. **Eric Eglund**: Writing – review & editing, Data curation. **Elize Fahl**: Writing – review & editing, Data curation. **Megan Gialluca**: Writing – review & editing, Data curation. **Bryant Grigsby**: Writing – review & editing, Data curation. **Toni Hanke**: Writing – review & editing, Data curation. **Barbara Harris**: Writing – review & editing, Data curation. **Steve Heathcote**: Writing – review & editing, Data curation. **Samantha Hemmelgarn**: Writing – review & editing, Data curation. **Andy Howell**: Writing – review & editing, Data curation. **Emmanuel Jehin**: Writing – review & editing, Data curation. **Carl Johannink**: Writing – review & editing, Data curation. **Luke Juneau**: Writing – review & editing, Data curation. **Erika Kisvarsanyi**: Writing – review & editing, Data curation. **Philip Mey**: Writing – review & editing, Data curation. **Nick Moskovitz**: Writing – review & editing, Data curation. **Mohammad Odeh**: Writing – review & editing, Data curation. **Brian Rachford**: Writing – review & editing, Data curation. **David Rollinson**: Writing – review & editing, Data curation. **James M. Scott**: Writing – review & editing, Data curation. **Martin C. Towner**: Writing – review & editing, Data curation. **Ozan Unsalan**: Writing – review & editing, Data curation. **Rynault van Wyk**: Writing – review & editing, Data curation. **Jeff Wood**: Writing – review & editing, Data curation. **James D. Wray**: Writing – review & editing, Software. **Dante S. Lauretta**: Writing – review & editing, Funding acquisition.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

The meteoroid stream orbital elements and dispersions, their size distribution index, lightcurve shape parameters, densities and fraction of dense materials were published in [Jenniskens \(2023\)](#) and will be made available in digital form through the NASA/PDS node for Small Solar System Bodies. That node will also contain data on a number of long-period comet meteoroid stream models generated as part of this study.

Acknowledgements

We thank Matt Tiscareno of the SETI Institute for the initial setup of the PINTEM software and Sean Hsu of LASP/University of Colorado for helpful discussions. We thank the CAMS station operators for building and maintaining the global CAMS camera networks and the SETI Institute for program management and maintaining the IT environment for data processing and reporting.

References

- Abedin, A., Spurny, P., Wiegert, P., Pokorný, P., Borovicka, J., Brown, P., 2015. On the age and formation mechanism of the core of the Quadrantid meteoroid stream. *Icarus* 261, 100–117.
- Acton, C., Bachman, N., Semenov, B., Wright, E., 2017. A look toward the future in the handling of space science mission geometry. *Planet. Space Sci.* 150, 9–12.
- Adreic, Z., Segon, D., 2010. The first year of Croatian meteor network. In: Kaniansky, S., Zimnikoval, P. (Eds.), *Proceedings of the International Meteor Conference*, Sachticka, Slovakia, 18-21 Sep. 2008. International Meteor Organization, Mechelen, pp. 16–23.
- Asher, D.J., Izumi, K., 1998. Meteor observations in Japan: new implications for a Taurid meteoroid swarm. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 297, 23–27.
- Bardyn, A., Baklouti, D., Cottin, H., Fray, N., Briois, C., Paquette, J., Stenzel, O., Engrand, C., Fischer, H., Hornung, K., Isnard, R., Langevin, Y., Lehto, H., Le Roy, L., Ligier, N., Merouane, S., Modica, P., Orthous-Daunay, F.R., Rynö, J., Schulz, R., Silén, J., Thirkell, L., Varnuza, K., Zaprudin, B., Kissel, J., Hilchenbach, M., 2017. Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta. *MNRAS* 469, S712–S722.
- Beech, M., Murray, I.S., 2003. Leonid meteor light-curve synthesis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 345, 696–704.
- Bentley, M.S., Schmied, R., Mannel, T., Torkar, K., Jeszensky, H., Romstedt, J., Levasseur-Regourd, A.C., Weber, I., Jessberger, E.K., Ehrenfreund, P., Koerberl, C., Havens, O., 2016. Aggregate dust particles at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Nature* 537, 73–75.
- Borovicka, J., Koteň, P., Spurny, P., Bocek, J., Stork, R., 2005. A survey of meteor spectra and orbits: evidence for three populations of Na-free meteoroids. *Icarus* 174, 15–30.
- Borovicka, J., Spurny, P., Koteň, P., 2008. Atmospheric deceleration and light curves of Draconid meteors and implications for the structure of cometary dust. *Astron. Astrophys.* 473, 661–672.
- Brown, P., Jones, J., 1998. Simulation of the formation and evolution of the Perseid meteoroid stream. *Icarus* 133, 36–68.
- Brown, P., Wong, D.K., Weryk, R.J., Wiegert, P., 2010. A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar. II: identification of minor showers using a 3D wavelet transform. *Icarus* 207, 66–81.
- Brownlee, D.E., Tsou, P., Aléon, J., et al., 2006. Comet 82P/Wild 2 under a microscope. *Science* 314, 1711–1716.
- Buccongello, N., Brown, P.G., Vida, D., 2023. A physical survey of meteoroid streams: Comparing cometary reservoirs. In: *ACM 2023, LPI Contrib. No. 2851*, Abstract 2464.
- Buccongello, N., Brown, P.G., Vida, D., Pinhas, A., 2024. A physical survey of meteoroid streams: comparing cometary reservoirs. *Icarus* 410 article id.115907.
- Ceplecha, Z., McCrosky, R.E., 1976. Fireball end heights: a diagnostic for the structure of meteoric material. *J. Geophys. Res.* 81, 6257–6275.
- Ceplecha, Z., Borovicka, J., Graham, E.W., Revelle, D.O., Hawkes, R.L., Porubcan, V., Simek, M., 1998. Meteor phenomena and bodies. *Space Sci. Rev.* 84, 327–471.
- Chesley, S.R., French, A.S., Davis, A.B., Jacobson, R.A., Brozovic, M., Farnocchia, D., et al., 2020. Trajectory and estimation for particles observed in the vicinity of (101955) Bennu. *JGR Planets* 125 article id. e2019JE006363.
- Crovisier, J., 1997. Infrared observations of volatile molecules in comet Hale-Bopp. *Earth Moon Planets* 79, 125–143.
- Curd, W., Keller, H.U., 1990. Large dust particles along the Giotto trajectory. *Icarus* 86, 305–313.
- Delbo, M., Libourel, G., Wilkerson, J., Murdoch, N., Michel, P., Ramesh, K.T., Ganino, C., Verati, C., Marchi, S., 2014. *Nature* 508, 233–237.
- Devillepoix, H.A.R., Bland, P.A., Jenniskens, P., Samsom, E.K., Towner, M.C., Cupak, M., Howie, R.M., Hartig, B.A.D., Jansen-Sturgeon, T., Paxman, J., 2019. Taurid stream #628: a reservoir of large cometary impactors. *Planetary Science Journal* 2, 223–236.
- Divine, N., 1993. Five populations of interplanetary meteoroids. *J. Geophys. Res. Planets* 98, 17029–17048.
- Egal, A., Wiegert, P., Brown, P.G., Spurny, P., Borovicka, J., Valsecchi, G.B., 2021. A dynamical analysis of the Taurid complex: evidence for past orbital convergences. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 507, 2568–2591.
- Egal, A., Wiegert, P., Brown, P.G., 2022a. A proposed alternative dynamical history for 2P/Encke that explains the Taurid meteoroid complex. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 515, 2800–2821.
- Egal, A., Brown, P.G., Wiegert, P., Kipreos, Y., 2022b. An observational synthesis of the Taurid meteor complex. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 512, 2318–2336.
- Everhart, E., 2014. An efficient integrator that uses gauss-Radau spacings. In: Carusi, A., Valsecchi, G.B. (Eds.), *Dynamics of comets: Their origin and evolution*. Proceedings of IAU Colloq. 83, held in Rome, Italy, June 11–15, 1984, 115. Reidel, Astrophysics and Space Scienc Library, Dordrecht, pp. 185–202.
- Fienga, A., Manche, H., Laskar, J., Castineau, M., 2008. INPOP06: a new numerical planetary ephemeris. *Astronomy & Astrophysics* 477, 315–327.
- Flynn, G.J., 2001. Atmospheric entry heating of interplanetary dust. In: Peucker-Ehrenbrink, B., Schmitz, B. (Eds.), *Accretion of Extraterrestrial Matter throughout Earth's History*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 107–127.
- Fulle, M., Levasseur-Regourd, A.C., McBride, N., Hadamcik, E., 2000. In situ dust measurements from within the coma of 1P/Halley: first-order approximation with a dust dynamical model. *Astron. J.* 119, 1968–1977.
- Fulle, M., Della Corte, V., Rotundi, A., Green, S.F., Accolla, M., Colangeli, L., Ferrari, M., Ivanovski, S., Sordini, R., Zakharov, V., 2017. The dust-to-ices ratio in comets and Kuiper belt objects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469, S45–S49.

- Fulle, M., Bertini, I., Della, Corte V., Güttler, C., Ivanovski, S., La Forgnia, F., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A.C., Marzari, F., Moreno, F., Mottola, S., Naletto, G., Palumbo, P., Rinaldi, G., Rotundi, A., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P.L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Barucci, M.A., Bertaux, J.-L., Bodewits, D., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., De Cecco, M., Deller, J., Fornasier, S., Groussin, O., Gutiérrez, P.J., Hviid, H.S., Ip, W.H., Jorda, L., Keller, H.U., KNollenberg, J., Kramm, J.R., Kühr, E., Küppers, M., Lara, M.L., Lazzarin, M., López-Moreno, J.J., Shi, X., Thomas, N., Tubiana, C., 2018. The phase function and density of the dust observed at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 476, 2835–2839.
- Galligan, D.P., Baggaley, W.J., 2002. Determination of the spatial distribution of the solar system meteoroid population using AMOR. *ESA SP 500* (279–212).
- Gastineau, M., Laskar, J., Manche, H., Fienga, A., 2015. CALCEPH: planetary ephemeris files access code. *Astrophysics Source Code Library* (record asc:1505.001).
- Grün, E., Zook, H.A., Fechtig, H., Giese, R.H., 1985. Collisional balance of the meteoric complex. *Icarus* 62, 244–272.
- Hajduková, M., Neslusan, L., 2017. Regular and transitory showers of comet C/1979 Y1 (Bradfield). *Astronomy & Astrophysics* 605 id. A36, 13pp.
- Hajduková, M., Neslusan, L., 2019. Modeling of the meteoroid streams of comet C/1975 T2 and λ -Ursae Majorids. *Astronomy & Astrophysics* 627, A73–A80.
- Hajduková, M., Neslusan, L., 2021. Modeling the meteoroid streams of comet C/1861 G1 (Tatcher). *Planet. Space Sci.* 203 id. 105246.
- Hajduková, M., Rudawska, R., Kornos, L., Toth, J., 2015. April ρ Cygnids and comet C/1917 F1 Mellish. *Planetary & Space Science* 118, 28–34.
- Hamid, S.E., 1954. In: A. C. B. Lovell, *Meteor astronomy*. Clarendon Press, Oxford, p. 429.
- Haranas, I., Ragos, O., Gkigkitiz, I., Kotsireas, I., Martz, C., Van Middekoop, S., 2018. The Poynting-Robertson effect in the Newtonian potential with a Yukawa correction. *Astrophys. Space Sci.* 36 article id. 3, 11 pp.
- Harris, N.W., Yau, K.K.C., Hughes, D.W., 1995. The true extent of the nodal distribution of the Perseid meteoroid stream. *MNRAS* 273, 999–1015.
- Hawkins, G.S., 1963. The Harvard radio meteor project. *Smithsonian Contributions to Astrophysics* 7, 53–62.
- Jacchia, L.G., Verniani, F., Briggs, R.E., 1967. Analytics of the atmospheric trajectories of 413 precise photographic meteors. *Smiths. Contrib. Astrophys.* 10, 1–139.
- Jenniskens, P., 2006. *Meteor showers and their parent comets*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 790.
- Jenniskens, P., 2023. *Atlas of Earth's meteor showers*. Elsevier, Amsterdam, p. 838.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., 2016. CAMS verification of single-linked high-threshold D-criterion detected meteor showers. *Icarus* 266, 371–383.
- Jenniskens, P., Vaubaillon, J., 2010. Minor planet 2002 EX₁₂ (=169 P/NEAT) and the alpha Capricornid shower. *Astronomical Journal* 139, 1822–1830.
- Jenniskens, P., Betlem, H., de Lignie, M., ter Kuile, C., van Vliet, M.C.A., Van't Leven, J., Koop, M., Morales, E., Rice, T., 1998. On the unusual activity of the Perseid meteor shower (1989-96) and the dust trail of comet 109P/Swift-Tuttle. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (or do it systematically MNRAS in all of references) 301, 941–954.
- Jenniskens, P., de Kleer, K., Vaubaillon, J., Trigo-Rodriguez, J.M., Madiedo, J.M., Haas, R., ter Kuile, C.R., Miskotte, K., Vandeputte, M., Johannink, C., Bus, P., Van't Leven, J., Jobse, K., Koop, M., 2008. Leonids 2006 observations of the tail of trails: where is the comet fluff? *Icarus* 196, 171–183.
- Jenniskens, P., Vaubaillon, J., Atreya, P., Vachier, F., Barentsen, G., 2009. Leonid meteors 2009. In: Green, D.W.E. (Ed.), *Central Bureau Electronic Telegrams 2064*. IAU Central Bureau for Electronic Telegrams, Boston, 1 pp.
- Jenniskens, P., Gural, P.S., Dynneson, L., Grigsby, B.J., Newman, K.E., Borden, M., Koop, M., Holman, D., 2011. CAMS: cameras for Allsky meteor surveillance to establish minor meteor showers. *Icarus* 216, 40–61.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Gural, P.S., Albers, J., Haberman, B., Johnson, B., Morales, R., Grigsby, B.J., Samuels, D., Johannink, C., 2016a. CAMS newly detected meteor showers and the sporadic background. *Icarus* 266, 384–409.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Gural, P.S., Albers, J., Haberman, B., Johnson, B., Holman, D., Morales, R., Grigsby, B.J., Samuels, D., Johannink, C., 2016b. CAMS confirmation of previously reported meteor showers. *Icarus* 266, 355–370.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Albers, J., Gural, P.S., Haberman, B., Holman, D., Grigsby, B. J., Samuels, D., Johannink, C., 2016c. The established meteor showers as observed by CAMS. *Icarus* 266, 331–354.
- Jenniskens, P., Baggaley, J., Crumpton, I., Aldous, P., Pokorny, P., Janches, D., Gural, P. S., Samuels, D., Albers, J., Howell, A., Johannink, C., Breukers, M., Odeh, M., Moskovitz, N., Collison, J., Ganju, S., 2018. A survey of southern hemisphere meteor showers. *Planetary & Space Science* 154, 21–29.
- Jenniskens, P., Lauretta, D.S., Towner, M.C., Heathcote, S., Jehin, J., Hanke, T., Cooper, T., Baggaley, J.W., Howell, J.A., Johannink, C., Breukers, M., Odeh, M., Moskovitz, N., Juneau, L., Beck, T., De Cicco, M., Samuels, D., Rau, S., Albers, J., Gural, P.S., 2021. Meteor showers from known long period comets. *Icarus* 365 article id. 114469.
- Kanamori, T., 2009. A meteor shower catalog based on video observations in 2007–2008. *JIMO* 37, 55–62.
- Kondrat'eva, E.D., Reznikov, E.A., 1985. Comet Tempel-Tuttle and the Leonid meteor swarm. *Solar System Research* 19, 96–101.
- Kornos, L., Koukal, J., Piff, R., Toth, J., 2013. Database of meteoroid orbits from several European video networks. In: Gijssens, M., Roggemans, P. (Eds.), *Proceedings of the International Meteor Conference, La Palma, Canary Islands, Spain, 20-23 Sep. 2012*. International Meteor Organization, Mechelen, pp. 21–25.
- Koschny, D., Drolshagen, E., Drolshagen, S., Kretschmer, J., Ott, T., Drolshagen, G., Poppe, B., 2017. Flux densities of meteoroids derived from optical double-station observations. *Planet. Space Sci.* 143, 230–237.
- Koten, P., Capek, D., Spurny, P., Vaubaillon, J., Popek, M., Shrbeny, L., 2017. September epsilon Perseid cluster as a result of orbital fragmentation. *Astronomy & Astrophysics* 600 id. A74, 5pp.
- Koten, P., Capek, D., Midtskogen, S., Shrbeny, L., Spurny, P., Hankey, M., 2024. Properties, age, and origin of a huge meteor cluster observed over Scandinavia on 30 October 2022. *Astronomy & Astrophysics* 683 (A5), 10.
- Langevin, Y., Hilchenbach, M., Ligier, N., Merouane, S., Hornung, K., Engrand, C., Schulz, R., Kissel, J., Rynö, J., Eng, P., 2016. Typology of dust particles collected by the COSIMA mass spectrometer in the inner coma of 67P/Churyumov Gerasimenko. *Icarus* 271, 76–97.
- Lasue, J., Levasseur-Regourd, A.-C., Renard, J.-B., 2020. Zodiacal light observations and its link with cosmic dust: a review. *Planetary Space Science* 190, 104973.
- Lauretta, D.S., Hergenrother, C.W., Chesley, S.R., Leonard, J.M., Pelgrift, J.Y., Adam, C. D., Al, Asad M., Antreasian, P.G., Ballouz, R.-L., Becker, K.J., Bennett, C.A., Bos, B.J., Bottke, W.F., Brozovic, M., Campins, H., Connolly Jr., H.C., Daly, M.G., Davis, A.B., de León, J., DellaGiustina, D.N., Drouot, d'Aubigny C., Dworkin, J.P., Emery, J.P., Farnocchia, D., Glavin, D.P., Golish, D.R., Hartzell, C.M., Jacobson, R.A., Jawin, E.R., Jenniskens, P., Kidd, J.N., Lessac-Chenen, E.J., Li, Y.-Y., Libourel, G., Licandro, J., Lionis, A.J., Maleszewski, C.K., Manzoni, C., May, B., McCarthy, L., McMahon, J.W., Michel, P., Molaro, J.L., Nelson, D.S., Owen, J.W.M., Rizk, B., Roper, H.L., Rozitis, B., Sah, E.M., Scheeres, D.J., Seabrook, J.A., Selznick, S.H., Takahashi, Y., Thuillet, F., Tricarico, P., Vokrouhlicky, D., Wolner, C.W.V., 2019. OSIRIS-REX discovery of particle ejection from asteroid (101955) Bennu. *Science* 366, 3544–3546.
- Levasseur-Regourd, A.-C., Agarwal, J., Cottin, H., Engrand, C., Flynn, G., Fulle, M., Gombosi, T., Langevin, Y., Lasue, J., Mannel, T., Merouane, S., Poch, O., Thomas, N., Westphal, A., 2018. *Cometary dust*. *Space Science Review* 214 article id. 64, 56 pp.
- Li, M., Huang, S., Petaev, M., Zhu, Z., Steffen, J., 2020. Dust condensation in evolving discs and the composition of meteorites, planetesimals, and planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 495, 2543–2553.
- Love, S.G., Brownlee, D.E., 1993. A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science* 262, 550–553.
- McNaught, R.H., Asher, D.J., 1998. Leonid dust trails and meteor storms. *JIMO* 27, 85–102.
- Moorhead, A.V., Wiegert, P.A., Cooke, W.J., 2014. The meteoroid fluence at Mars due to comet C/2013 A1 (Siding Spring). *Icarus* 231, 13–21.
- Moorhead, A.V., Milbrandt, K., Kingery, A., 2023. A library of meteoroid environments encountered by spacecraft in the inner solar system. *Advances in Space Research* 72, 4582–4595.
- Neslusan, L., Hajduková, M., 2018. Meteor showers from comet C/1964 N1 (Ikeya). *Astronomy & Astrophysics* 616 id.A162, 8pp.
- Neslusan, L., Hajduková, M., 2019. Long-period comet C/1961 A1 (Ikeya), the probable parent body of π -Hydrids, δ -corvids, November α -Sextantids, and θ -Leonids. *Astronomy & Astrophysics* 631 id.A112, 10pp.
- Neslusan, L., Hajduková, M., 2020. The relationship between comet C/1853 G1 (Schweizer) and the γ -Aquilids and 52 Herculis meteor showers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 498, 1013–1022.
- Neslusan, L., Hajduková, M., 2021. Meteoroid stream of comet C/1961 T1 (Seki) and its relation to the December -Virginids and -Sagittariids. *Astronomical Journal* 162 id. 20, 9pp.
- Nesvorny, D., Jenniskens, P., Levison, H.F., Bottke, W.F., Vokrouhlicky, D., Gounelle, M., 2010. Cometary origin of the zodiacal cloud and carbonaceous micrometeorites. Implications for hot debris disks. *Astrophysical Journal* 713, 816–836.
- Nesvorny, D., Janches, D., Vokrouhlicky, D., Pokorny, P., Bottke, W.F., Jenniskens, P., 2011. Dynamical model for the zodiacal cloud and sporadic meteors. *ApJ* 743, 729–745.
- Ozerov, A., Smith, J.C., Dotsion, J.L., Longenbaugh, R.S., Morris, R.L., 2014. GOES GLM, biased bolides, and debiased distributions. *Icarus* 408 id. 115843.
- Piers, P.A., Hawkes, R.L., 1993. An unusual meteor cluster observed by image-intensified video. *JIMO* 21, 168–174.
- Pilorz, S., Jenniskens, P., Vaubaillon, J., 2023. Age-dependent orbital dispersion growth of long period comet meteor showers. In: *Asteroids, Comets, Meteors 2023*. Flagstaff, AZ, abstract id# 2484.
- Pokorny, P., Vokrouhlicky, D., Nesvorny, D., Campbell-Brown, M., Brown, P., 2014. Dynamical model for the toroidal sporadic meteors. *Astrophysical Journal* 789 article id. 25, 20 pp.
- Poynting, J.H., 1904. Radiation in the solar system: its effect on temperature and its pressure on small bodies. *Proceedings of the Royal Society* 72, 525–552.
- Reynolds, R.J., Madsen, G.J., Moseley, S.H., 2004. New measurements of the motion of the zodiacal dust. *The Astrophysical Journal* 612, 1206–1213.
- Rowan-Robinson, M., May, B., 2013. An improved model for the infrared emission from the zodiacal dust cloud: cometary, asteroidal and interstellar dust. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 429, 2894–2902.
- Rudawska, R., Jenniskens, P., 2014. New meteor showers identified in the CAMS and SonotaCo meteoroid orbit surveys. In: Jopek, T., Rietmeijer, F.J.M., Watanabe, J., Williams, I.P. (Eds.), *Meteoroids 2013, Proceedings of the Astronomical Conference Held at A.M. University, Poznan, Poland, Aug 26–30, 2013*. A. M. University Press, Poznan, pp. 217–224.
- Soja, R.H., Schwarzkopf, G.J., Sommer, M., Vaubaillon, J., Albin, T., Rodmann, J., Grün, E., Srama, R., 2016. Collisional lifetimes of meteoroids. In: Roggemans, A., Roggemans, P. (Eds.), *Proceedings of the International Meteor Conference, Emond, the Netherlands, 2-5 June 2016*, pp. 284–286.
- Soja, R.H., Grün, E., Strub, P., Sommer, M., Millinger, M., Vaubaillon, J., Alius, W., Camodeca, G., Hein, F., Laskar, J., Gastineau, M., Fienga, A., Schwarzkopf, G.J., Herzog, J., Gutche, K., Skuppin, N., Srama, R., 2019. IMEM2: a meteoroid

- environment model for the inner solar system. *Astron. Astrophys.* 628 id. A109, 13pp.
- Spurny, P., Borovicka, J., Mucke, H., Svoren, J., 2017. Discovery of the new branch of the Taurid meteoroid stream as a real source of potentially hazardous bodies. *Astronomy & Astrophysics* 605 id.A68, 25pp.
- Tomko, D., Neslusan, L., 2019. Meteoroid-stream complex originating from comet 2P/Encke. *Astronomy & Astrophysics* 623, A13–A37.
- Tsuchiya, C., Sato, M., Watanabe, J.-I., Moorhead, A.V., Moser, D.E., Brown, P.G., Cooke, W.J., 2017. Correction effect to the dispersion of radiant point in case of low velocity meteor showers. *Planetary Space Science* 143, 142–146.
- Vaubaillon, J., Colas, F., Jordan, L., 2005. A new method to predict meteor showers. I. Description of the model. *Astronomy & Astrophysics* 2005, 751–760.
- Vaubaillon, J., Loir, C., Clocan, C., Kandeepan, M., Millet, M., Cassagne, A., Lacassagne, L., Da Fonseca, P., Zander, F., Buttsworth, D., Loehle, S., Toth, J., Gray, S., Moingeon, A., Rambaux, N., 2023. A 2022 τ -Herculid meteor cluster from an airborne experiment: automated detection, characterization, and consequences for meteoroids. *Astronomy & Astrophysics* 670 id.A86, 6 pp.
- Vida, D., Gural, P.S., Brown, P.G., Campbell-Brown, M., Wiegert, P., 2020. Estimating trajectories of meteors: an observational Monte Carlo approach – I. Theory. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 491, 2688–2705.
- Vida, D., Segon, D., Gural, P.S., Brown, P.G., McIntyre, M.J., Dijkema, P., 2021. The Global Meteor Network – methodology and first results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 506, 5046–5074.
- Westphal, A.J., Fakra, S.C., Gainsforth, Z., Marcus, M.A., Ogliore, R.C., Butterworth, A.L., 2009. Mixing fraction of inner solar system material in comet 81P/Wild 2. *Astrophysical Journal* 694, 18–28.
- Wiegert, P., Vaubaillon, J., Campbell-Brown, M., 2009. A dynamical model of the sporadic meteoroid complex. *Icarus* 201, 295–310.
- Wooden, D.H., Harker, D.E., Woodward, C.E., Butner, H.M., Koike, C., Witteborn, F.C., McMurtry, C.W., Craig, W., 1999. Silicate mineralogy of the dust in the inner coma of comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) pre and postperihelion. *Astrophysical Journal* 517, 1034–1058.
- Yau, K., Yeomans, D.K., Weissman, P., 1993. The past and future motion of comet P/Swift-Tuttle. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 266, 305–316.
- Yeomans, D.K., Yau, K.K., Weissman, P.R., 1996. The impending appearance of comet Temple-Tuttle and the Leonid meteors. *Icarus* 124, 407–413.

Apêndice B

Desenvolvimento de Softwares

Este apêndice descreve didaticamente e de forma resumida os algoritmos e códigos desenvolvidos pelo autor para produzir dados e realizar a limpeza de seus resultados, com aplicação de filtros e algoritmos de “data minning”, com o objetivo de gerar arquivos de entrada e saída para serem usados nos programas usados nas investigações de integração numérica no Capítulo 4 e na determinação de encaixes de riantes-corpos parentais, referente ao Capítulo 3 da tese.

A seguir relacionamos todos os scripts e algoritmos utilizados para preparar os dados a serem utilizados nos códigos de investigação.

B.1 *Pseudo Códigos*

B.1.1 Bash Scripts

“files_modifierv1.sh”

Automatização de busca em banco de dados dos sites MPCORB e MDC:

O script importa usando o comando wget o banco de dados de NEAS e a listagem de chuvas. Faz o regex dos resultados dos NEAS, cria colunas de parâmetros, e também o regex da lista de chuvas criando uma tabela de colunas de parâmetros por riantes. Por fim, ele salva os resultados.

O download do banco de dados de NEAS e lista de chuvas de meteoros são feitos a partir de : <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/NEA.txt> e <https://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2007/Etc//streamestablisheddata2022.txt>, criando a seguinte tabela de saída:

Peri	Node	Incl	exccent	semiaxa	name

Tabela B.1: Output tabelados de NEAS

Os outputs da listagem de chuvas são organizados em saída tipo CSV whitespace, com 16 colunas de parâmetros: IAUNo (IAU numeral code), LaSun (averaged ecliptic longitude of the Sun at the shower activity, (J2000,deg)), Ra (right asscension of the shower radiant (J2000, deg)), De (declination of the shower radiant (J2000, deg)), dRA (radiant daily motion in right asscension), dDe (radiant daily motion in declination), Vg (geocentric velocity (Km/sec)), LoR (ecliptic longitude of the shower radiant (J2000, deg)),S.LoR (Sun centered ecliptic longitude of the shower radiant (deg)), LaR (ecliptic latitude of the radiant (J2000, deg)), a (semimajor axis (AU)), q (perihelion distance (AU)), e (eccentricity), peri (argument of perihelion (J2000, deg)), node (longitude of ascending node (J2000, deg)) e inc (inclination of the orbit (J2000, deg)). Versão IAU Meteor Data Center. Established meteor showers. V.2 , em 22 de Maio de 2023.

“files_modifierv1part2.sh”

Automatização de busca em banco de dados dos sites MPCORB e ASTORB

Asteroides, NEAS e cometas

Versão 2021/11.0

faz o download usando o comando wget do banco de dados de NEAS em : <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/NEA.txt>, e cria um tabela de saída no seguinte padrão:

Peri	Node	Incl	exccent	semiaxa	name	date

Tabela B.2: Output tabelados de NEAS

Em seguida procede o download do banco de dados de cometas no seguinte site: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB/CometEls.txt> e cria uma tabela no seguinte padrão:

Peri	Node	Incl	exccent	q	name

Tabela B.3: Output tabelados de Cometas

Por último, faz o download do banco de dados de Asteróides do site: <https://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.dat> e cria uma tabela no seguinte padrão:

Peri	Node	Incl	exccent	semiax	name

Tabela B.4: Output tabelados de Asteróides

No diretório previamente criado 'database/', são armazenadas as respectivas tabelas em formato ".dat":

```

/NEA.dat
/CometEls.dat
/astorb.dat
/stream_showers.dat

```

B.1.2 Códigos em PYTHON

“tablewrapping.py”

Usa os outputs de files_modifierv1part2.sh, aplica filtro para separar objetos com critério de Tisserand : $2.0 \leq t_{jup} \leq 3.05$, gerando o arquivo de saída "NEASACOS.dat", no diretório /data

“getSBDBNEAS.py”

Separa os objetos tipo ACOS das tabelas geradas pelo script em tablewrapping.py, e do banco de dados do JPL https://ssd-api.jpl.nasa.gov/sbdb_query.api através de queries, depois faz uma triagem e o resultado final combinado numa tabela de ACOS em dois formatos ".txt" e ".csv", com os seguintes parâmetros: full_name,spkid,pdes,name,class,neo,pha,t_jup,moid,orbit_id,epoch,equinox,a,e,i,q,ad,om,w,ma,n,tp,tp_cal

Estes resultados são armazenados no diretório '/database', sob o nome de arquivo: "NEASACOSV*.csv" Código em fortran que lê a listagem de NEOs e gera como output tabelas contendo os riantes sintéticos.

“DataMining1.py”

A partir dos resultados do arquivo de saída, faz o arranjo para limpar os dados num formato legível para o próximo passo, o arquivo de saída gerado é “data/data.npy”.

“DataTransfer.py”

Ele gera a listagem de ACOS a partir do arquivo de entrada “data/data.npy”, havendo a filtragem de melhor método, conforme o valor mais baixo de critério de dissimilaridade D_{sh} , o arquivo de saída é “./data/outputsRads*.csv”.

“CleanTableOrbits-v*.ipynb”

Este código tem como finalidade fazer a limpeza, filtragem de qualidade de órbitas e unificação de vários bancos de dados de órbitas de meteoros das redes de projetos de detecção de meteoros com formatação de entrada tipo UFO suite¹ e CAMS network².

Seu arquivo de saída tipo csv gerado a partir da unificação de banco de dados das redes Edmond, Sonotaco e Exoss contém 14 colunas com os seguintes parâmetros: Shower, timeUT, mjd(day), sol(deg), ra(deg), de(deg), q(AU), a(AU), incl(deg), e, peri(deg), node(deg), vg(km/s), jd. Os dados da rede GMN (rede citizen science de meteoros - Global Meteor Network (Vida et al., 2020), que coordena centenas de câmeras de detecção de meteoros, em ambos os hemisférios terrestres) são tratados e gravados num arquivo de saída tipo csv, com 36 colunas, seguindo a formatação do padrão do projeto CAMS³.

Os arquivos de saída resultantes do código descrito nesta seção são nomeados: “GMN_Data_all.csv” (GMN) e “DataAll_2007to2022.csv” (Sonotaco, Exoss, Edmond).

“GenMeteorsporadics PYTHON module”

Este procedimento computacional aplica o módulo PYTHON que pode ser baixado de <https://github.com/dvida/GenMeteorSporadics/tree/master> para gerar órbitas sintéticas usando o método E e o método Kernel Density estimation Jopek

¹Maiores detalhes podem ser obtidos em: http://sonotaco.com/soft/e_index.html

²<http://cams.seti.org/science.html>

³A descrição de cada parâmetro pode ser encontrada no seguinte link https://globalmeteornetwork.org/data/media/GMN_orbit_data_columns.pdf

(2021).

Para calcular estas órbitas, o script “SporadicsGenerateSynthetic.py” do referido módulo foi adaptado para ler o arquivo de órbitas do GMN de mais de 4 milhões de órbitas de meteoros⁴, utilizando Kernel density Estimation. O resultado deste algoritmo é utilizado como arquivo de entrada para cálculo estatísticos na parte final do método Guennon (2019), descrito em C.2 .

B.1.3 Códigos em FORTRAN

“methods_v*.f”

Método Computacional que calcula riantes teóricos a partir da listagem de objetos gerada pelo script “getSBDBNEAS.py”, consubstancia-se no código em FORTRAN 77 com 2755 linhas, adaptado para esta tese do código de Neslušan et al. (1998), para ler listagem de objetos e gerar saída de lista de riantes sintéticos. Para cada NEO tipo ACO da listagem input são computados a posição, tempo e velocidades associadas ao radiante de meteoros teórico, aplicando 6 métodos de variação de elementos orbitais.

O programa compilado “dosmeth.exe” do código FORTRAN calcula possíveis riantes teóricos associados a cada NEO, cujo elemento de entrada são os seus elementos orbitais atuais. Como as órbitas não necessariamente intersectam a órbita da Terra, o formato orbital é alterado até que seu MOID aproxime-se de zero e um radiante teórico seja definido. O código aplica seis métodos diferentes com condições iniciais diferentes, computando um radiante para cada um dessas opções. O mais provável radiante será definido como o resultante do método que menos alterou a sua órbita, quantificado através do $D_{criterion}$ de Southworth and Hawkins (1963) , comparando valores da órbita atual com uma órbita sintética cruzadora da Terra.

Este procedimento é repetido para ambos os nodos da órbita do NEO com o plano orbital da Terra e conseqüentemente duas correntes de riantes são calculadas para cada objeto. Cada um desses nodos, para efeitos de programação são chamados de Node- e Node+ e seus riantes teóricos respectivos são tratados independentemente como duas correntes diferentes.

O resultado final será um arquivo de saída com o riantes teóricos resultantes

⁴Os dados foram coletados no endereço https://globalmeteornetwork.org/data/traj_summary_data/

para cada objeto considerado. O arquivo é “data/targets*.dat” e ele será usado na próxima etapa para calcular o encaixe de chuvas com corpos parentais, descrito no Apêndice C.

Apêndice C

Programa de Associação de Radiantes Teóricos

Esta seção irá descrever as etapas matemáticas aplicadas nas adaptações dos algoritmos originais descritos e explicados nos artigos de Micheli (2013) e Guennoun et al. (2019).

A computação de radiantes teóricos associados a objetos tipo ACOS é realizada após a aplicação dos algoritmos de “data mining” e os resultados após a computação de “dosmeth.exe”, conforme explicado em B.1.3. Nesta etapa são usados os arquivos de entrada: “./data/outputsRads*.csv” explicado em B.1.2 e “./data/stream*.dat”, descrito em B.1.1, no Apêndice B.

Numa fase seguinte, aplicamos um algoritmo que realiza os cálculos previstos no artigo de Guennoun et al. (2019), sem levar em conta, novamente, critérios de dissimilaridades, usando o banco de dados da rede de meteoros GMN - Global Meteor Network, contendo mais de 4 milhões de órbitas catalogadas desde 2014. Neste método são levados em conta as coordenadas do radiante teórico e a sua velocidade geocêntrica (α, δ, V_g) , comparando-se com as órbitas de meteoros, através de filtros de proximidade. O resultado final é cotejado com a listagem de ranking de possíveis associações do método anterior, analisando e convalidando o cruzamento de resultados desses dois métodos computacionais.

C.1 Código para determinar a conexão radiante-corpo parental

O código original “Match.pro” foi gentilmente fornecido por Marco Michelli, ele é desenvolvido em formato de código proprietário IDL - Interactive Data Language. Assim, fizemos a transcrição desse algoritmo em sua totalidade para o formato não-proprietário da linguagem PYTHON que possibilita mais flexibilidade em codificação e uso de módulos específicos.

Na primeira parte do código são lidos os riantes teóricos e a listagem de chuvas, depois disso procede-se a conversão de valores formato string para tipo numérico float64, gravando as saídas em arquivos temporários. Em seguida um arquivo de escrita de saída é aberto em “ /data /outfM*.txt”, onde serão escritos os resultados dos encaixes de chuvas e corpos parentais.

Basicamente o algoritmo realiza duas etapas fundamentais, concretizado em dois passos, que irão testar duas propriedades que um encaixe provável deve cumprir:

1. A chuva prevista deve ser próxima a uma chuva real: radiante, tempo e velocidade.
2. O encaixe deve ser estatisticamente relevante, ou seja a associação não pode ocorrer devido a mera flutuação probabilística, como objetos que se movem em órbitas dinamicamente comuns (ex. baixa inclinação, riantes ao longo da eclíptica).

O primeiro passo que irá testar item 1, calcula da lista de NEOS tipo ACOS, uma função densidade probabilidade (PDF) dos parâmetros Ascensão Reta, Declinação, Longitude e velocidades, assumindo como erro padrão 10° para elementos angulares e 5 km/seg para a velocidade. Enquanto as coordenadas dos riantes são consideradas distribuição tipo Rayleigh, enquanto longitude e velocidades são consideradas distribuições Gaussianas, este passo pode ser considerado como “**fator de proximidade**”.

A lista de chuvas coletadas em 22.05.2023 , do site da IAU Meteor Data Center - versão: stream full V.2, não contém os erros associados de cada parâmetro, entretanto , o código leva em consideração as variações de parâmetros de cada chuva, conforme sua ordem de publicação e método de identificação utilizado, p.ex a chuva 002 - STA - Southern Taurids possui 13 entradas, assim, o algoritmo ao fazer a primeira etapa, considera cada entrada de parâmetros da mesma chuva, de

forma independente.

Cada radiante teórico calculado da lista de NEOS tipo ACOS é comparado com as distribuições retromencionadas, se nesta comparação se enquadra dentro de um valor de $threshold = 90\%$, entre o PDF do radiante teórico e a chuva da lista MDC, a associação é considerada provável, sendo agregada em um array de associações prováveis, para a próxima etapa.

O segundo passo diz respeito a considerar as possíveis associações significativas ou se devem a probabilidade aleatória de alinhamento entre as órbitas. O algoritmo, então, computa para cada par possível a densidade de riantes na mesma região particular de espaço de parâmetros: são utilizadas a posição do radiante em coordenadas eclípticas em relação ao Sol, e verificado quantos outros riantes caem na mesma faixa da região do céu, levando-se em conta a velocidade. Se a chuva é uma típica de orbita de baixa inclinação na eclíptica o radiante irá cair dentro de uma faixa muito perto de outros riantes, criados por todos os outros NEOS que tem orbitas similares. Mas, se ao contrário, o radiante é associado com um órbita peculiar, menos riantes irão estar na mesma faixa do céu. O autor do código original chama essa fase de “**fator de confusão**”, que objetiva diminuir a chance de falsos positivos devido a probabilidade aleatória de alinhamentos de órbitas.

Na parte final do algoritmo, após vencidas as duas etapas, descritas nos parágrafos anteriores: (1) o quanto as associações estão próximas e, (2) quão improvável é essa associação devido a fator aleatório; usamos, então, uma combinação empírica num parâmetro único que é aplicada para gerar o ranking das listas. O resultado final é arquivado em tipo csv em: “outfMfinal*small.txt”.

Se o score final do objeto é alto na lista representa que ele é um encaixe muito bom e está numa órbita peculiar, cuja possibilidade de associação devido a fatores aleatórios é baixa. Entretanto, algumas associações, mesmo em órbitas mais comuns podem ocorrer, como no caso dos ramos das Taurids (Micheli, 2013), pois a existência de outros corpos que são verdadeiramente parte desse enxame, possuem órbitas parecidas, o que artificialmente diminui as probabilidades de encaixe, ou seja, a existência de múltiplos corpos, dado uma corrente de meteoróides não se deve a meramente alinhamentos orbitais aleatórios, e isso deve ser levado em conta, durante uma análise.

C.2 Código para determinar a conexão meteoros-corpo parental

O código “Match2-v*.ipynb” foi desenvolvido pelo autor para implementar o algoritmo descrito em Guennoun et al. (2019) que usa uma metodologia de proximidade entre os parâmetros de posição do radiante e sua velocidade geocêntrica teórica de meteoros originados dela, com um banco de dados previamente tratado de órbitas de meteoros.

Os arquivos de entrada são: “DataAll_2007to2022.csv”, “outfMfinal*small.txt” e “outputsRads4.csv”. O primeiro arquivo contém todas as órbitas reunidas de banco de dados das redes de monitoramento de meteoros Edmond, Sonotaco e Exoss; o segundo é o resultado final depois do ranking de associações entre chuvas e NEOS tipo ACOS e o último arquivo reúne os resultados de riantes sintéticos.

Para cada NEO tipo ACOs resultado final do ranking descrito na subseção anterior é feita uma comparação com cada elemento da lista de órbitas de meteoros usando o método 3.1 descrito em Guennoun et al. (2019), ou seja, a diferença de RA, DEC e Longitude Solar não podem ser maior que 8° e a diferença entre distância angular do radiante do meteoro observado e do radiante teórico não pode ser maior que 2° e thresholds fixos em 5% de variação para velocidades geocêntricas.

A tabela final com os resultados cruzados de método computacional “dos-method.exe” e “Match-v*.ipynb” referentes ao corpo parental associado com a chuva, o número de órbitas detectadas correspondentes e a probabilidade dessa associação ser um falso positivo são gravadas em arquivo para posterior análise.

Apêndice D

Tabela de Classificação de Queries do SBDB

D.1 Tabela de Classificação do SBDB

A seguinte tabela foi capturada do site "https://ssd-api.jpl.nasa.gov/sbdb_query.api", em 12 de novembro de 2023.

Tabela D.1: Tabela descritiva de classes de Órbitas do SBDB - versão 1.5

Classe	Descrição
IEO	An asteroid orbit contained entirely within the orbit of the Earth (Q j 0.983 AU). Also known as an Interior Earth Object.
ATE	Aten Near-Earth asteroid orbits similar to that of 2062 Aten (a j 1.0 AU; Q j 0.983 AU).
APO	Apollo Near-Earth asteroid orbits which cross the Earth's orbit similar to that of 1862 Apollo (a j 1.0 AU; q j 1.017 AU).
AMO	Amor Near-Earth asteroid orbits similar to that of 1221 Amor (1.017 AU j q j 1.3 AU).
MCA	Mars-crossing Asteroid Asteroids that cross the orbit of Mars constrained by (1.3 AU j q j 1.666 AU; a j 3.2 AU).
IMB	Inner Main-belt Asteroid Asteroids with orbital elements constrained by (a j 2.0 AU; q j 1.666 AU).
MBA	Main-belt Asteroid Asteroids with orbital elements constrained by (2.0 AU j a j 3.2 AU; q j 1.666 AU).
OMB	Outer Main-belt Asteroid Asteroids with orbital elements constrained by (3.2 AU j a j 4.6 AU).
TJN	Jupiter Trojan Asteroids trapped in Jupiter's L4/L5 Lagrange points (4.6 AU j a j 5.5 AU; e j 0.3).
CEN	Centaur Objects with orbits between Jupiter and Neptune (5.5 AU j a j 30.1 AU).
TNO	TransNeptunian Object Objects with orbits outside Neptune (a j 30.1 AU).
PAA	Parabolic Asteroid Asteroids on parabolic orbits (e = 1.0).
HYA	Hyperbolic Asteroid Asteroids on hyperbolic orbits (e j 1.0).
HYP	Hyperbolic Comet Comets on hyperbolic orbits (e j 1.0).
PAR	Parabolic Comet Comets on parabolic orbits (e = 1.0).
COM	Comet Comet orbit not matching any defined orbit class.
JFC	Jupiter-family Comet* Jupiter-family comet, classical definition (P j 20 y).
HTC	Halley-type Comet* Halley-type comet, classical definition (20 y j P j 200 y).
ETc	Encke-type Comet Encke-type comet, as defined by Levison and Duncan (Tj j 3; a j aJ).
CTc	Chiron-type Comet Chiron-type comet, as defined by Levison and Duncan (Tj j 3; a j aJ).
JFc	Jupiter-family Comet Jupiter-family comet, as defined by Levison and Duncan (2 j Tj j 3).

Bibliografia

- (1976). *Interplanetary encounters: Close-range gravitational interactions*, volume 2.
- Abedin, A., Spurný, P., Wiegert, P., Pokorný, P., Borovička, J., and Brown, P. (2015). On the age and formation mechanism of the core of the Quadrantid meteoroid stream. *Icarus*, 261:100–117.
- Abedin, A., Wiegert, P., Janches, D., Pokorný, P., Brown, P., and Hormaechea, J. L. (2018). Formation and past evolution of the showers of 96P/Machholz complex. *Icarus*, 300:360–385.
- Andreić, Ž., Vida, D., Novoselnik, F., Šegon, D., Korlević, K., Matijević, F., Jašarević, D., Perkov, A., and Tudor, C. (2013). August 1 Cetids, a Possible New Meteor Shower in August. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 41(2):40–42.
- Asher, D. J., Clube, S. V. M., and Steel, D. I. (1993). The Taurid Complex asteroids. In Stohl, J. and Williams, I. P., editors, *Meteoroids and their Parent Bodies*, pages 93–96.
- Babadzhanov, P. B., Kokhirova, G. I., Williams, I. P., and Obrubov, Y. V. (2017). Investigation into the relationship between comet 96P/Machholz 1 and asteroid 2003 EH1. *A&A*, 598:A94.
- Babadzhanov, P. B., Williams, I. P., and Kokhirova, G. I. (2008). Near-Earth Objects in the Taurid complex. *MNRAS*, 386:1436–1442.
- 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. and Lupishko, D. F. (2006). Properties of the Near-Earth object population: the ACM 2005 view. In Lazzaro, D., Ferraz-Mello, S., and Fernández, J. A., editors, *Asteroids, Comets, Meteors*, volume 229, pages 207–214.

- Borovička, J. and Ceplecha, Z. (1992). Earth-grazing fireball of October 13, 1990. *A&A*, 257(1):323–328.
- Borovička, J. (2007). Properties of meteoroids from different classes of parent bodies. In Valsecchi, G. B., Vokrouhlický, D., and Milani, A., editors, *Near Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk*, volume 236 of *IAU Symposium*, pages 107–120.
- Borovička, J. and Jenniskens, P. (2000). Time Resolved Spectroscopy of a Leonid Fireball Afterglow. *Earth Moon and Planets*, 82:399–428.
- Borovička, J., Koten, P., Spurný, P., Boček, J., and Štork, R. (2005). A survey of meteor spectra and orbits: evidence for three populations of Na-free meteoroids. *Icarus*, 174:15–30.
- Borovička, J. and Spurný, P. (2008). The Carancas meteorite impact - Encounter with a monolithic meteoroid. *A&A*, 485:L1–L4.
- Borovička, J., Spurný, P., and Brown, P. (2015). *Small Near-Earth Asteroids as a Source of Meteorites*, pages 257–280. uapress.
- Borovička, J. (2005). Spectral Investigation of Two Asteroidal Fireballs. *Earth Moon and Planets*, 97(3-4):279–293.
- Borovička, J., Spurný, P., and Koten, P. (2007). Atmospheric deceleration and light curves of Draconid meteors and implications for the structure of cometary dust. *A&A*, 473(2):661–672.
- Brasser, R. and Morbidelli, A. (2013). Oort cloud and Scattered Disc formation during a late dynamical instability in the Solar System. *Icarus*, 225(1):40–49.
- Britt, D. T. and Consolmagno, G. J. (2000). Asteroid Bulk Density. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #32*, volume 32 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 07.02.
- Brown, P., Spalding, R. E., ReVelle, D. O., Tagliaferri, E., and Worden, S. P. (2002). The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*, 420:294–296.
- Brown, P., Wong, D. K., Weryk, R. J., and Wiegert, P. (2010). A meteoroid stream survey using the Canadian Meteor Orbit Radar. II: Identification of minor showers using a 3D wavelet transform. *Icarus*, 207(1):66–81.

- Brown, P. G., Assink, J. D., Astiz, L., Blaauw, R., Boslough, M. B., Borovička, J., Brachet, N., Brown, D., Campbell-Brown, M., Ceranna, L., Cooke, W., de Groot-Hedlin, C., Drob, D. P., Edwards, W., Evers, L. G., Garces, M., Gill, J., Hedlin, M., Kingery, A., Laske, G., Le Pichon, A., Mialle, P., Moser, D. E., Saffer, A., Silber, E., Smets, P., Spalding, R. E., Spurný, P., Tagliaferri, E., Uren, D., Weryk, R. J., Whitaker, R., and Krzeminski, Z. (2013). A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503:238–241.
- Bus, S. J. and Binzel, R. P. (2002a). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158(1):146–177.
- Bus, S. J. and Binzel, R. P. (2002b). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The Observations. *Icarus*, 158(1):106–145.
- Ceplecha, Z. (1988). Earth’s influx of different populations of sporadic meteoroids from photographic and television data. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 39:221–236.
- Ceplecha, Z. (1994). Meteoroid Properties from Photographic Records of Meteors and Fireballs. In Milani, A., di Martino, M., and Cellino, A., editors, *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, volume 160 of *IAU Symposium*, page 343.
- Ceplecha, Z. and McCrosky, R. E. (1976). Fireball end heights - A diagnostic for the structure of meteoric material. *J. Geophys. Res.*, 81:6257–6275.
- Ceplecha, Z., Spalding, E. R., Jacobs, C., Revelle, D. O., Tagliaferri, E., and Brown, P. (1999). Superbolides. In Baggaley, W. J. and Porubcan, V., editors, *Meteoroids 1998*, page 37.
- Chandler, C. O., Trujillo, C. A., Oldroyd, W. J., Kueny, J. K., Burris, W. A., Hsieh, H. H., DeSpain, J. A., Sedaghat, N., Sheppard, S. S., Farrell, K. A., Trilling, D. E., Gustafsson, A., Magbanua, M. J. M., Mazzucato, M. T., Bosch, M. K. D., Shaw-Diaz, T., Gonano, V., Lamperti, A., da Silva Campos, J. A., Goodwin, B. L., Terentev, I. A., Dukes, C. J. A., and Deen, S. (2024). The Active Asteroids Citizen Science Program: Overview and First Results. *AJ*, 167(4):156.
- Chapman, C. R., Morrison, D., and Zellner, B. (1975). Surface Properties of Asteroids: A Synthesis of Polarimetry, Radiometry, and Spectrophotometry. *Icarus*, 25(1):104–130.

- Cook, A. F. (1973). A Working List of Meteor Streams. In Hemenway, C. L., Millman, P. M., and Cook, A. F., editors, *NASA Special Publication*, volume 319, page 183. NASA.
- Csillik, I. (2004). Symplectic and regularization methods. *Technische Mechanik-European Journal of Engineering Mechanics*, 24(1):67–73.
- De Cicco, M., Lazzaro, D., Santiago, E. P., and Team, E. (2018). Brazilian video monitoring meteors network EXOSS: Status and first results—a citizen science project. In Gyssens, M. and Rault, J.-L., editors, *International Meteor Conference, Petnica, Serbia*, pages 162–164.
- De Cicco, M. and Szücs-Csillik, I. (2022). Earth-grazing fireball’s recurrence. *Romanian Astronomical Journal*, 32(3):175–194.
- De Cicco, M. A. (2020). A renewed discussion: The Hyperbolic Meteors and its Interestellar Origin. ”personal communication”,https://www.youtube.com/watch?v=PhBYCCBWM1c&list=PLEypPv_8eK03k5e5wn120FsuiMf8aUyvp&ab_channel=InternationalMeteorOrganization. 2020 International Meteor Conference - September 19th, virtual meeting.https://imc2020.imo.net/program_pdf/Abstracts_IMC_2020.pdf.
- DeMeo, F., Binzel, R. P., Slivan, S. M., and Bus, S. J. (2009a). Bus-DeMeo Asteroid Taxonomy V1.0. *NASA Planetary Data System*, pages EAR–A–VARGBDDET–5–BUSDEMEOTAX–V1.0.
- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., and Bus, S. J. (2009b). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202(1):160–180.
- Denning, W. F. (1877). The August Perseids, 1877. *The Observatory*, 1:164–166.
- Dones, L., Brassier, R., Kaib, N., and Rickman, H. (2015). Origin and Evolution of the Cometary Reservoirs. *Space Sci. Rev.*, 197(1-4):191–269.
- Drolshagen, S., Kretschmer, J., Koschny, D., Drolshagen, G., and Poppe, B. (2015). Mass accumulation of Earth from interplanetary dust, meteoroids, asteroids and comets. In Rault, J.-L. and Roggemans, P., editors, *International Meteor Conference Mistelbach, Austria*, pages 220–225.
- Drummond, J. D. (1981). A test of comet and meteor shower associations. *Icarus*, 45:545–553.

- Dumitru, B. A. (2018). *Near Earth Asteroids associated with meteor showers*. PhD thesis, Observatoire de Paris, Institut de Mecanique Celeste et de Calcul des Ephemerides.
- Fernandez, J. A. (1980). On the existence of a comet belt beyond Neptune. *MNRAS*, 192:481–491.
- Fernández, J. A., Gallardo, T., and Brunini, A. (2002). Are There Many Inactive Jupiter-Family Comets among the Near-Earth Asteroid Population? *Icarus*, 159(2):358–368.
- Fernandez, J. A. and Ip, W. H. (1983). On the time evolution of the cometary influx in the region of the terrestrial planets. *Icarus*, 54(3):377–387.
- Fernández, J. A. and Sosa, A. (2015). Jupiter family comets in near-Earth orbits: Are some of them interlopers from the asteroid belt? *Planet. Space Sci.*, 118:14–24.
- Fernández, Y. R., Jewitt, D. C., and Sheppard, S. S. (2001). Low Albedos Among Extinct Comet Candidates. *ApJ*, 553(2):L197–L200.
- Fernández, Y. R., Jewitt, D. C., and Sheppard, S. S. (2005). Albedos of Asteroids in Comet-Like Orbits. *AJ*, 130(1):308–318.
- Foglia, S., Micheli, M., Ridley, H. B., Jenniskens, P., and Marsden, B. G. (2005). Comet D/1819 W1 (Blanpain) and 2003 WY25. *IAU Circ.*, 8485:1.
- Gladman, B., Michel, P., and Froeschlé, C. (2000). The Near-Earth Object Population. *Icarus*, 146(1):176–189.
- Greenwood, R. C., Burbine, T. H., and Franchi, I. A. (2020). Linking asteroids and meteorites to the primordial planetesimal population. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 277:377–406.
- Grün, E. and Landgraf, M. (2000). Collisional consequences of big interstellar grains. *J. Geophys. Res.*, 105:10291–10298.
- Grün, E., Staubach, P., Baguhl, M., Hamilton, D. P., Zook, H. A., Dermott, S., Gustafson, B. A., Fechtig, H., Kissel, J., Linkert, D., Linkert, G., Srama, R., Hanner, M. S., Polanskey, C., Horanyi, M., Lindblad, B. A., Mann, I., McDonnell, J. A. M., Morfill, G. E., and Schwehm, G. (1997). South-North and Radial Traverses through the Interplanetary Dust Cloud. *Icarus*, 129:270–288.

- Grun, E., Zook, H. A., Fechtig, H., and Giese, R. H. (1985). Collisional balance of the meteoritic complex. *Icarus*, 62:244–272.
- Guennoun, M., Vaubaillon, J., Čapek, D., Kotten, P., and Benkhaldoun, Z. (2019). A robust method to identify meteor showers new parent bodies from the SonotaCo and EDMOND meteoroid orbit databases. *A&A*, 622:A84.
- Hahn, J. M. and Malhotra, R. (2005). Neptune’s Migration into a Stirred-Up Kuiper Belt: A Detailed Comparison of Simulations to Observations. *AJ*, 130(5):2392–2414.
- Hajduková, M. (2008). The occurrence of interstellar meteoroids in the vicinity of the Earth. In Kwok, S. and Sanford, S., editors, *Organic Matter in Space*, volume 251 of *IAU Symposium*, pages 347–348.
- Hajduková, M., Kornoš, L., and Tóth, J. (2014). Frequency of hyperbolic and interstellar meteoroids. *Meteoritics and Planetary Science*, 49:63–68.
- Hajduková, M., Rudawska, R., Jopek, T. J., Koseki, M., Kokhirova, G., and Neslušan, L. (2023). Modification of the Shower Database of the IAU Meteor Data Center. *A&A*, 671:A155.
- Hajdukova, M., Sterken, V., Wiegert, P., and Kornoš, L. (2020). The challenge of identifying interstellar meteors. *Planet. Space Sci.*, 192:105060.
- Hajdukova, Jr., M. (1994). On the frequency of interstellar meteoroids. *A&A*, 288:330–334.
- Harris, A. W. and Lagerros, J. S. V. (2002). Asteroids in the Thermal Infrared. In *Asteroids III*, pages 205–218. A.
- Hasegawa, I. (1990). Predictions of the Meteor Radiant Point Associated with a Comet. *PASJ*, 42:175–186.
- Hawkes, R. L. and Woodworth, S. C. (1997). Do some meteorites come from interstellar space? *JRASC*, 91.
- Hawkins, G. S., Southworth, R. B., and Steinon, F. (1959). Recovery of the Andromedids. *AJ*, 64:183.
- Hicks, M. D., Fink, U., and Grundy, W. M. (1998). The Unusual Spectra of 15 Near-Earth Asteroids and Extinct Comet Candidates. *Icarus*, 133(1):69–78.

- Holman, D. and Jenniskens, P. (2012). Confirmation of the Northern Delta Aquariids (NDA, IAU #26) and the Northern June Aquilids (NZC, IAU #164). *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 40(5):166–170.
- Hoppe, J. (1937). Die physikalischen Vorgänge beim Eindringen meteoritischer Körper in die Erdatmosphäre. *Astronomische Nachrichten*, 262:169.
- Hsieh, H. H. and Haghhighipour, N. (2016). Potential Jupiter-Family comet contamination of the main asteroid belt. *Icarus*, 277:19–38.
- Hsieh, H. H. and Jewitt, D. (2006). Main Belt Comets: Ice in the Inner Solar System. In *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #38*, volume 38 of *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, page 08.02.
- IAU, C. F. (2017). Meteors Meteorites: The IAU Definitions of Meteor Terms. ”Explanatory text”, https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f1/meteordefinitions_approved.pdf, note = Commission F1 on Meteors, Meteorites and Interplanetary Dust.
- Ieva, S., Perna, D., Fanasca, C., Dotto, E., Mazzotta Epifani, E., Di Paola, A., Gunta, A., Lazzarin, M., Bertini, I., Petropoulou, V., Lazzaro, D., Arcoverde, P., Rondon, E., Medeiros, H., Monteiro, F., Micheli, M., Perozzi, E., and Barucci, M. A. (2019). A comprehensive survey on small NEOs: the NEOShield-2 legacy. In *EPSC-DPS Joint Meeting 2019*, volume 2019, pages EPSC–DPS2019–805.
- Ishiguro, M., Sarugaku, Y., Nishihara, S., Nakada, Y., Nishiura, S., Soyano, T., Tarusawa, K., Mukai, T., Kwon, S. M., Hasegawa, S., Usui, F., and Ueno, M. (2009). Report on the Kiso cometary dust trail survey. *Advances in Space Research*, 43(5):875–879.
- Izidoro, A., de Souza Torres, K., Winter, O. C., and Haghhighipour, N. (2013). A Compound Model for the Origin of Earth’s Water. *ApJ*, 767(1):54.
- Jenniskens, P. (2004). 2003 EH₁ Is the Quadrantid Shower Parent Comet. *AJ*, 127(5):3018–3022.
- Jenniskens, P. (2006). *Meteor Showers and their Parent Comets*. Cambridge University Press.
- Jenniskens, P. (2007a). Meteor Showers from Broken Comets. *Dust in Planetary Systems*, 643:3–6.

- Jenniskens, P. (2007b). The I.A.U. meteor shower nomenclature rules. In Bettonvil, F. and Kac, J., editors, *Proceedings of the International Meteor Conference, 25th IMC, Roden, Netherlands, 2006*, pages 87–89.
- Jenniskens, P. (2008a). *Meteor Showers and their Parent Comets*. Cambridge University Press.
- Jenniskens, P. (2008b). Meteoroid streams that trace to candidate dormant comets. *Icarus*, 194:13–22.
- Jenniskens, P., Lauretta, D. S., Towner, M. C., Heathcote, S., Jehin, E., Hanke, T., Cooper, T., Baggaley, J. W., Howell, J. A., Johannink, C., Breukers, M., Odeh, M., Moskovitz, N., Juneau, L., Beck, T., De Cicco, M., Samuels, D., Rau, S., Albers, J., and Gural, P. S. (2021). Meteor showers from known long-period comets. *Icarus*, 365:114469.
- Jenniskens, P. and Marsden, B. G. (2003). 2003 EH₁ and the Quadrantids. *IAU Circ.*, 8252:2.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Albers, J., Gural, P. S., Haberman, B., Holman, D., Morales, R., Grigsby, B. J., Samuels, D., and Johannink, C. (2016). The established meteor showers as observed by CAMS. *Icarus*, 266:331–354.
- Jenniskens, P., Nénon, Q., Albers, J., Gural, P., Haberman, B., Holman, D., Morales, R., Grigsby, B., Samuels, D., and Johannink, C. (2016). The established meteor showers as observed by cams. *Icarus*, 266:331–354.
- Jenniskens, P. and Vaubaillon, J. (2008). Minor Planet 2008 ED69 and the Kappa Cygnid Meteor Shower. *AJ*, 136(2):725–730.
- Jenniskens, P. and Vaubaillon, J. (2010). Minor Planet 2002 EX₁₂ (=169P/NEAT) and the Alpha Capricornid Shower. *AJ*, 139(5):1822–1830.
- Jewitt, D. (2006). Comet D/1819 W1 (Blanpain): Not Dead Yet. *AJ*, 131(4):2327–2331.
- Jewitt, D. (2012). The Active Asteroids. *AJ*, 143:66.
- Jewitt, D., Hsieh, H., and Agarwal, J. (2015). The Active Asteroids. In *Asteroids IV*, pages 221–241. Uapress.
- Jewitt, D. and Hsieh, H. H. (2022). The Asteroid-Comet Continuum. *arXiv e-prints*, page arXiv:2203.01397.

- Jewitt, D., Li, J., and Agarwal, J. (2013). The Dust Tail of Asteroid (3200) Phaethon. *ApJ*, 771:L36.
- Jewitt, D., Mutchler, M., Agarwal, J., and Li, J. (2018). Hubble Space Telescope Observations of 3200 Phaethon at Closest Approach. *AJ*, 156(5):238.
- Jones, D. C., Williams, I. P., and Porubčan, V. (2006). The Kappa Cygnid meteoroid complex. *MNRAS*, 371(2):684–694.
- Jopek, T. J. (1993). Remarks on the meteor orbital similarity D-criterion. *Icarus*, 106:603.
- Jopek, T. J. (2011). Meteoroid streams and their parent bodies. *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 82:310.
- Jopek, T. J. (2021). Remarks on generating realistic synthetic meteoroid orbits. *A&A*, 645:A82.
- Jopek, T. J. and Jenniskens, P. M. (2011). The Working Group on Meteor Showers Nomenclature: A History, Current Status and a Call for Contributions. In Cooke, W. J., Moser, D. E., Hardin, B. F., and Janches, D., editors, *Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies*, pages 7–13.
- Jopek, T. J. and Williams, I. P. (2013). Stream and sporadic meteoroids associated with near-Earth objects. *MNRAS*, 430:2377–2389.
- Kaňuchová, Z. and Neslušan, L. (2007). The parent bodies of the Quadrantid meteoroid stream. *A&A*, 470(3):1123–1136.
- Kasuga, T. and Jewitt, D. (2008). Observations of 1999 YC and the Breakup of the Geminid Stream Parent. *AJ*, 136(2):881–889.
- Kasuga, T. and Jewitt, D. (2015). Physical Observations of (196256) 2003 EH1, Presumed Parent of the Quadrantid Meteoroid Stream. *AJ*, 150(5):152.
- Kasuga, T. and Jewitt, D. (2019). Asteroid-Meteoroid Complexes. In Ryabova, G. O., Asher, D. J., and Campbell-Brown, M. J., editors, *Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond*, page 187. press.
- Kegerreis, J. A., Ruiz-Bonilla, S., Eke, V. R., Massey, R. J., Sandnes, T. D., and Teodoro, L. F. A. (2022). Immediate origin of the moon as a post-impact satellite. *The Astrophysical Journal Letters*, 937(2):L40.
- Kim, Y., Ishiguro, M., and Usui, F. (2014). Physical Properties of Asteroids in Comet-like Orbits in Infrared Asteroid Survey Catalogs. *ApJ*, 789(2):151.

- Kokhirova, G. I. and Babadzhanov, P. B. (2023). Current Knowledge of Objects Approaching the Earth. *Solar System Research*, 57(5):467–485.
- Kornos, L., Koukal, J., Piff, R., and Toth, J. (2013). Database of meteoroid orbits from several European video networks. In Gyssens, M. and Roggemans, P., editors, *Proceedings of the International Meteor Conference, 31st IMC, La Palma, Canary Islands, Spain, 2012*, pages 21–25.
- Kornoš, L., Koukal, J., Piff, R., and Tóth, J. (2014). EDMOND Meteor Database. In Gyssens, M., Roggemans, P., and Zoladek, P., editors, *Proceedings of the International Meteor Conference, Poznan, Poland, 22-25 August 2013*, pages 23–25.
- Koschny, D., Bettonvil, F., Licandro, J., Lujt, C. v. d., Mc Auliffe, J., Smit, H., Svedhem, H., de Wit, F., Witasse, O., and Zender, J. (2013). A double-station meteor camera set-up in the Canary Islands - CILBO. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2:339–348.
- Koten, P., Borovička, J., Spurný, P., Betlem, H., and Evans, S. (2004). Atmospheric trajectories and light curves of shower meteors. *A&A*, 428:683–690.
- Koten, P., Borovička, J., Spurný, P., Evans, S., Štork, R., and Elliott, A. (2006). Double station and spectroscopic observations of the Quadrantid meteor shower and the implications for its parent body. *MNRAS*, 366(4):1367–1372.
- Koukal, J., Srba, J., and Lenža, L. (2024). Edmond v5.05. *eMeteorNews*, 9(1):15–23.
- Kresak, L. (1979). Dynamical interrelations among comets and asteroids. In Gehrels, T. and Matthews, M. S., editors, *Asteroids*, pages 289–309.
- Kresak, L. (1987). Dormant Phases in the Aging of Periodic Comets. *A&A*, 187:906.
- Kuninaka, H. (2021). The Status of Hayabusa 2 Asteroid Explorer and Its Results. In *43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January - 4 February*, volume 43, page 2451.
- 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., Dones, L., and Duncan, M. J. (2001). The Origin of Halley-Type Comets: Probing the Inner Oort Cloud. *AJ*, 121(4):2253–2267.

- Levison, H. F. and Duncan, M. J. (1997). From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets. *Icarus*, 127(1):13–32.
- Lindblad, B. A. (1971). A computerized stream search among 2401 photographic meteor orbits. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 12:14–24.
- Lissauer, J. J. and de Pater, I. (2013). *Fundamental Planetary Science*.
- Loehle, S., Jenniskens, P., Böhrk, H., Bauer, T., Elsäßer, H., Sears, D. W., Zolensky, M. E., and Shaddad, M. H. (2017). Thermophysical properties of Almahata Sitta meteorites (asteroid 2008 TC₃) for high-fidelity entry modeling. *Meteoritics and Planetary Science*, 52:197–205.
- Lowry, S. C., Fitzsimmons, A., Hicks, M., Lawrence, K., and Forti, G. (2006). Comet P/2006 HR₃₀ (Siding Spring). *IAU Circ.*, 8735:1.
- Malhotra, R. (1993). On the Delivery of Planetesimals to a Protoplanet in the Solar Nebula. In *Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, page 925.
- Malhotra, R. (1995). The Origin of Pluto’s Orbit: Implications for the Solar System Beyond Neptune. *AJ*, 110:420.
- Martino, S., Tancredi, G., Monteiro, F., Lazzaro, D., and Rodrigues, T. (2019). Monitoring of Asteroids in Cometary Orbits and Active Asteroids. *Planet. Space Sci.*, 166:135–148.
- Matlovič, P., Tóth, J., Rudawska, R., and Kornoš, L. (2017). Spectra and physical properties of Taurid meteoroids. *Planet. Space Sci.*, 143:104–115.
- Micheli, M. (2005). Possibile correlazione tra l’asteroide 2003 WY₂₅, la cometa D/1819 W1 (Blanpain) e due sciami meteorici occasionali Possibile correlazione tra l’asteroide 2003 WY₂₅, la cometa D/1819 W1 (Blanpain) e due sciami meteorici occasionali. *Astronomia. La rivista dell’Unione Astrofili Italiani*, 1:47–53.
- Micheli, M. (2013). *Exploring connections between near-Earth objects and meteoroid streams*. PhD thesis, University of Hawaii, Manoa.
- Micheli, M., Tholen, D. J., and Jenniskens, P. (2016). Evidence for 2009 WN₂₅ being the parent body of the November i-Draconids (NID). *Icarus*, 267:64–67.

- Molau, S., Kac, J., Berko, E., Crivello, S., Stomeo, E., Igaz, A., and Barentsen, G. (2012). Results of the IMO Video Meteor Network - August 2012. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 40(6):201–206.
- Mommert, M., Harris, A. W., Mueller, M., Hora, J. L., Trilling, D. E., Bottke, W. F., Thomas, C. A., Delbo, M., Emery, J. P., Fazio, G., and Smith, H. A. (2015). ExploreNEOs. VIII. Dormant Short-period Comets in the Near-Earth Asteroid Population. *AJ*, 150(4):106.
- Mommert, M., Hora, J. L., Harris, A. W., Reach, W. T., Emery, J. P., Thomas, C. A., Mueller, M., Cruikshank, D. P., Trilling, D. E., Delbo, M., and Smith, H. A. (2014). The Discovery of Cometary Activity in Near-Earth Asteroid (3552) Don Quixote. *ApJ*, 781(1):25.
- Mommert, M., Hora, J. L., Trilling, D. E., Biver, N., Wierzechos, K., Harrington Pinto, O., Agarwal, J., Kim, Y., McNeill, A., Womack, M., Knight, M. M., Polishook, D., Moskovitz, N., Kelley, M. S. P., and Smith, H. A. (2020). Recurrent Cometary Activity in Near-Earth Object (3552) Don Quixote. , 1(1):12.
- Monteiro, F., Rondón, E., Lazzaro, D., Oey, J., Evangelista-Santana, M., Arcoverde, P., De Cicco, M., Silva-Cabrera, J. S., Rodrigues, T., and Santos, L. B. T. (2021). Physical characterization of equal-mass binary near-Earth asteroid 2017 YE5: a possible dormant Jupiter-family comet. *MNRAS*, 507(4):5403–5414.
- Morbidelli, A., Chambers, J., Lunine, J. I., Petit, J. M., Robert, F., Valsecchi, G. B., and Cyr, K. E. (2000). Source regions and time scales for the delivery of water to Earth. , 35(6):1309–1320.
- 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.
- Morbidelli, A., Tsiganis, K., Crida, A., Levison, H. F., and Gomes, R. (2007). Dynamics of the Giant Planets of the Solar System in the Gaseous Protoplanetary Disk and Their Relationship to the Current Orbital Architecture. *AJ*, 134(5):1790–1798.
- Neri, F. (1987). Lie algebras and canonical integration. *Dept. of Physics, University of Maryland*.

- Neslusan, L., Porubčan, V., and Svoren, J. (1994). Applicability of meteor radiant determination methods depending on orbit type. *Planet. Space Sci.*, 42(8):669–672.
- Neslušan, L., Hajduková, M., and Jakubík, M. (2013a). Meteor-shower complex of asteroid 2003 EH1 compared with that of comet 96P/Machholz. *A&A*, 560:A47.
- Neslušan, L., Kaňuchová, Z., and Tomko, D. (2013b). The meteor-shower complex of 96P/Machholz revisited. *A&A*, 551:A87.
- Neslušan, L., Svoreň, J., and Porubčan, V. (1998). A computer program for calculation of a theoretical meteor-stream radiant. *A&A*, 331:411–413.
- Nesvorný, D. (2018). Dynamical Evolution of the Early Solar System. *ARA&A*, 56:137–174.
- Nesvorný, D. (2018). Dynamical evolution of the early solar system. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56(1):137–174.
- Nesvorný, D., Bottke, W. F., Levison, H. F., and Dones, L. (2003). Recent Origin of the Solar System Dust Bands. *ApJ*, 591:486–497.
- Nesvorný, D. and Morbidelli, A. (2012). Statistical Study of the Early Solar System’s Instability with Four, Five, and Six Giant Planets. *AJ*, 144(4):117.
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., Dones, L., Levison, H. F., Kaib, N., and Morbidelli, A. (2017). Origin and Evolution of Short-period Comets. *ApJ*, 845(1):27.
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., and Morbidelli, A. (2013). Capture of Trojans by Jumping Jupiter. *ApJ*, 768(1):45.
- Ohtsuka, K., Arakida, H., Ito, T., Kasuga, T., Watanabe, J., Kinoshita, D., Sekiguchi, T., Asher, D. J., and Nakano, S. (2007). Apollo Asteroids 1566 Icarus and 2007 MK₆: Icarus Family Members? *ApJ*, 668(1):L71–L74.
- Ohtsuka, K., Arakida, H., Ito, T., Yoshikawa, M., and Asher, D. J. (2008). Apollo Asteroid 1999 YC: Another Large Member of the PGC? *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 43:5055.
- Ohtsuka, K., Nakato, A., Nakamura, T., Kinoshita, D., Ito, T., Yoshikawa, M., and Hasegawa, S. (2009). Solar-Radiation Heating Effects on 3200 Phaethon. *PASJ*, 61:1375.

- Olivier, C. P. (1925). *Meteors*. Press.
- Olkin, C. B., Levison, H. F., Vincent, M., Noll, K. S., Andrews, J., Gray, S., Good, P., Marchi, S., Christensen, P., Reuter, D., Weaver, H., Pätzold, M., III, J. F. B., Hamilton, V. E., Russo, N. D., Simon, A., Beasley, M., Grundy, W., Howett, C., Spencer, J., Ravine, M., and Caplinger, M. (2021). Lucy mission to the trojan asteroids: Instrumentation and encounter concept of operations. *The Planetary Science Journal*, 2(5):172.
- 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., and Boggs, D. H. (2021). The jpl planetary and lunar ephemerides de440 and de441. *The Astronomical Journal*, 161(3):105.
- Pecina, P. and Ceplecha, Z. (1983). New aspects in single-body meteor physics. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 34:102–121.
- Porter, J. G. (1952). *Comets and meteor streams*. press.
- Porubčan, V., Kornoš, L., and Williams, I. P. (2006). The Taurid complex meteor showers and asteroids. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 36:103–117.
- Reddy, V., Dunn, T. L., Thomas, C. A., Moskovitz, N. A., and Burbine, T. H. (2015). Mineralogy and Surface Composition of Asteroids. In *Asteroids IV*, pages 43–63. Asteroids IV.
- Rein, H. and Liu, S. F. (2012). REBOUND: an open-source multi-purpose N-body code for collisional dynamics. *A&A*, 537:A128.
- Rickman, H., Fernandez, J. A., and Gustafson, B. A. S. (1990). Formation of stable dust mantles on short-period comet nuclei. *A&A*, 237(2):524–535.
- Ridley, E. C. and Hartree, D. R. (1957). A numerical method of solving second-order linear differential equations with two-point boundary conditions. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 53(2):442.
- Roggemans, P., Šegon, D., and Vida, D. (2023). June Bootids (JBO#170) in 2022 recorded by Global Meteor Network. *eMeteorNews*, 8(2):65–73.

- Rudawska, R., Atreya, P., Bouley, S., Vaubaillon, J., Colas, F., and Silbermann, T. (2012). The parent body search. In *Proceedings of the International Meteor Conference, 30th IMC, Sibiu, Romania, 2011*, page 47.
- Rudawska, R., Hajdukova, M., Jopek, T. J., Neslusan, L., Kokhirova, G. I., and Koseki, M. (2023). The Two-Step Procedure for Naming Meteor Showers - New Nomenclature Rules. In Pajer, U., Kereszturi, A., Steyaert, C., Rendtel, J., Rudawska, R., Verbeeck, C., Gyssens, M., and Ocana, F., editors, *Proceedings of the International Meteor Conference, 2022*, pages 35–39.
- Rudawska, R. and Jenniskens, P. (2014). New meteor showers identified in the CAMS and SonotaCo meteoroid orbit surveys. In Jopek, T. J., Rietmeijer, F. J. M., Watanabe, J., and Williams, I. P., editors, *Meteoroids 2013*, pages 217–224.
- Rudawska, R. and Vaubaillon, J. (2015). Don Quixote-A possible parent body of a meteor shower. *Planet. Space Sci.*, 118:25–27.
- Ryabova, G. O. (2016). A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream. *MNRAS*, 456(1):78–84.
- SAO (2017). Meteor stream. <https://astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/M/Meteor+Stream>. [Online; accessed 28-May-017].
- Seidelmann, P. K. and Urban, S. E. (2010). Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac, Third Edition. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #215*, volume 215 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 475.03.
- Sekanina, Z. (1973). Statistical Model of Meteor Streams. III. Stream Search Among 19303 Radio Meteors. *Icarus*, 18(2):253–284.
- Sekanina, Z. and Chodas, P. W. (2005). Origin of the Marsden and Kracht Groups of Sunskirting Comets. I. Association with Comet 96P/Machholz and Its Interplanetary Complex. *ApJS*, 161(2):551–586.
- Sergienko, M. V., Sokolova, M. G., Nefedyev, Y. A., and Andreev, A. O. (2020). The κ -Cygnid Meteor Shower and Its Relationship with Near-Earth Asteroids. *Astronomy Reports*, 64(12):1087–1092.
- SonotaCo, Masuzawa, T., Sekiguchi, T., Miyoshi, T., Fujiwara, Y., Maeda, K., and Uehara, S. (2021). SNMv3: A Meteor Data Set for Meteor Shower Analysis. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 49(3):64–70.

- Sosa, A. and Fernández, J. A. (2015). Comets 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO): Two possible fragments of a common ancestor? In *IAU General Assembly*, volume 29, page 2255583.
- Southworth, R. B. and Hawkins, G. S. (1963). Statistics of meteor streams. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 7:261.
- Spurný, P. (1993). Geminids from photographic records. In Stohl, J. and Williams, I. P., editors, *Meteoroids and their Parent Bodies*, page 193.
- Spurný, P., Betlem, H., Jobse, K., Koten, P., and van't Leven, J. (2000). New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km. *Meteoritics and Planetary Science*, 35:1109–1115.
- Steel, D. I., Asher, D. J., and Clube, S. V. M. (1991). The structure and evolution of the Taurid complex. *MNRAS*, 251:632–648.
- Steel, D. I. and Baggaley, W. J. (1985). Collisions in the solar system. I - Impacts of the Apollo-Amor-Aten asteroids upon the terrestrial planets. *MNRAS*, 212:817–836.
- Svoren, J., Neslusan, L., and Porubcan, V. (1993). Applicability of meteor radiant determination methods depending on orbit type. I. High-eccentric orbits. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 23:23–44.
- Svoren, J., Neslusan, L., and Porubcan, V. (1994). Applicability of meteor radiant determination methods depending on orbit type. II. Low-eccentric orbits. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 24:5–18.
- Szücs-Csillik, I. (2010). The Lie Integrator and the Hénon-Heiles System. *Romanian Astronomical Journal*, 20(1):49–66.
- Tancredi, G. (2014). A criterion to classify asteroids and comets based on the orbital parameters. *Icarus*, 234:66–80.
- Tholen, D. J. and Barucci, M. A. (1989). Asteroid taxonomy. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, pages 298–315.
- Trigo-Rodríguez, J. M., Llorca, J., and Fabregat, J. (2004). Chemical abundances determined from meteor spectra - II. Evidence for enlarged sodium abundances in meteoroids. *MNRAS*, 348(3):802–810.
- Valsecchi, G. B., Jopek, T. J., and Froeschle, C. (1999). Meteoroid stream identification: a new approach - I. Theory. *MNRAS*, 304:743–750.

- Vaubailion, J., Neslušan, L., Sekhar, A., Rudawska, R., and Ryabova, G. O. (2019). From Parent Body to Meteor Shower: The Dynamics of Meteoroid Streams. In Ryabova, G. O., Asher, D. J., and Campbell-Brown, M. J., editors, *Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond*, page 161. Press.
- Vernazza, P., Binzel, R. P., Thomas, C. A., DeMeo, F. E., Bus, S. J., Rivkin, A. S., and Tokunaga, A. T. (2008). Compositional differences between meteorites and near-Earth asteroids. *Nature*, 454:858–860.
- Vida, D., Brown, P. G., and Campbell-Brown, M. (2017). Generating realistic synthetic meteoroid orbits. *Icarus*, 296:197–215.
- Vida, D., Gural, P. S., Brown, P. G., Campbell-Brown, M., and Wiegert, P. (2020). Estimating trajectories of meteors: an observational Monte Carlo approach - I. Theory. *MNRAS*, 491(2):2688–2705.
- Šegon, D., Gural, P., Andreiæ, Ž., Vida, D., Skokić, I., and Novoselnik, F. (2015). Four possible new high-declination showers. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 43(5):147–150.
- Šegon, D., Gural, P., Andreić, Ž., Skokić, I., Korlević, K., Vida, D., and Novoselnik, F. (2014). A parent body search across several video meteor data bases. In Jopek, T. J., Rietmeijer, F. J. M., Watanabe, J., and Williams, I. P., editors, *Meteoroids 2013*, page 251.
- Weissman, P. R., Bottke, W. F., J., and Levison, H. F. (2002). Evolution of Comets into Asteroids. In *Asteroids III*, pages 669–686.
- Whipple, F. L. (1951). A Comet Model. II. Physical Relations for Comets and Meteors. *ApJ*, 113:464.
- Whipple, F. L. (1963). On the Structure of the Cometary Nucleus. In Kuiper, G. P. and Middlehurst, B. M., editors, *The Moon Meteorites and Comets*, page 639. AA.
- Whipple, F. L. (1983). 1983 TB and the Geminid Meteors. *IAU Circ.*, 3881:1.
- Wiegert, P. and Brown, P. (2005). The quadrantid meteoroid complex. *Icarus*, 179(1):139 – 157.
- Wiegert, P., Clark, D., Campbell-Brown, M., and Brown, P. (2017). Minor Planet 2017 MB₁ and the Alpha Capricornids Meteor Shower. *Central Bureau Electronic Telegrams*, 4415:1.

- Wiegert, P. A., Brown, P. G., Weryk, R. J., and Wong, D. K. (2013). The Return of the Andromedids Meteor Shower. *AJ*, 145(3):70.
- Williams, I. P., Ryabova, G. O., Baturin, A. P., and Chernitsov, A. M. (2004). The parent of the Quadrantid meteoroid stream and asteroid 2003 EH1. *MNRAS*, 355(4):1171–1181.
- Wood, J. (2019). *The Dynamics of Small Solar System Bodies*. SpringerBriefs in Astronomy. Springer International Publishing, Cham.
- Wright, F. W., Jacchia, L. G., and Whipple, F. L. (1957). Photographic δ -Aquarid meteors and evidence for the northern δ -Aquarids. *AJ*, 62:225.
- Yasuo, S. (2022). Jupiter Family Meteor Showers by SonotaCo Network Observations. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 50(2):38–61.
- Ye, Q.-Z. (2018). Meteor showers from active asteroids and dormant comets in near-Earth space: A review. *Planet. Space Sci.*, 164:7–12.
- Ye, Q.-Z., Brown, P. G., and Pokorný, P. (2016). Dormant comets among the near-Earth object population: a meteor-based survey. *MNRAS*, 462(4):3511–3527.