



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Estudio del posible origen común de objetos con órbitas similares

Aplicación al caso de los cometas 169P/NEAT y P/2003
T12 (SOHO)

Santiago Roland Alvarez

Programa de Maestría en Física opción Astronomía
Departamento de Ciencias Físicas, Centro Universitario Regional Este
Universidad de la República

Rocha – Uruguay
Abril de 2026



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Estudio del posible origen común de objetos con órbitas similares

Aplicación al caso de los cometas 169P/NEAT y P/2003
T12 (SOHO)

Santiago Roland Alvarez

Tesis de Maestría presentada al Programa de
Posgrado de Maestría en Física opción Astronomía,
Departamento de Ciencias Físicas de la Universidad
de la República, como parte de los requisitos
necesarios para la obtención del título de Magíster
en Maestría en Física opción Astronomía.

Director:

Dra. Andrea Sosa Oyarzabal

Director académico:

Dra. Andrea Sosa Oyarzabal

Rocha – Uruguay

Abril de 2026

Roland Alvarez, Santiago

Estudio del posible origen común de objetos con órbitas similares / Santiago Roland Alvarez. - Rocha: Universidad de la República, Departamento de Ciencias Físicas, Centro Universitario Regional Este, 2026.

XVI, 77 p.: il.; 29, 7cm.

Director:

Andrea Sosa Oyarzabal

Director académico:

Andrea Sosa Oyarzabal

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa de Maestría en Física opción Astronomía, 2026.

Referencias bibliográficas: p. 60 – 69.

1. cometa, 2. asteroide, 3. fragmentación, 4. dinamica, 5. órbita. I. Sosa Oyarzabal, Andrea, . II. Universidad de la República, Programa de Maestría en Física opción Astronomía. III. Título.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Tabaré Gallardo (presidente)

Lic. Julio Fernandez

Dr. Mauricio Rodriguez

Dr. Romina Di Sisto

Dr. Mario Melita

Rocha – Uruguay
Abril de 2026

Dedicado a Jorge Roland

Lux lucet in tenebris

Agradecimientos

Quisiera agradecer a...

- Sabrina, por ser mi compañera de vida por todo este tiempo.
- A mis hijos, Mateo, Ignacio y Emilia, porque son el orgullo de mi vida.
- A mi madre Isabel, por todo lo que me dió. Espero que estés orgullosa.
- A mi tutora Andrea, por haberme bancado todo este tiempo y por ser tan buena persona.
- A mis colegas del Departamento de Física del CURE, Mauricio, Pablo, Nicasio y Valentina por haberme apoyado todos estos años.
- A CSIC por el apoyo en el marco del proyecto I+D 327 "Estudio de las propiedades físicas y dinámicas de cometas y asteroides que se aproximan a la Tierra" (responsable Dr. Andrea Sosa)
- Al apoyo recibido en el marco del convenio entre el CURE e Intendencia de Montevideo "Evaluación de la transición a LED en el cielo nocturno de Montevideo" (responsables Dr. Andrea Sosa y Arq. Susana Colmegna)
- A Mauricio, Pablo y Andrea integrantes del ex-PDU de Ciencias Físicas por haberme apoyado tanto desde el CURE y haberme permitido ver el surgimiento del Dpto. de Ciencias Físicas
- A Tabaré y Gonzalo por las ideas que me han aportado para realizar mi trabajo de investigación
- A Sebastián y Raúl, por ser los compañeros de viaje desde el OALM
- A Reina, por el apoyo durante todos estos años en formación docente
- A Jimena de PEDECIBA Física, por su disposición y amabilidad conmigo durante todo este tiempo.
- A la barra Undernet/Mastodon, que me acompaña hace mas de 10 años

Ese sentimiento de asombro y admiración que debe despertarse ante la aparición repentina e inesperada de un gran cometa no es en absoluto sorprendente, siendo, según el relato que tenemos de tales eventos, uno de los fenómenos naturales más brillantes e imponentes de todos.

Sir John F. W. Herschel,
Treatise in Astronomy. 1835.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología basada en integraciones numéricas para estudiar cuerpos menores con un posible origen común. Partiendo de información orbital observacional disponible en las bases de datos del JPL/Horizons, investigamos la evolución pasada de pares de objetos con órbitas similares, identificando puntos de interés donde ocurren aproximaciones mutuas a bajas velocidades relativas. En estos puntos implementamos un modelo de fragmentación simple (cuerpo principal + fragmento) para buscar órbitas del fragmento compatibles con las incertidumbres observacionales. La aplicación de este método al caso de los cometas 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO) estudiados previamente por Sosa y Fernández, 2015 y Sosa y Fernández, 2016, cuyas órbitas muestran similitudes notables que sugieren un posible vínculo genético, reveló la existencia de múltiples mínimos simultáneos en distancia y velocidad relativa durante los últimos 10.000 años. Identificamos cuatro épocas favorables para un posible evento de fragmentación, siendo el mínimo más antiguo (94 A.D.) el más prometedor, donde el modelo de fragmentación produjo órbitas que se aproximan significativamente a la órbita actual del P/2003 T12 (SOHO). Las métricas de distancia orbital utilizadas mostraron valores compatibles con un origen común, aunque por fuera de las incertidumbres observacionales actuales del P/2003 T12 (SOHO). El análisis de clones orbitales demostró que la dinámica del sistema se mantiene estable hasta aproximadamente 2000 años en el pasado, momento en que los encuentros con planetas interiores, especialmente Venus, Tierra y Marte, introducen caos y dispersión en las trayectorias. Los mecanismos de fragmentación más plausibles incluyen impactos con asteroides del cinturón principal o causas internas como el estrés térmico, particularmente considerando el estado evolucionado y la baja actividad actual del 169P/NEAT.

Palabras claves:

cometa, asteroide, fragmentación, dinámica, órbita.

ABSTRACT

This work presents a methodology based on numerical integrations to study minor bodies with a possible common origin. Starting from observational orbital information available in the JPL/Horizons databases, we investigate the past evolution of pairs of objects with similar orbits, identifying points of interest where mutual approaches occur at low relative velocities. At these points, we implement a simple fragmentation model (parent body + fragment) to search for fragment orbits compatible with observational uncertainties. The application of this method to the case of comets 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO) - previously studied by Sosa y Fernández, [2015](#) and Sosa y Fernández, [2016](#) whose orbits show notable similarities suggesting a possible genetic link - revealed the existence of multiple minima in relative distance and velocity over the last 10,000 years. We identified four favourable epochs for a possible fragmentation event, with the oldest (94 A.D.) minimum being the most promising. At this point, the fragmentation model produced orbits that approach the current orbit of P/2003 T12 (SOHO) significantly. The orbital distance metrics used showed values compatible with a common origin, albeit outside the current observational uncertainties of the fragment. The analysis of orbital clones demonstrated that the system's dynamics remain stable until approximately 2000 years into the past, at which point encounters with the inner planets - especially Venus, Earth, and Mars - introduce chaos and dispersion into the trajectories. The most plausible fragmentation mechanisms include impacts with main-belt asteroids or internal causes such as thermal stress, particularly considering the evolved state and low activity of 169P/NEAT.

Keywords:

comet, asteroid, fragmentation, dynamic, orbit.

Lista de figuras

1.1	Esquema de la formación del Sistema Solar a partir de la contracción de la nebulosa solar y acreción de planetesimales. Extraído del libro <i>The Formation and Evolution of the Solar System</i> de Marov, 2018.	2
1.2	Imagen del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko tomado por la sonda Rosetta en 2014. Fuente: European Space Agency/Rosetta	4
1.3	Gráfico de los cinturones de asteroides principal MBA (izquierda) y trans-neptuniano TNB (derecha) extraído de http://w3.phys.nthu.edu.tw/~hkchang	6
1.4	Esquema ilustrativo de las órbitas de los NEOs en comparación con las órbitas de la Tierra, Marte y Júpiter.	8
1.5	Cometa C/2000 WM1 (LINEAR) desde el Observatorio Los Molinos por R. Salvo y S. Roland. Extraído del libro <i>Comets, Nature, Dynamics, Origin, and their Cosmogonical Relevance</i> de Fernández, 2005	10
1.6	Taxonomía de cometas, Levison 1996	13
1.7	Foto-composición del radiante de la lluvia Draconids de 1985 por la <i>Nippon Meteor Society</i> . Extraído del libro <i>Meteor Showers and their parent comets</i> , Jenniskens, 2007	16
1.8	Diagrama Inclinación ($^{\circ}$) vs Semi-eje mayor (au) de los asteroides del cinturón principal, donde se ven las principales familias asteroidales. Extraído del libro <i>Planetary Sciences</i> de de Pater y Lissauer, 2015.	19

1.9	Esquema representativo de los elementos orbitales osculantes semi-eje mayor (a), excentricidad (e), inclinación (i), argumento de perihelio (ω) y longitud de nodo ascendente (Ω). Fuente: Catalina Sky Survey: https://catalina.lpl.arizona.edu	23
1.10	Modelo de rubble pile de núcleo cometario. Extraído de: Samarasinha, 2001	25
1.11	Fragmentación del cometa D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) inducida por la acción de fuerzas de marea con Júpiter. Extraído de Levy, 1998.	27
1.12	Cometa 157P/Tritton posiblemente fragmentado debido a inestabilidad rotacional de su núcleo. Imagen extraída de Luu & Jewitt 2025	28
1.13	Gráfico de Período vs Radio y demarcación de zonas seguras e inestables para el estado rotacional de los núcleos cometarios. La densidad utilizada es la obtenida por (Greenberg et al. 1995) para el cometa Shoemaker-Levy 9 de $\rho = 300kg/m^3$ y asumiendo núcleos esféricos. Extraído de Toth y Lisse, 2006	29
1.14	Fragmentación por estrés térmico del cometa C/2012 S1 (ISON). Imagen tomada con la cámara wide de la ESA/NASA Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Fuente: https://science.nasa.gov/solar-system/comets/c-2012-s1-ison/	30
1.15	Esquema de la generación de jets (a) y expulsión de un fragmento (b) producto de la confluencia de grietas formadas por el estrés térmico en los núcleos cometarios. Extraído de Tauber y Kührt, 1987	31
1.16	Imagen del cometa C/1999 S4 (LINEAR) tomada con la Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC 2) del telescopio Espacial Hubble cuya fragmentación podría ser explicada por la presión interna de gases super-volátiles (Samarasinha, 2001). Imagen extraída de Weaver et al. 2001.	32
1.17	Simulación de la presión de gas y presión gravitatoria para el cometa 1P/Halley conforme pasan las revoluciones y se conforma la costra de material en la superficie. Bajo ciertas circunstancias, la presión del gas puede ser hasta un orden de magnitud mayor que la gravitatoria. Imagen extraída de Kührt y Keller, 1994	33

1.18	Imagen del cometa 354P/LINEAR luego de la fragmentación inducida por impactos. Extraída de ESA/Hubble: https://esahubble.org/images/opo1007a/ y publicada en Jewitt et al. 2010.	34
1.19	Diagrama de curvas de velocidad de impacto en km/s de un cometa con una a , e dadas y con $i = 0$, con un asteroide típico en órbita circular con un semi-eje mayor $a=2.06$ correspondiente al borde interior del MBA. Extraído de Beech y Gauer, 2002 . . .	35
1.20	El gran cometa de 1882 o C/1882 R1 un cometa de la familia de Kreutz. Dibujo de los fragmentos del A al D, por C. L. Prince., publicado en el libro <i>The Story of the Comets</i> de Barnard, 1910.	38
1.21	Árbol genealógico modelo para la fragmentación jerárquica de superfragmentos en Sekanina y Chodas, 2004.	39
3.1	Órbitas del 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO) en el Orbit Viewer del JPL-Horizons	48
3.2	Gráfico de Período vs. Radio y demarcación de zonas seguras e inestables para el estado rotacional de los núcleos cometarios. El punto rojo indica el cometa 169P/NEAT asumiendo núcleo esférico de radio ~ 2.3 km y un período rotacional de ~ 8 hs como se desprende de la tabla (3.8). Extraído y adaptado de Toth & Lisse 2006	54
3.3	Diagrama de contornos de velocidades de impacto en km/s de un cometa con una a, e dadas y con $i=0^\circ$, con un asteroide típico en órbita circular con un semi-eje mayor $a=2.06$ correspondiente al borde interior del MBA. El punto rojo es el correspondiente a un cometa similar al 169P/NEAT con $i=0^\circ$. Extraído y adaptado de Beech y Gauer, 2002	55
3.4	Magnitud de la tensión producto del estrés térmico modelado para diferentes proporciones composicionales en la superficie del cometa 67/Churyumov-Gerasimenko para latitudes de 60° (arriba) y ecuatoriales (abajo). 0 y 1 corresponden al afelio y 0.5 al perihelio. Extraído de Attree, N. et al. 2018	59

Lista de tablas

1.1	Tabla de cometas progenitores de algunas lluvias de meteoros. (L = LPC, H = HTC, J = JFC). Extraído y ampliado de Jenniskens, 2007.	17
1.2	Grupos de cometas de los cuales se conoce un vínculo dinámico o que son fragmentos de un progenitor común. Extraído y ampliado de Fernández, 2005.	24
1.3	Velocidades de fragmentación típicas de las componentes con respecto al cuerpo progenitor por varios autores.	40
1.4	Tabla con las incertidumbres orbitales del 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO). Valores extraídos del JPL/Horizons	41
1.5	Elementos orbitales keplerianos y componentes cartesianos, considerados en las integraciones numéricas con Mercury	41
1.6	Parámetros de las integraciones numéricas con Mercury6	42
1.7	Matriz de covarianza de los elementos orbitales del cometa P/169 NEAT utilizada para la generación de los clones	44
3.1	Tabla con las distancias o separacion orbital D_{SH} , D_D y D_H entre el P/2003 T12 (SOHO) y los mejores fragmentos para los 4 mínimos estudiados junto con el 169P/NEAT para comparación.	50
3.2	Criterios de distancia utilizados para diferentes problemas. Southworth & Hawkins D_{SH} , Drummond D_D , Kholshchevnikov ρ_2, ρ_3, ρ_4	50
3.3	Estimación del tamaño nuclear del 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO) a partir de diferentes modelos de magnitud absoluta	51
3.4	Estimación de la masa utilizando una densidad de $\rho \sim 400kg/m^3$ Sosa y Fernández, 2009	51

3.5	Estimaciones de masa del stream de las α -Capricornidas. Los valores obtenidos por Jenniskens y Vaubaillon, 2010 se calcularon utilizando una densidad más alta $\rho \sim 1000kg/m^3$	52
3.6	Tabla con densidades cometarias obtenidos de ajustes observacionales y de modelos teóricos por varios autores.	52
3.7	Tabla comparativa de las distancias de encuentro d_e del cometa 169P/NEAT con los planetas interiores y Júpiter en el período estudiado de 10000 años, expresadas en términos del Límite de Roche R_{Ro} y el Radio de Hill R_{Hi} para cada planeta, tomando una densidad para el cometa de $\rho_c=400 kg/m^3$	53
3.8	Tamaños y períodos publicados para el 169P/NEAT	53
3.9	Probabilidad de impacto de un asteroide de 0.5m con otros NEJFC con similares características orbitales que el 169P/NEAT. Extraído de Beech y Gauer, 2002	55
3.10	Comparación de las órbitas del 67P/Churyumov-Gerasimenko y el 169P/NEAT.	56
1.1	Lista de cometas fragmentados, tipo de cometa, parámetro de Tisserand y posibles causas de fragmentación. FM = Fuerzas de marea; Int/Desc = Interna o Desconocida; ET = Estrés Térmico; IR = Inestabilidad Rotacional. Los cometas indicados con (D) se desvanecieron repentinamente sin observarse fragmentos	75

Tabla de contenidos

Lista de figuras	X
Lista de tablas	XIII
1 Introducción	1
1.1 Cuerpos menores del Sistema Solar	5
1.2 Asteroides	5
1.2.1 Objetos cercanos a la Tierra o NEOs	6
1.3 Cometas	8
1.3.1 Clasificación de cometas	10
1.3.2 Cometas nuevos y retornantes	12
1.3.3 Cometas de la Familia de Júpiter	12
1.4 Meteoroides	14
1.4.1 Cometas progenitores de lluvias	15
1.5 Origen común de cuerpos menores	15
1.5.1 Familias de asteroides	19
1.5.2 Criterios o métricas de distancia orbital	20
1.5.3 Fragmentación cometaria	23
1.6 Mecanismos para la fragmentación	26
1.6.1 Fuerzas de marea	26
1.6.2 Inestabilidad rotacional	28
1.6.3 Estrés térmico	29
1.6.4 Presión interna de gases	32
1.6.5 Impactos	34
1.6.6 Modelos dinámicos	36
1.6.7 Velocidades de fragmentación	39
1.7 Método	39
1.7.1 Bases de datos del JPL/Horizons	40

1.7.2	Integraciones numéricas	40
1.7.3	Parámetros no gravitacionales	42
1.8	Incertidumbre orbital	43
1.9	Generación de clones	43
1.10	Mapas de densidad	45
2	Artículo N^o1: Comet P/2003 T12 (SOHO): A possible fragment of comet 169P/NEAT?	46
3	Análisis y Conclusiones	47
3.1	Probabilidad de alineamiento orbital	47
3.2	Evolución orbital y encuentros	48
3.3	Épocas posibles de fragmentación	49
3.3.1	Estimaciones de algunos parámetros físicos	51
3.4	Consideraciones finales	56
	Referencias Bibliográficas	60
	Glosario	73
	Apéndices	74
Apéndice 1	Fragmentaciones cometarias	75

Capítulo 1

Introducción

El Sistema Solar está compuesto por el Sol y los objetos que orbitan entorno a él bajo su influencia gravitacional. Durante la formación estelar en la nebulosa solar, por conservación del momento angular se formó un disco [proto-planetario](#) de gas y polvo que sirvió de reservorio de material para la [acreción](#) planetaria y formación del sistema que hoy conocemos. En este disco se observa un gradiente composicional con dirección radial en el que los elementos y compuestos químicos más refractarios (con un punto de fusión más alto), fueron condensando a distancias más cercanas del Sol y los elementos más livianos, lo fueron haciendo en regiones más alejadas de la estrella. Las partículas condensadas luego fueron agrupándose y acumulándose en pequeños gránulos que posteriormente darían lugar a cuerpos kilométricos conocidos como [planetesimales](#) (Safronov, 1972). Estos planetesimales presentes en el disco proto-planetario van a aglomerarse mutuamente por atracción gravitatoria, en lo que se conoce como el proceso de acreción que se ilustra en la figura (1.1). La acreción de planetesimales luego conllevará a la formación de proto planetas que evolucionarán dinámicamente para estabilizar sus órbitas y consolidar la acreción de material, o simplemente ser eyectados del sistema o colisionar con otros proto-planetas. Algunos de estos embriones planetarios se formarán a las distancias en semiejes mayores similares a los de los [planetas](#) actuales y otros migrarán a nuevas posiciones debido a interacciones físicas entre los proto-planetas, el disco y la radiación estelar (Armitage, 2025)

Sucesivas interacciones de los planetas entonces formados, con gran parte de los planetesimales que permanecen en el disco pero que no han formado

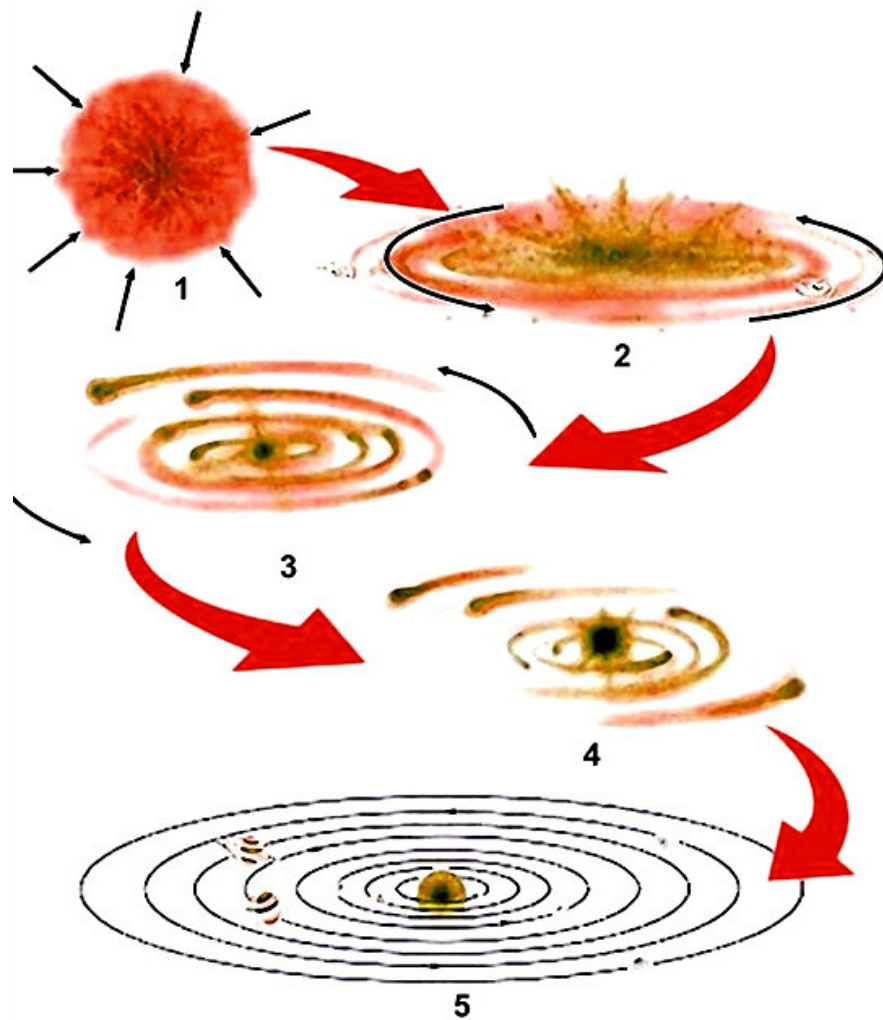


Figura 1.1: Esquema de la formación del Sistema Solar a partir de la contracción de la nebulosa solar y acreción de planetesimales. Extraído del libro *The Formation and Evolution of the Solar System* de Marov, 2018.

planetas, limpiarán el disco eyectando los planetesimales fuera del sistema, haciéndolos colisionar contra el Sol o contra otros planetas del propio sistema. Durante esta etapa de limpieza suelen incrementarse las tasas de impactos, tal como se observa en la superficie lunar donde se evidencia un período conocido como el *bombardeo tardío* determinado gracias al estudio de las densidades de cráteres en la superficie lunar (Bottke y Norman, 2017).

Los planetas no son los únicos que sobreviven a la formación del sistema si no que hay todavía un sin fin de objetos más pequeños que por diferentes razones

sobrevive, ya sea porque evoluciona en zonas menos caóticas y de alguna manera, protegidas dinámicamente, esto es a grandes rasgos, libre de la influencia de los planetas mayores, como es el caso del Cinturón Principal de Asteroides (MBA) o también porque se han localizado o dispersado en regiones más distantes, como es el caso del Cinturón Trans-Neptuniano o Cinturón de Kuiper (TNB) y población del disco dispersado (SDO) o los cometas de la fría y lejana Nube de Oort (Woolfson, 2000).

Los cuerpos menores son una parte muy importante en el estudio del Sistema Solar, dado que cada uno de ellos guarda consigo un vestigio o una huella de la formación del sistema, ya sea un asteroide rocoso del Cinturón Principal cercano al Sol, un cuerpo helado en el Cinturón Trans-Neptuniano o un cometa. Esto es debido a que el material de estos objetos pequeños no ha sido sometido a procesos de diferenciación (esto es, a grandes presiones y temperaturas), lo cual pasaría con el material de un planeta mayor, donde la autogravedad somete al material primordial a grandes presiones y temperaturas alterando su estructura molecular y composicional y borrando así sus propiedades originales. Por otro lado, de la luz solar reflejada por los cuerpos menores se puede obtener información de su órbita mediante un análisis [astrométrico](#) de su posición en el cielo, y también información de sus propiedades físicas mediante un análisis [fotométrico](#) y [espectrométrico](#) de la misma luz.

Las misiones espaciales han aportado observaciones directas, como se ejemplifica en la figura (1.2) y han tomado muestras *in situ* de varios objetos poniendo a prueba los diferentes modelos teóricos sobre la estructura de estos cuerpos, sus superficies e interiores (Snodgrass et al. 2024).

Las simulaciones numéricas permiten recolectar información dinámica y estadística de los posibles escenarios pasados y futuros que respalden los diferentes modelos de formación y evolución dinámica de los mismos y así comprender las escalas de tiempo de vida de los diferentes objetos del Sistema Solar.

Un ejemplo bien claro son los cometas (como se ve en la figura 1.2), objetos mayormente compuestos por hielo de agua y polvo, que al aproximarse al Sol, la sublimación de los hielos superficiales hace desplegar enormes colas de gas y polvo de millones de kilómetros de extensión por el espacio. El estudio dinámico de los cometas muestra que la gran mayoría sobrevive tan solo una fracción del tiempo de vida del Sistema Solar, por lo que entonces, los objetos que observamos no han estado siempre allí. Si no han estado siempre allí, entonces

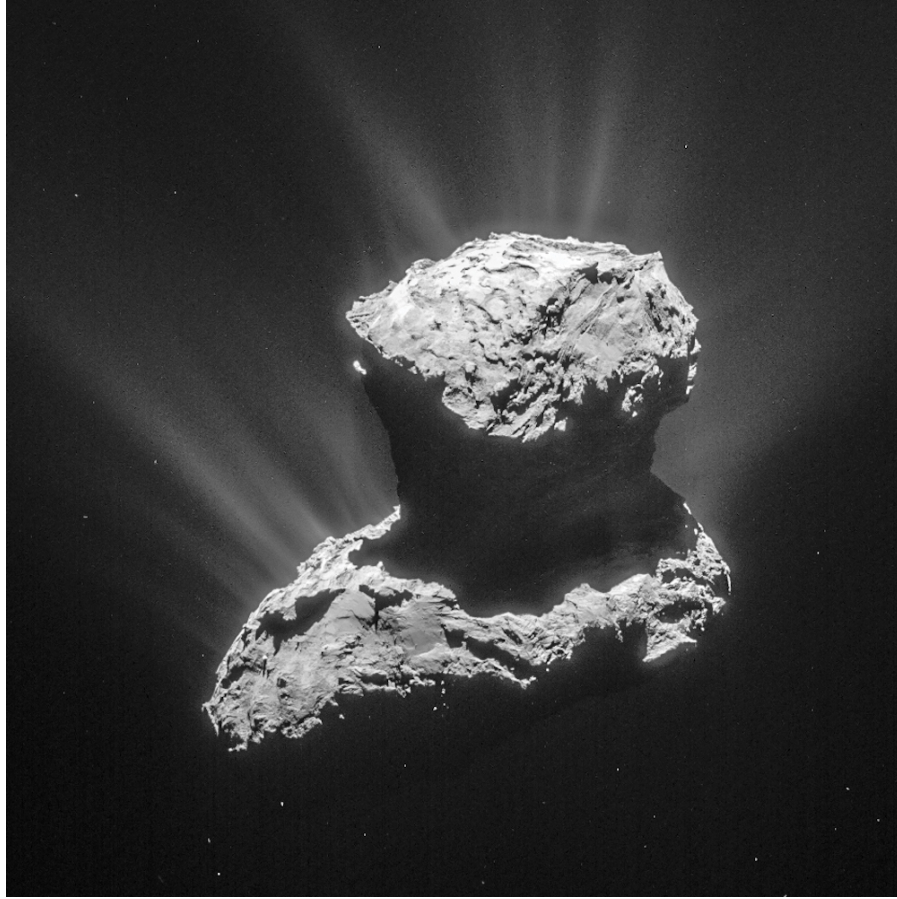


Figura 1.2: Imagen del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko tomado por la sonda Rosetta en 2014. Fuente: European Space Agency/Rosetta

existe algún mecanismo por el cual una cierta tasa de objetos migra hacia la región planetaria interior para volverse visibles tal como se observa en la actualidad. Esto significa que existe un reservorio de estos objetos en algún lugar, que está inyectando objetos constantemente hacia la región planetaria interior. Por medio de integraciones numéricas de las órbitas de estos cuerpos se puede confirmar la existencia de estos reservorios (Fernández, 1980, Duncan et al. 1988, Morbidelli, 2005, Di Sisto et al. 2009).

Los cuerpos menores no solamente pueden provenir de reservorios alejados, como la nube de Oort o el cinturón trans-neptuniano, sino que pueden migrar de otras poblaciones que pueden funcionar como reservorios también. Este es el caso del cinturón principal de asteroides del que pueden transferirse objetos hacia otras regiones más interiores, como es el caso de los asteroides cercanos

a la Tierra o [NEOs](#).

1.1. Cuerpos menores del Sistema Solar

Existen varias categorizaciones y clasificaciones de los diferentes objetos del Sistema Solar. Las mismas se han ido modificando a lo largo de la historia de la astronomía, conforme los avances en la ciencia han permitido conocer mayor cantidad de objetos y nuevas propiedades de estos cuerpos celestes. La propia imagen del Sistema Solar ha sido puesta en disputa por las diferentes cosmovisiones y paradigmas que se han ido imponiendo sobre otros, a lo largo de la historia.

En el mes de agosto del año 2006 fueron votadas y aprobadas las resoluciones 5A "Definition of 'planet'" y 6A "Definition of Pluto-class objects" en las que se acordó la definición de Planeta, Planeta Enano y Cuerpo Menor del Sistema Solar (SSSB) <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0603/>. Los cuerpos menores del sistema solar o simplemente cuerpos menores, son todos aquellos objetos que no son ni planetas, ni planetas enanos ni satélites, lo que comúnmente conocemos como [asteroides](#), [cometas](#) y [meteoroides](#).

1.2. Asteroides

El reservorio principal de asteroides es el Cinturón Principal o MBA por sus siglas en inglés, entre las órbitas de Marte y Júpiter, del cual su primer integrante se descubrió en 1801 y fue el asteroide hoy conocido como 1 Ceres descubierto por Giuseppe Piazzi en el Observatorio de Palermo en Italia. Los asteroides son remanentes de la formación del Sistema Solar que han permanecido estables en el tiempo, esto es en la escala de tiempo de vida del sistema de unos 4.6 Gy. Estos objetos se encuentran en órbitas estables y la permanencia de éstos a lo largo de la vida del Sistema Solar es un testigo de la formación del mismo y de ahí el interés por estudiarlos. Los asteroides no han permanecido intactos durante todo este tiempo, pues han sido sometidos a radiación solar, evolución colisional y procesos de diferenciación para el caso de los objetos más grandes. Entender estos procesos que han modificado tanto físicamente la estructura de estos objetos, como dinámicamente las estructuras del propio reservorio, puede aportar información relevante para comprender la formación

propia del Sistema Solar (Weissman et al. 1999, de Pater y Lissauer, 2015).

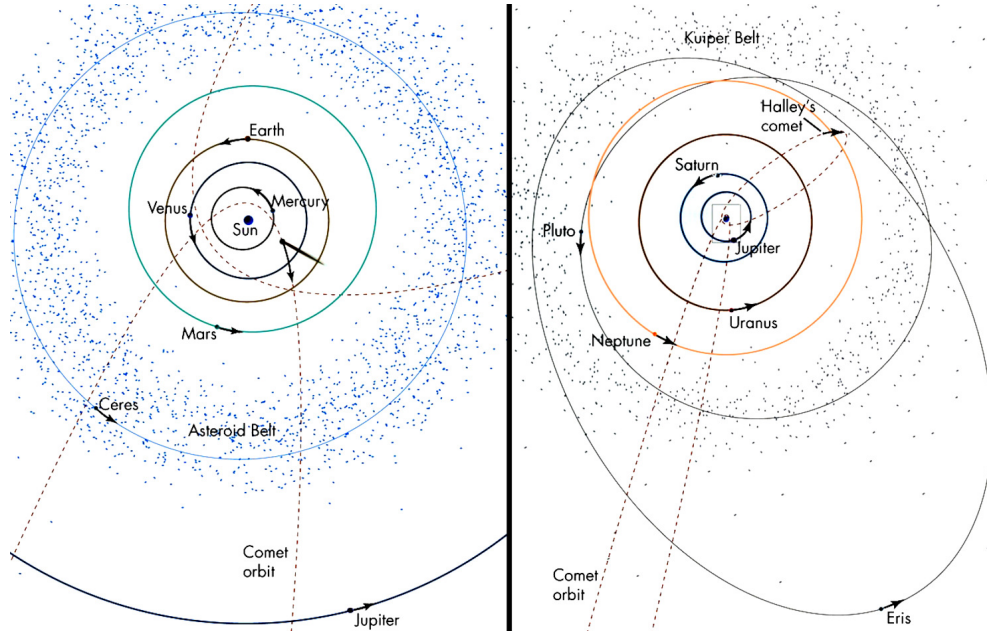


Figura 1.3: Gráfico de los cinturones de asteroides principal MBA (izquierda) y trans-neptuniano TNB (derecha) extraído de <http://w3.phys.nthu.edu.tw/~hkchang>

El MBA no es el único reservorio de cuerpos menores que existe. En la segunda mitad del siglo XX se comenzó a especular sobre la existencia de objetos más allá de la órbita de Neptuno y Plutón (entonces el noveno planeta), entre ellos, Kenneth Edgeworth y Gerard Kuiper (McFarland, 1996 y Kuiper, 1951) representados en la figura (1.3). Algunas décadas pasaron sin que se descubrieran estos objetos predichos hasta que Julio Fernández (Fernández, 1980) presentó las primeras evidencias teóricas de la existencia de un cinturón de cometas más allá de la órbita de Neptuno, que debería existir para explicar el influjo de cometas de corto período observados, en adelante denominados cometas de la familia de Júpiter o JFCs.

1.2.1. Objetos cercanos a la Tierra o NEOs

Existen cuerpos menores que se aproximan a la Tierra, es decir, sus órbitas han evolucionado más allá del cinturón principal (MBA) y llegan a las inmediaciones de la Tierra y Marte. Formalmente cualquier objeto que cumpla que

su distancia perihélica esté dentro de la órbita de Marte ($q < 1.3\text{ua}$), será considerado un NEO (Near Earth Object) o NEA (Near Earth Asteroid), incluso cometas que provengan de regiones exteriores al MBA, en ese caso serán denominados Near-Earth Comets o NECs y se pide adicionalmente que el período orbital (P) sea $P < 200$ años. La distancia de **afelio** (Q) de los NEOs puede llegar hasta las 5.2 ua tomando como límite la órbita de Júpiter.

Existe una sub-clasificación de los NEOs de acuerdo a la forma de su órbita que se muestra en la figura (1.4) y que define 4 clases:

- NEAs: $q < 1.3\text{ua}$
 - Atiras: $a < 1$ & $Q < 0.983$ ua: NEAs cuyas órbitas están completamente contenidas dentro de la órbita de la Tierra (nombrados por el asteroide 163693 Atira).
 - Atens: $a < 1$ & $Q > 0.983$ ua: NEAs que cruzan la órbita terrestre, con ejes semi-mayores menores que el de la Tierra (nombrados por el asteroide 2062 Aten).
 - Apollos: $a > 1$ & $q < 1.017$ ua: NEAs que cruzan la órbita terrestre, con ejes semi-mayores mayores que el de la Tierra (nombrados por el asteroide 1862 Apollo).
 - Amors: $a > 1$ & $1.017 \text{ ua} < q < 1.3$ ua: NEAs que se aproximan a la Tierra, con órbitas exteriores a la terrestre pero interiores a la de Marte (nombrados por el asteroide 1221 Amor).
- PHAs: $\text{MOID} \leq 0.05$ au & $H \leq 22.0$: Asteroides Potencialmente Peligrosos (Potentially Hazardous Asteroids): NEAs cuya Distancia Mínima de Intersección Orbital (MOID) con la Tierra es < 0.05 ua y cuya magnitud absoluta (H) es < 22.0

Los NEAs mayormente han evolucionado del reservorio del cinturón principal MBA producto de la evolución colisional de los asteroides, aunque un $\sim 15\text{-}17\%$ lo ha hecho de la población de cometas de la familia de Júpiter JFCs (Di Sisto et al. 2009, Fernández et al. 2014). La importancia de su estudio es, además de la misma que los asteroides y cometas en general, importante porque arrojan información sobre los procesos dinámicos del sistema y además por el riesgo ambiental que significan aquellos cuerpos potencialmente peligrosos (PHAs) en escenarios de colisión con la Tierra.

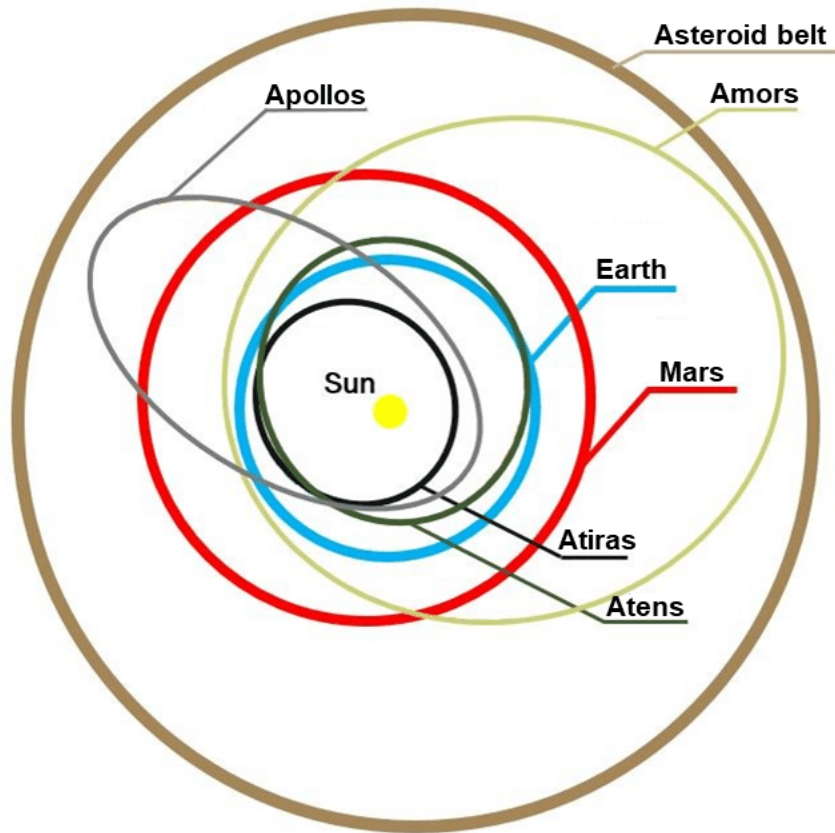


Figura 1.4: Esquema ilustrativo de las órbitas de los NEOs en comparación con las órbitas de la Tierra, Marte y Júpiter.

1.3. Cometas

Los cometas están compuestos por silicatos como los asteroides, pero a diferencia de éstos, contienen además hielo de agua y otros compuestos volátiles (Guilbert-Lepoutre et al. 2024). El tamaño de los mismos es en general bastante menor al de los asteroides, de hecho el cometa más grande, el cometa Hale-Bopp tendría tan solo algunas decenas de kilómetros, habiendo asteroides con tamaños de un orden de magnitud mayor (Seargent, 2009, Weissman et al. 1999).

Sin embargo los cometas fueron descubiertos varios siglos antes que los asteroides y esto es debido a que en general, exhiben órbitas excéntricas y distancias de **perihelio** en la región interior del Sistema Solar y en algunos casos muy cerca del Sol, haciendo que su brillo aparente pueda llegar a ser muy grande

y por ende, visibles a simple vista, no tanto por su cercanía al Sol si no por los procesos físicos que desencadena este acercamiento a la estrella de nuestro sistema (ver figura 1.5). En los momentos cercanos al perihelio los cometas generalmente subliman parte de sus volátiles desprendiendo partículas de gas y polvo de su superficie, desplegando una cola y coma cometarias que también reflejan la luz del Sol, incrementando su brillo aún más. La mayoría de los cometas tienen órbitas cuasi-parabólicas o de un solo pasaje y otros, tienen órbitas periódicas, de algunos pocos años. Los cometas de un solo pasaje o cuasi-parabólicos, tienen períodos correspondientes a decenas de miles de años y semiejes mayores de algunos miles de unidades astronómicas (de Pater y Lissauer, 2015, Weissman et al. 1999). Los cometas hiperbólicos, aquellos con una excentricidad notoriamente mayor a 1, también son de un solo pasaje, pero se tratan de objetos interestelares tales como el 1I/'Oumuamua, 2I/Borisov o 3I/ATLAS que no están ligados gravitacionalmente al Sistema Solar. Existen cometas cuasi-parabólicos provenientes de la Nube de Oort que inicialmente sus determinaciones orbitales arrojan valores de excentricidad espúreos, levemente mayores a 1, pero no son objetos interestelares.

En la década de 1950 el astrónomo Jan Oort utilizó esta información para determinar que entonces, estos cometas deberían provenir de un reservorio en los confines del Sistema Solar que hoy lleva su nombre como la Nube de Oort (Oort, 1950). Para el caso de los cometas periódicos, estudios de su dinámica mediante simulaciones numéricas indican que de ninguna manera podrían haber estado allí desde la creación del Sistema Solar (no como los asteroides del cinturón principal cuyas órbitas son más estables y regulares) y por lo tanto, un influjo constante de estos cometas, también debería provenir entonces de un reservorio, diferente a la Nube de Oort, que se conoce hoy en día como el Cinturón Trans-Neptuniano o región trans-neptuniana (Fernández, 1980).

La clasificación de los cometas no es tan fácil como la de los asteroides, ya que por ejemplo, no existen claros agrupamientos o divisiones en sus parámetros orbitales. Las órbitas cometarias presentan un gran rango de excentricidades, semiejes e inclinaciones haciendo difícil abordar intentos de *clustering* con parámetros netamente orbitales más que por su período orbital. También al ser los cometas, generalmente, más pequeños en tamaño que los asteroides pero con la diferencia de que tienen volátiles presentes que subliman cuando los mismos se acercan al Sol, durante el corto período que estarán accesibles para la observación astronómica, estarán activos, rodeados de una coma y cola de



Figura 1.5: Cometa C/2000 WM1 (LINEAR) desde el Observatorio Los Molinos por R. Salvo y S. Roland. Extraído del libro *Comets, Nature, Dynamics, Origin, and their Cosmogonical Relevance* de Fernández, [2005](#)

gas y polvo, haciendo que sea imposible observar y caracterizar directamente las superficies y sus espectros, como en los asteroides. También ocurre que los parámetros que caracterizan la actividad de los cometas, como las tasas de producción de polvo, etc, son muy diferentes entre cometas por lo que tampoco es posible un abordaje taxonómico con estos parámetros físicos variables y muchas veces desconocidos (Boehnhardt, [2004](#)).

1.3.1. Clasificación de cometas

Históricamente los cometas se han clasificado de acuerdo a su período orbital, pero esto no es conveniente ya que, además de ser una definición arbitraria, el período de un cometa puede cambiar en un corto período de tiempo, si se

producen cambios orbitales, por lo que el período no es una cantidad o característica invariante. Sin embargo, de la teoría del problema restringido de tres cuerpos, puede definirse el parámetro de [Tisserand](#) (ecuación 1.1), que representa la energía del cuerpo bajo la interacción del Sol y el planeta principal, en este caso, Júpiter (Murray y Dermott, 1999).

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_J}(1 - e^2)} \cos i \quad (1.1)$$

El parámetro de Tisserand depende de los semi-ejes mayores de Júpiter a_J y el cometa a , la excentricidad del cometa e y la inclinación con respecto a la órbita joviana i . T_J también está relacionado con la velocidad al infinito U en el sistema planetocéntrico, como se indica en la ecuación (1.2) según Morbidelli, 2005.

$$U = \sqrt{3 - T_J} \quad (1.2)$$

Afortunadamente este parámetro se mantiene razonablemente constante durante la vida de los cometas por lo que es natural intentar clasificarlos de acuerdo a su valor. Levison, 1996 propone una clasificación de cometas utilizando el parámetro de Tisserand que se muestra a continuación, aunque otros autores proponen ajustes y mejoras como se desarrollará más adelante (ver figura 1.6).

- Cometas Cuasi-Isotrópicos ($T_J < 2$): Son cometas cuyas inclinaciones son más bien isotrópicas.
 - $a > 10000$ au: Cometas nuevos isotrópicos
 - $a < 10000$ au
 - $a > 40$ au: Cometa retornante externo
 - $a < 40$ au: Cometa tipo Halley
- Cometas Eclípticos ($T_J > 2$): Son cometas cuyas inclinaciones generalmente son bajas con respecto al plano medio del Sistema Solar.
 - Cometas de la Familia de Júpiter (JFC) $2 < T_J < 3$
 - Cometas con ($T_J > 3$):
 - Cometas tipo Chiron ($a > a_J$): Sus orbitas son exteriores a la órbita de Júpiter.

- Cometas tipo Encke ($a < a_J$): Sus órbitas son completamente interiores a la órbita de Júpiter.

1.3.2. Cometas nuevos y retornantes

Cuando los cometas de la Nube de Oort son perturbados hacia la región planetaria, aproximadamente la mitad, será eyectado del sistema. Luego la otra mitad, serán o cometas nuevos o retornantes. La distinción que se hace entre los cometas nuevos y retornantes, o sea los que por primera vez y los que han ingresado con anterioridad; se desprende del hecho que los cometas cuando ingresan por primera vez, exhiben un semieje mayor $a \sim 10^4$ ua, natural si se trata de un cometa proveniente de la Nube de Oort. Una vez que el cometa hace su primer pasaje, muy difícilmente su semi-eje mayor volverá a tener ese valor. Generalmente los semi-ejes decrecen a $a \sim 10^3$ ua y esto es porque cuando el cometa está lejos en la Nube de Oort, su energía orbital es del orden de $E \sim 10^{-4}$ ua⁻¹. Cuando el cometa se aproxima al perihelio, su energía cambia por un factor igual a la relación de masas entre Júpiter y el Sol, que es del orden de $\times 10^{-3}$. Este cambio es debido a que el cometa tiene inicialmente un movimiento baricéntrico cuando está lejos y una vez en la región planetaria su movimiento será heliocéntrico, como se explica en Morbidelli, 2005.

1.3.3. Cometas de la Familia de Júpiter

Dentro de la clasificación de cometas de Levison, 1996 basada únicamente en el valor del parámetro de Tisserand, se introduce una nueva categoría de *cometas eclípticos* y una sub-clase de éstos llamada cometas tipo Encke, donde el único objeto es el mismo cometa 2P/Encke. Esta categorización es revisada por Tancredi et al. 2006 donde se propone una definición de los cometas de la familia de Júpiter, como aquellos con $2 < T_J < 3.1$, argumentando dinámicamente que el valor del parámetro de Tisserand, puede tomarse hasta $T_J < 3.1$ debido al apartamiento del caso ideal del problema restringido de tres cuerpos que supone la excentricidad del planeta real y que permite que hayan todavía, encuentros con Júpiter a $T_J < 3.1$. Asimismo también se propone un sub-grupo denominado *Centauros* que son objetos con $T_J > 3.1$ que presentan actividad cometaria y que además cumplen $q > Q_J$ y $a < a_N$. Se trata de cuerpos que por el momento, no tienen encuentros con Júpiter y se encontrarían en transición

entre las órbitas de Júpiter y Neptuno para convertirse finalmente en cometas de la familia de Júpiter.

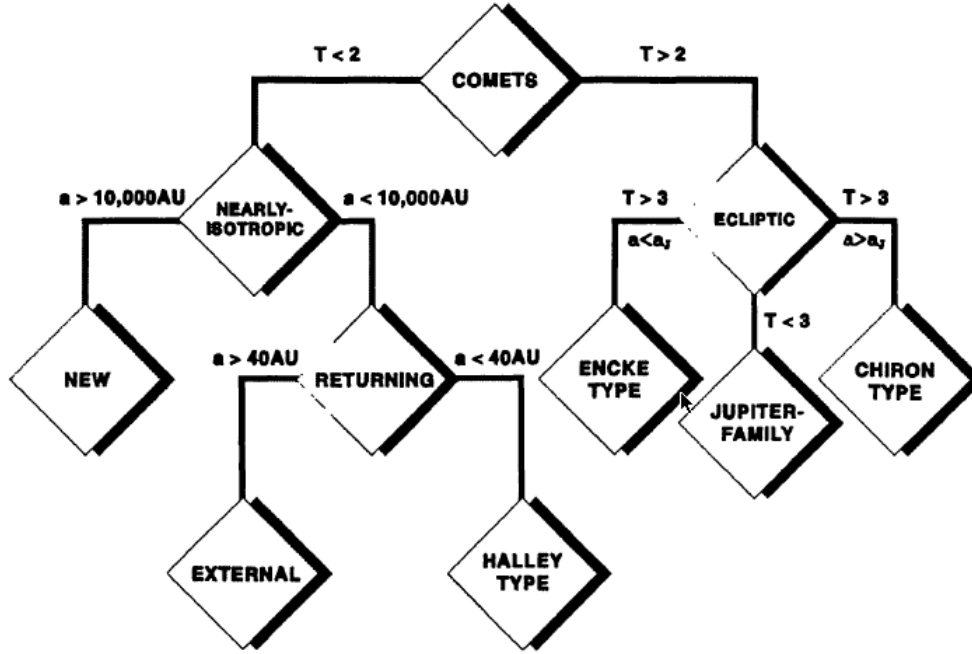


Figura 1.6: Taxonomía de cometas, Levison 1996

El caso del cometa 2P/Encke parece ser un caso excepcional, dado que si bien cumpliría con la definición de JFC con $T_J = 3.022$ y un período de 3.3 años, es distinto dinámicamente a los JFCs dado que su órbita está completamente dentro de la de Júpiter y es difícil explicar su existencia aunque algunos trabajos han propuesto mecanismos para explicar el desacople de 2P/Encke, como lo son mecanismos dinámicos que permitan migrar objetos a esa región (Levison et al. 2006), o la acción prolongada de [fuerzas no gravitacionales](#) (Fernández et al. 2002).

Como generalidad sobre los JFC podemos decir que sus órbitas tienen encuentros con Júpiter y en particular los que tienen un T_J próximo a 3, tienen velocidades de encuentro bajas y los encuentros pueden ser muy fuertes como se indica en la ecuación (1.2). Una parte de la población de JFCs (del orden de un $\sim 30\%$) será visible, esto es decir, se acercará con distancias de perihelio $q < 2.5$ au, tomado como valor umbral para que comience la sublimación de

los volátiles (Levison y Duncan, 1994). Algunos JFCs pueden transitar hacia la región más interna del Sistema Solar y volverse near-Earth JFC o NEJFC, esto es, cuando su distancia de perihelio toma valores $q < 1.3$ ua. Las escalas de tiempo de vida de los JFCs son del orden de 10^5 años y para aquellos que transitan hacia la región interior del sistema planetario, como los NEJFCs, son del orden de 10^3 - 10^4 años (Levison y Duncan, 1997, Di Sisto et al. 2009).

Otra particularidad de los JFCs es que al tratarse de cometas de corto período, en sus sucesivos pasajes cerca del Sol, sus volátiles se van agotando y su superficie activa se va reduciendo. Los volátiles expelen partículas sólidas que vuelven a caer por acción de la fuerza gravitatoria a la superficie del cometa formando una cáscara o costra de material no volátil. Este fenómeno se conoce como la muerte de un cometa o la etapa durmiente de un cometa. Eventualmente el mismo puede reactivarse y retomar la sublimación de volátiles si recibe un impacto o es fragmentado por algún mecanismo interno que libere y descubra nuevos volátiles que antes no habían sido expuestos. Lo que si está claro, es que estos mecanismos de erosión (p.e. [splittings](#), fragmentaciones) son importantes en la vida física de los JFC (Di Sisto et al. 2009).

1.4. Meteoroides

Los meteoros, o lo que popularmente se conocen como *estrellas fugaces*, son partículas del tamaño de un grano de arena o hasta del tamaño de un grano de arroz, que son desprendidas de los cometas en su evolución cercana al Sol en donde se produce un aumento notable en la sublimación de volátiles de las superficies, y que también pueden ser liberados en procesos más violentos o destructivos como las fragmentaciones o *splittings* cometarios, también comunes en los momentos cercanos al pasaje por el perihelio (Weidenschilling y Binzel, 2004).

Originalmente los meteoros se creían fenómenos atmosféricos hasta que en el siglo XIX algunas lluvias notables, como las Leónidas, fueron relacionadas con las órbitas de cometas. Esto fue posible gracias a la determinación del [radiante](#) de la lluvia, dirección o punto en el cielo del cual parecen provenir los meteoros (punto de fuga) por lo que puede deducirse que las partículas ingresan a la Tierra desde una dirección común, paralelas entre sí. El radiante indica esencialmente la dirección de la órbita de algún cometa encontrándose

con la Tierra en ese momento. Las lluvias de meteoros duran algunas noches y presentan un máximo de actividad dado por el número de meteoros por hora (tasa horaria cenital [ZHR](#)), la cual está sujeta a varios factores, como por ejemplo el grado de precisión con el que la Tierra pasará por el rastro de partículas dejadas por el cometa y también si el cometa ha sufrido recientes episodios de aumento de actividad, como productos de alguna fragmentación o aumento súbito de brillo conocidos como [outbursts](#) (Q. Ye et al. [2024](#)).

1.4.1. Cometas progenitores de lluvias

Los meteoroides que son liberados y pasan a formar parte del rastro del cometa lejos de éste, son aquellos que alcanzan la velocidad de escape. Los meteoroides o partículas que no logran alcanzar la velocidad de escape, volverán a caer en el cometa formando con el tiempo una corteza de material no volátil que irá cubriendo la superficie del cometa con el paso del tiempo reduciendo sus regiones activas de sublimación. De la misma manera, si el cometa recibe un impacto de algún objeto, grandes zonas de sublimación podrían ser nuevamente expuestas a la radiación solar y desencadenar un episodio de *outburst* o aumento súbito de brillo del mismo (Jenniskens, [2007](#)).

Las lluvias de meteoros entonces están asociadas a un radiante en el cielo (como se muestra en la figura [1.7](#)) y deben diferenciarse de los meteoros esporádicos que no tienen radiante asociado y que son partículas que se encuentran en el espacio interplanetario y chocan con la Tierra originando un meteoro de dirección aleatoria. Una lista completa de lluvias y sus respectivos radianes puede verse en Jenniskens, [1994](#).

1.5. Origen común de cuerpos menores

Desde finales del siglo XIX y principios del siglo XX han surgido ideas en torno al origen común de algunos cuerpos celestes. A diferencia de fenómenos observados directamente, como es el caso de la fragmentación cometaria y en particular, el cometa D/Biela que se fragmentó en el año 1842 (Jenniskens y Vaubaillon, [2007](#)) y tenida en la literatura como la primera fragmentación cometaria observada en la ciencia moderna, pensar en el origen común de cuerpos celestes puede verse como algo especulativo y lejano en el tiempo. Las primeras

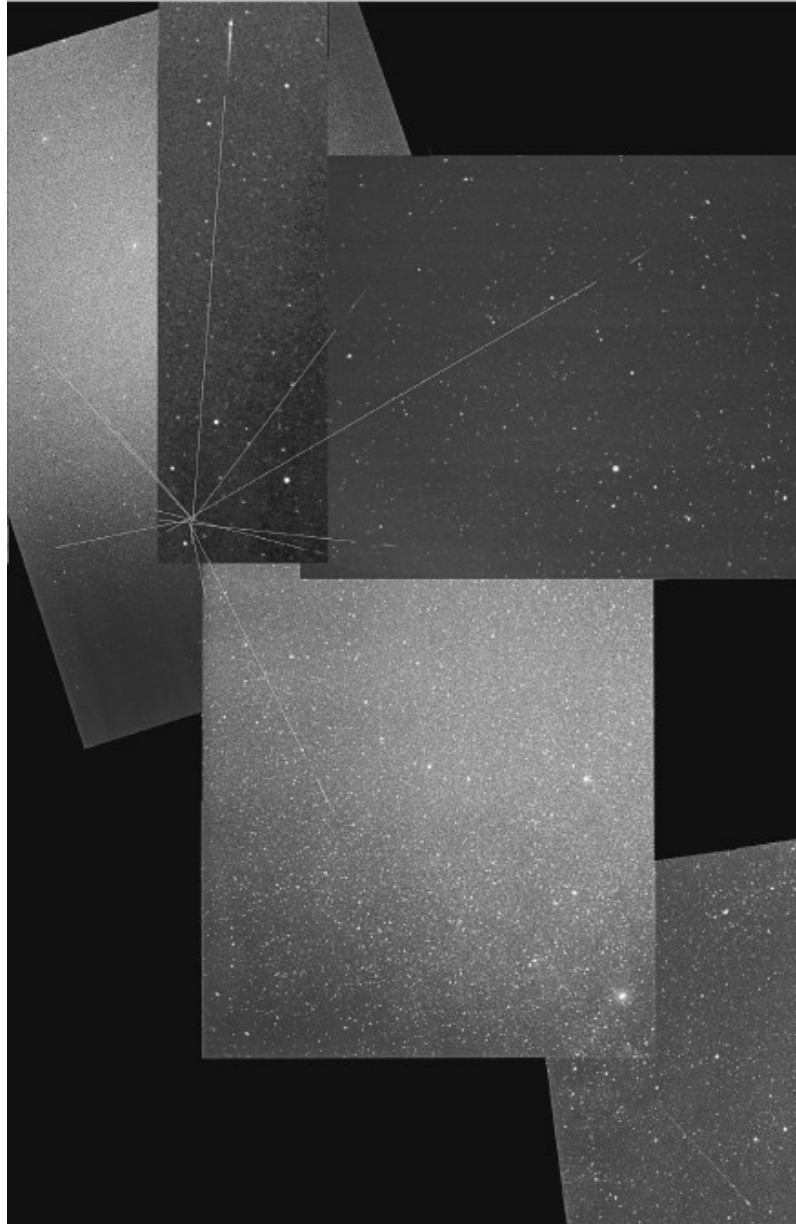


Figura 1.7: Foto-composición del radiante de la lluvia Draconids de 1985 por la *Nippon Meteor Society*. Extraído del libro *Meteor Showers and their parent comets*, Jenniskens, 2007

ideas sobre el propio origen de nuestra Luna y los satélites de Marte incorporaban conceptos que tenían que ver con la fragmentación o disrupción de un cuerpo mayor para dar origen a los nuevos cuerpos (Canup et al. 2021). Hoy en día el origen de los satélites de Marte se explica por captura dinámica y no

Tabla 1.1: Tabla de cometas progenitores de algunas lluvias de meteoros. (L = LPC, H = HTC, J = JFC). Extraído y ampliado de Jenniskens, 2007.

Cometa o Asteroide	Clase	H_{10}	D(km)	Lluvia
C/1983 H1 (I–A–A)	L	8.6	9.3	May Lyrids
C/1861 G1 (Thatcher)	L	5.5	5.6	Apr. Lyrids
C/1911 N1 (Kiess)	L	7.9	2.7	α -Aurigids
C/1739 K1 (Zanotti)	L	3.3	10.9	Oct. Leonis Minorids
C/1852 K1 (Chacornac)	L	9.8	1.5	η -Eridani
C/1874 G1 (Winnecke)	L	-	-	η -Ceti
C/1947 F2 (Becvar)	L	-	-	δ -Serpentids
C/1943 W1 (Van G–P–D)	L	-	-	Nov. Hydrids
C/1862 N1 (Schmidt–Tempel)	L	-	-	ν -Arietidas
C/1976 D1 (Bradfield)	L	-	-	β -Tucanids
C/1964 N1 (Ikeya)	L	-	-	Oct. e-Geminid
1P/Halley	H	3.71	10	η -Aquariids
”	”	”	”	October Orionids
109P/Swift–Tuttle	H	4.56	26	Perseids
55P/Tempel–Tuttle	H	8.5	-	Leonids
8P/Tuttle	H	8.0	14.9	Ursids
C/1917 F1 (Mellish)	H	7.4	3.1	Dec. Monocerotids
3D/Biela	J	7.5	3.0	Andromedids
6P/d’Arrest	J	9.5	3.0	Sep. Bootids
7P/Pons–Winnecke	J	9	1.5	Jun. Bootids
15P/Finlay	J	13.5	1.8	-
21P/Giacobini–Zinner	J	8.9	2.0	Draconids
26P/Grigg–Skjellerup	J	12.1	0.8	π -Puppids
45P/Honda–Mrkos–Pajd	J	13.1	0.7	-
73P/SW-3	J	10.5	2.0	τ -Herculids
103P/Hartley 2	J	8.5	1.1	-
D/1770 L1 Lexell	J	7.7	2.8	μ -Sagittariids
D/Blanpain	J	8.5	2.2	Phoenicids
D/1978 R1	J	12.5	0.7	Oct. Capricornids
P/2004 CB (Linear)	J	17.0	2.1	-
169P/NEAT	J	16.8	2.3	α -Capricornids

un progenitor común (Wargnier et al. 2025).

La disrupción de un progenitor puede ser un evento puntual y abrupto, como lo sería en el escenario de una evolución colisional (Davis et al. 1985, Zappala et al. 1983), o podría ser también algo gradual y erosivo, como la desintegración de los núcleos cometarios (Öpik, 1968) que originen corrientes de meteoroides que luego ingresan a la Tierra en las lluvias (Jenniskens, 1994) y que también sean los causantes de la luz zodiacal (Nesvorný et al. 2010, Durda y Dermott,

1997, Rigley y Wyatt, 2021).

En cualquier caso el problema será el mismo, como identificar que uno o varios cuerpos celestes, ya sean estos meteoroides, fragmentos cometarios u otros asteroides, pertenecían antes a un progenitor común. El problema naturalmente tiene escalas de tiempo distintas, desde los miles de millones de años en el caso de las familias asteroidales, problema que hay que abordar utilizando los [elementos orbitales propios](#), hasta fenómenos astronómicamente instantáneos, como la caracterización de una fragmentación cometaria en vivo y en directo a lo largo de algunos días o semanas, como el caso del cometa D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) y su espectacular impacto contra el planeta Júpiter. Existen también problemas con escalas de tiempo intermedias, ni tan instantáneas como una fragmentación en vivo, de la cual seguramente se dispondría de mucha información observacional, ni tan grandes como lo puede ser el origen de una familia colisional de asteroides en el MBA, si no eventos de ruptura o fragmentación que hayan podido ocurrir en escalas de tiempo de 10^2 o 10^3 años. En estos casos, no se cuenta con información instantánea de las órbitas, velocidades relativas de los objetos resultantes de la fragmentación o ruptura, pero se pueden realizar integraciones numéricas por tiempos breves hacia el pasado para estudiar como eran las órbitas de los objetos. Este método se ha utilizado en varios casos de fragmentaciones cometarias, pero surgen varios problemas, entre ellos los dos principales que son:

- Presencia de efectos físicos no dinámicos (p.e. fuerzas no gravitacionales)
- Evolución orbital inestable o caótica (p.e. por causa de encuentros planetarios)

En este caso, claramente el problema se torna más complejo porque entonces hay que incorporar los efectos físicos que alteran el comportamiento puramente dinámico, por ejemplo, las fuerzas no gravitacionales, mediante un modelo (Marsden, 1968). En general los modelos de fuerzas no gravitacionales son dependientes de parámetros y se busca lograr un ajuste con los datos observacionales reales (Yeomans et al. 2004). Asimismo si el comportamiento dinámico atraviesa períodos de inestabilidad o variabilidad caótica, producto de encuentros planetarios, entonces una posible solución es adoptar un abordaje estadístico y explorar la evolución orbital integrando [clones](#) para determinar las grandes tendencias y evolución media de los objetos de interés.

1.5.1. Familias de asteroides

Las familias de asteroides son un concepto que tiene su génesis a comienzos del siglo XX. Ante el hecho de que se observan varios asteroides con elementos orbitales similares, el astrónomo japonés Kiyotsugu Hirayama propuso la hipótesis de que esa similitud no podía ser producto del azar y que sería debido a la existencia de lo que denominó *familias asteroidales* (Hirayama, 1918). Estas familias, que originalmente fueron 5, fueron denominadas por el objeto mayor en cada una de ellas (Eos, Themis, Koronis, Flora y Maria) luego fueron aumentando y depurándose a unas pocas decenas, como se muestra en la figura (1.8).

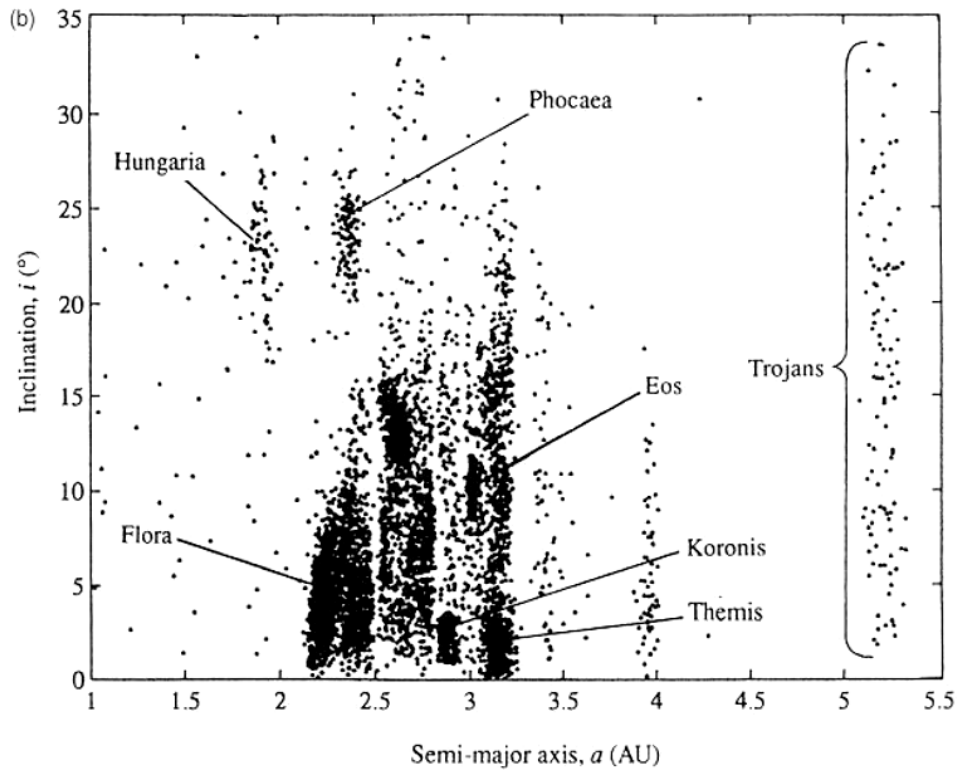


Figura 1.8: Diagrama Inclinação ($^{\circ}$) vs Semi-eje mayor (au) de los asteroides del cinturón principal, donde se ven las principales familias asteroidales. Extraído del libro *Planetary Sciences* de de Pater y Lissauer, 2015.

Dado que los asteroides tienen un tiempo de permanencia en el Sistema Solar de algunos miles de millones de años, la evolución dinámica de una familia de asteroides, por ejemplo, originada a partir de un episodio de fragmentación

colisional hace varios cientos de millones de años, no puede ser estudiada en términos de los elementos orbitales osculantes. Para el estudio de largo plazo de estas órbitas regulares, se utilizan los elementos orbitales *propios* o *proper elements* los cuales representan un valor casi constante de los elementos orbitales, sin las variaciones de corto período producidas por las perturbaciones planetarias (Milani y Knežević, 1990, Milani y Knežević, 1994).

En la actualidad, la cantidad de familias asteroidales, así como también la cantidad de objetos que las integran, han ido aumentando y refinando principalmente debido a:

- Ampliación de las bases de datos de elementos propios a más objetos y mejoramiento en la determinación de estos elementos para los objetos ya existentes
- Mejoras computacionales que redundan en mejores algoritmos de *clustering* (por ejemplo el Hierarchical Clustering Method HCM o Wavelet Analysis Method WAM) donde se logra una separación de grupos más fina y a su vez, detectar sobre-densidades o grupos cada vez más pequeños y/o dispersos.

El empleo de estos métodos de *clustering* se sustenta en el empleo de una métrica N-dimensional donde las órbitas están definidas y descritas por los elementos propios.

1.5.2. Criterios o métricas de distancia orbital

Durante la segunda mitad del siglo XX se desarrollaron varios criterios de distancia o métricas N-dimensionales para abordar el problema de cuál es la distancia entre órbitas, fundamental en el estudio de las familias asteroidales y también en la identificación de corrientes de meteoroides, que es un problema similar, pero con una escala de tiempo y escala de tamaño de partículas mucho menor. En estos espacios métricos, la distancia o similitud entre dos órbitas estará dada por una *función distancia* definida en ese espacio de elementos orbitales osculantes, representados en la figura (1.9).

1.5.2.1. Criterio de Southworth & Hawkins

Southworth, 1963 propone un criterio para evaluar la similitud de órbitas de meteoros y así identificar si pertenecen o no a la misma corriente meteórica,

posteriormente denominado criterio-D o *D-criteria*. El mismo determina un valor asociado a la distancia orbital que puede utilizarse como una métrica de distancias entre dos objetos distintos y depende de los parámetros orbitales de ambos, ec. (1.3).

$$D_{SH}^2 = (e_B - e_A)^2 + \left(\frac{q_B - q_A}{L}\right)^2 + 4 \sin^2\left(\frac{I_{BA}}{2}\right) + 4 \left(\frac{e_B + e_A}{2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\Pi_{BA}}{2}\right) \quad (1.3)$$

I_{BA} y Π_{BA} se calculan mediante las ecuaciones (1.4), (1.5) y (1.6), asimismo q_A , q_B , e_A , e_B , i_A , i_B , ω_A , ω_B , Ω_A y Ω_B representan, distancia perihélica, excentricidad, inclinación y longitud del nodo ascendente, respectivamente, para los cuerpos A y B cuyas órbitas se quieren comparar. L es un factor de escala para que los términos queden adimensionados, que generalmente se toma como 1ua.

$$\sin^2\left(\frac{I_{BA}}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{i_B - i_A}{2}\right) + \sin i_A \sin i_B \sin^2\left(\frac{\Omega_B - \Omega_A}{2}\right) \quad (1.4)$$

$$\Pi_{BA} = \omega_B - \omega_A + 2 \arcsin(S_{BA}) \quad (1.5)$$

$$S_{BA} = \cos\left(\frac{i_B + i_A}{2}\right) \sin\left(\frac{\Omega_B - \Omega_A}{2}\right) \sec\left(\frac{I_{BA}}{2}\right) \quad (1.6)$$

El criterio luego se calibra con meteoroides conocidos, obteniendo un valor empírico de la distancia $D < 0.2$ a partir del cual las órbitas podrían considerarse genéticamente relacionadas.

1.5.2.2. Criterio de Drummond

Posteriormente Drummond, 1981 introduce correcciones sobre el criterio anterior, para obtener términos adimensionados como se muestra en la ecuación (1.7)

$$D_D^2 = \left(\frac{e_B - e_A}{e_B + e_A}\right)^2 + \left(\frac{q_B - q_A}{q_B + q_A}\right)^2 + \left(\frac{I_{BA}}{180^\circ}\right)^2 + \left(\frac{e_B + e_A}{2}\right)^2 \left(\frac{\Theta_{BA}}{2}\right) \quad (1.7)$$

Aquí Θ_{BA} está dado por la ecuación (1.8)

$$\Theta_{BA} = \arccos\left(\frac{\vec{e}_A \cdot \vec{e}_B}{e_A e_B}\right) \quad (1.8)$$

1.5.2.3. Criterio de Jopek

La variante propuesta por Jopek, 1993 introduce una corrección para eliminar la sobre-dependencia del criterio de Southworth & Hawkins en la distancia perihélica, como se muestra en la ecuación (1.9)

$$D_H^2 = (e_B - e_A)^2 + \left(\frac{q_B - q_A}{q_B + q_A}\right)^2 + 4 \sin^2 \left(\frac{I_{BA}}{2}\right)^2 + 4 \left(\frac{e_B + e_A}{2}\right)^2 \sin^2 \left(\frac{\Pi_{BA}}{2}\right) \quad (1.9)$$

1.5.2.4. Métricas naturales de Kholshchevnikov

Kholshchevnikov et al. 2016 introduce variantes de estos criterios llamados *métricas naturales* que constan de definiciones mejoradas, matemáticamente bien definidas. Los criterios anteriores no cumplen con rigurosidad la definición de *norma* en el sentido matemático estricto, por ejemplo, no se cumple la desigualdad triangular o la distancia no está bien definida si alguna de las órbitas es circular. El término *natural* es debido a que las nuevas definiciones de distancia son en base a parámetros que tienen sentido físico. Nosotros utilizamos para este trabajo las métricas naturales ρ_1 , ρ_4 y ρ_5 , definidas en las ecuaciones (1.10), (1.11) y (1.12).

$$\rho_1^2 = \frac{1}{L} (p_1 + p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} \cos I) + (e_1 + e_2 - 2e_1 e_2 \cos P) \quad (1.10)$$

$$\rho_4^2 = \frac{1}{L} \left((1 + e_1)^2 p_1 + (1 + e_2)^2 p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} (e_1 e_2 + \cos I) \right) \quad (1.11)$$

$$\rho_5^2 = \frac{1}{L} \left((1 + e_1)^2 p_1 + (1 + e_2)^2 p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} (e_1 e_2 + \cos(i_1 - i_2)) \right) \quad (1.12)$$

$$\cos I = c_1 c_2 + s_1 s_2 \cos(\Omega_1 - \Omega_2) \quad c = \cos i \quad s = \sin i \quad (1.13)$$

$$\cos P = s_1 s_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + (\cos \omega_1 \cos \omega_2 + c_1 c_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2) \cos (\Omega_1 - \Omega_2) \quad (1.14)$$

ρ_1 , ρ_4 y ρ_5 son funciones del semi-latus rectum p , excentricidad e , inclinación i , argumento del perihelio w , longitud del nodo ascendente Ω y un factor de escala L que se toma como la unidad.

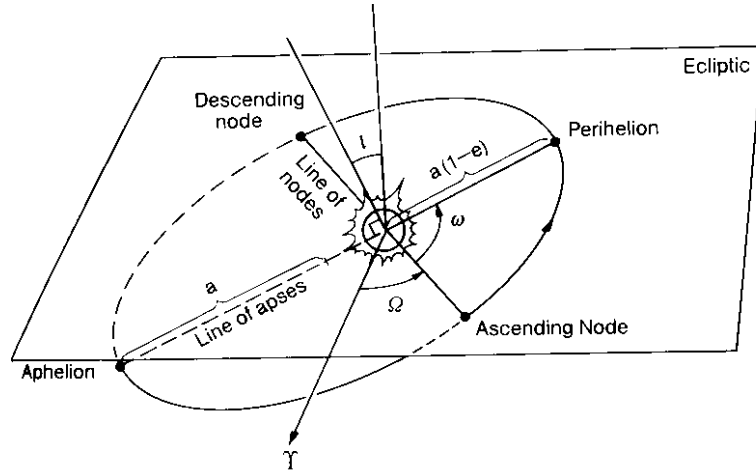


Figura 1.9: Esquema representativo de los elementos orbitales osculantes semi-eje mayor (a), excentricidad (e), inclinación (i), argumento de perihelio (ω) y longitud de nodo ascendente (Ω). Fuente: Catalina Sky Survey: <https://catalina.lpl.arizona.edu>

Las órbitas de los objetos varía con el tiempo y también el valor numérico de cualquiera de estos criterios de distancia orbital, como es de esperar a partir de los resultados de las integraciones numéricas. Se dice que dos objetos están relacionados o que existe la posibilidad de que lo estén, si su distancia orbital es menor que un cierto valor D_0 durante algún lapso de tiempo o época. Los valores de D_0 que indicarían un posible vínculo dinámico varían entre $0.001 < D_0 < 0.3$, según el autor y el problema estudiado.

1.5.3. Fragmentación cometaria

La fragmentación de los cometas es un fenómeno que ha sido observado desde los últimos 150 años, en más de cien oportunidades, en varias decenas de cometas y es totalmente impredecible. Con el advenimiento de los grandes

telescopios se han podido registrar eventos con el detalle suficiente como para elaborar modelos más complejos de las fragmentaciones, gracias al estudio astrométrico y fotométrico del núcleo y sus fragmentos. A grandes rasgos, las fragmentaciones pueden generar pocos fragmentos o varios e inclusive originar familias (p.e. Familia de Kreutz, por fragmentaciones sucesivas del cuerpo progenitor).

Tabla 1.2: Grupos de cometas de los cuales se conoce un vínculo dinámico o que son fragmentos de un progenitor común. Extraído y ampliado de Fernández, 2005.

Cometas	Referencia
1951 J1 42P/Neujmin 3	Carusi et al. 1985
1954 R1 53P/van Biesbroeck	.
1988 F1 Levy	Sekanina et al 2016
1988 J1 (Shoemaker-Holt)	
1988 A1 Liller	Sekanina et al. 2016
1996 Q1 Tabur	
2015 F3 (SWAN)	
2002 A1 LINEAR	Sekanina et al 2003
2002 A2 LINEAR	
C/2002 C1 (Ikeya-Zhang)	Waddington 2002
C/1661 C1	-
C/2002 Q2 (LINEAR)	Sekanina 2002
C/2002 Q3 (LINEAR)	

Los cometas pueden fragmentarse en forma recurrente, varias veces, o inclusive fragmentarse los fragmentos, en eventos secundarios. Las fragmentaciones son mejor observadas en las cercanías del perihelio del cometa y suelen estar acompañadas por fenómenos como cambios súbitos de brillo (*outbursts*) debido a la expulsión de polvo hacia la coma cometaria, que es eyectado junto con los volátiles que subliman en la superficie del núcleo cometario. Si bien no se tiene una teoría unificada de cuales serían los mecanismos internos que desencadenarán la fragmentación de los cometas, debido a que no se conocen muchos parámetros que describan la estructura interna del mismo (tales como la abundancia de volátiles, la geología interna del cometa, la resistencia interna del material, etc), existen modelos dinámicos que aplican a casos particulares que han sido bien estudiados y observados telescópicamente, como los casos de los cometas C/1992 F1 Shoemaker-Levy 9 y C/1999 S4 (LINEAR).

Además de los modelos dinámicos de fragmentación que aplican a cada caso, también existen modelos de fragmentación más generales que aplican a

poblaciones. Su función no es explicar las fragmentaciones en forma particular, sino modelar el fenómeno de la fragmentación en sí mismo y determinar su importancia, es decir, si es un fenómeno relevante a lo largo de la evolución y vida dinámica de los cometas. De esta manera pueden ajustarse los parámetros de estos modelos y extraerse conclusiones como las expuestas en Di Sisto et al. 2009 en donde se estudia la población de JFCs como proveniente del disco dispersado o *Scattered Disk* y luego transferidos a la región joviana, donde evolucionarán bajo la influencia de Júpiter. Allí se observa que con un modelo únicamente dinámico no es posible explicar las distribuciones de elementos orbitales de la población real de JFCs, pero sí es posible hacerlo, agregando al modelo, los efectos físicos que suponen las fuerzas no gravitacionales, la sublimación y los *splittings*.

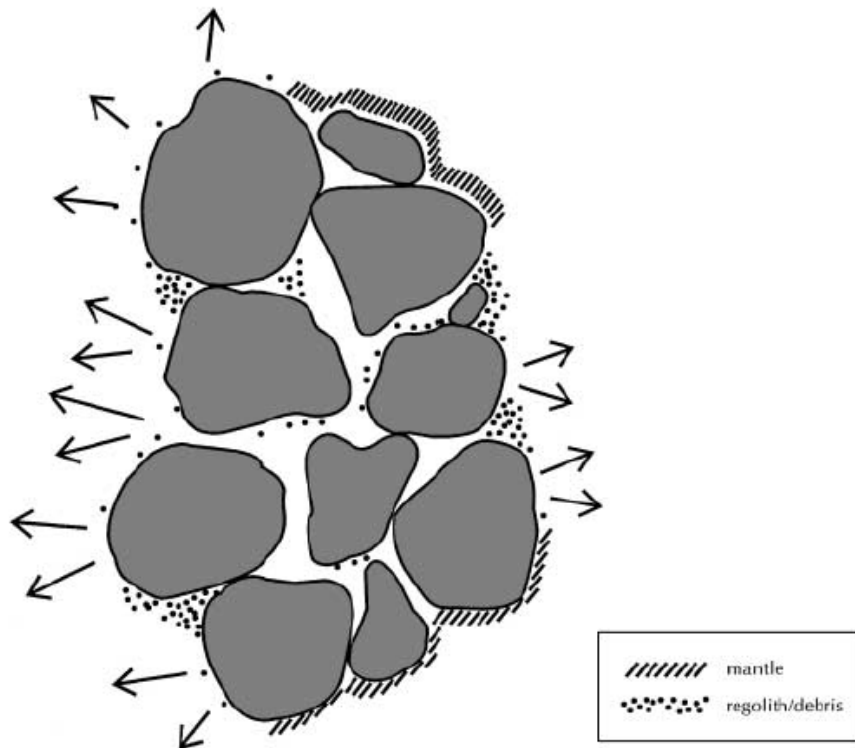


Figura 1.10: Modelo de rubble pile de núcleo cometario. Extraído de: Samarasinha, 2001

Cuando ocurre una fragmentación, los fragmentos heredan el nombre del cometa progenitor seguido de una letra de la A a la Z siendo la A, la que le

corresponderá al primer fragmento en pasar por el perihelio de la órbita del cometa original, y así, sucesivamente. Si un fragmento atravesara una fragmentación secundaria, el mismo heredaría el nombre del fragmento progenitor, seguido de un número siguiendo el mismo criterio.

Para los cometas conocidos cuyas fragmentaciones han sido documentadas, la gran mayoría, en una proporción de 6 a 1, se trata de fragmentaciones no asociadas a fuerzas de marea con Júpiter o el Sol, lo cual sugiere que las fragmentaciones pueden estar desencadenadas por fenómenos de estrés térmico del material superficial. Los episodios de fragmentación han ocurrido en 1 de cada 20 cometas conocidos que han ingresado a la región planetaria interior del Sistema Solar, si asumimos que éste es un fenómeno que eventualmente le puede ocurrir a cualquier cometa a lo largo de su vida dinámica o a cualquiera de ellos, al cabo de 20 revoluciones (Di Sisto et al. 2009, Boehnhardt, 2004)

1.6. Mecanismos para la fragmentación

Existen varios mecanismos físicos que podrían desencadenar la fragmentación cometaria, en teoría, y bajo ciertas condiciones dependiendo del cometa y sus circunstancias dinámicas y físicas. Los cometas son cuerpos básicamente ligados mediante su autogravedad (Weissman, 1986 ilustrado en la figura 1.10) en lo que se conoce como modelo de pila de escombros o *rubble pile* con una baja cohesión interna o *tensile strenght*. El material primordial podría volverse inestable rotacionalmente si el período de rotación del núcleo cometario es demasiado rápido. Asimismo, al aproximarse a un cuerpo masivo como Júpiter o el Sol, las fuerzas de marea gravitatorias podrían desmembrar el núcleo cometario o sin llegar a fragmentarlo, causar grietas o rupturas internas que se vean reflejadas en fragmentaciones posteriores u otro tipo de eventos como los *outbursts*. La lista de cometas de los que se conocen fragmentaciones o desintegraciones puede verse en la tabla (1.1) del apéndice.

1.6.1. Fuerzas de marea

Cuando un cuerpo extenso se aproxima a otro muy masivo, el punto más cercano y más lejano del cuerpo extenso, serán sometidos a aceleraciones gravitatorias diferentes, ocasionadas por el cuerpo masivo. Si esta diferencia de aceleración es lo suficientemente grande, o mayor que su autogravedad, el mis-

mo se desintegrará.

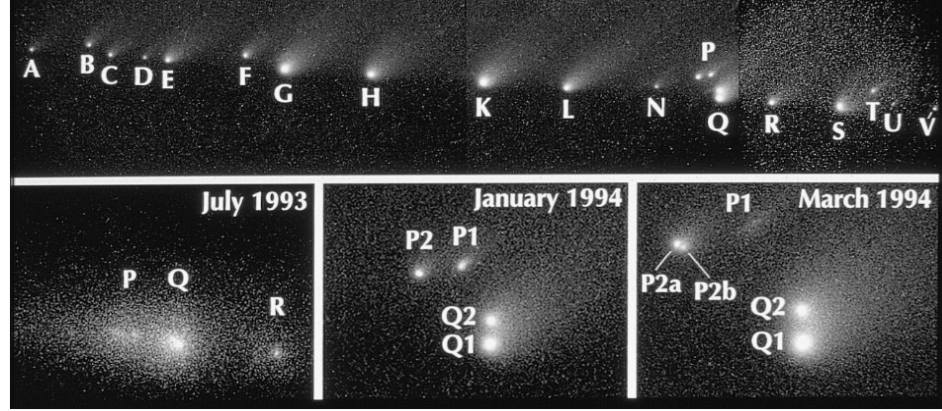


Figura 1.11: Fragmentación del cometa D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) inducida por la acción de fuerzas de marea con Júpiter. Extraído de Levy, 1998.

Esto fue observado y publicado por Roche en 1849 y se conoce como el **límite de Roche** y se utiliza para explicar, por ejemplo, la existencia de anillos de material entorno a cuerpos masivos como Saturno (Tiscareno y Hedman, 2014). El límite de Roche está definido por la ecuación (1.15) donde ρ_P es la densidad del planeta, ρ_c es la densidad del cometa y R_P es el radio del planeta.

$$r_{Roche} \sim 2.44 \left(\frac{\rho_P}{\rho_c} \right)^{\frac{1}{3}} R_P \quad (1.15)$$

Si bien el cálculo de Roche inicialmente fue para un cuerpo fluido, el factor 2.44 de la ecuación (1.15) puede ser algo menor si se tiene en cuenta algo de resistencia interna de material o *tensile strenght*, por ejemplo un factor de 1.38 (Aggarwal y Oberbeck, 1974). Existen varios cometas que han fragmentado mediante este mecanismo, como por ejemplo el cometa D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) que hizo un *flyby* al planeta a apenas $1.62R_J$ (radios jovianos) ocasionando una fragmentación en al menos una veintena de pedazos que luego impactarían con el planeta en 1994 (ver figura 1.11), o el cometa P/Brooks 2 que también hizo un flyby en Júpiter a $2R_J$ en 1886 donde fragmentó en al menos 6 cometas hijos. Esto quiere decir que, al utilizar un modelo de acción de fuerzas de marea, el mismo ajusta bien a los resultados observacionales. Los cometas fragmentados por este mecanismo pueden verse en la tabla 1.1

1.6.2. Inestabilidad rotacional

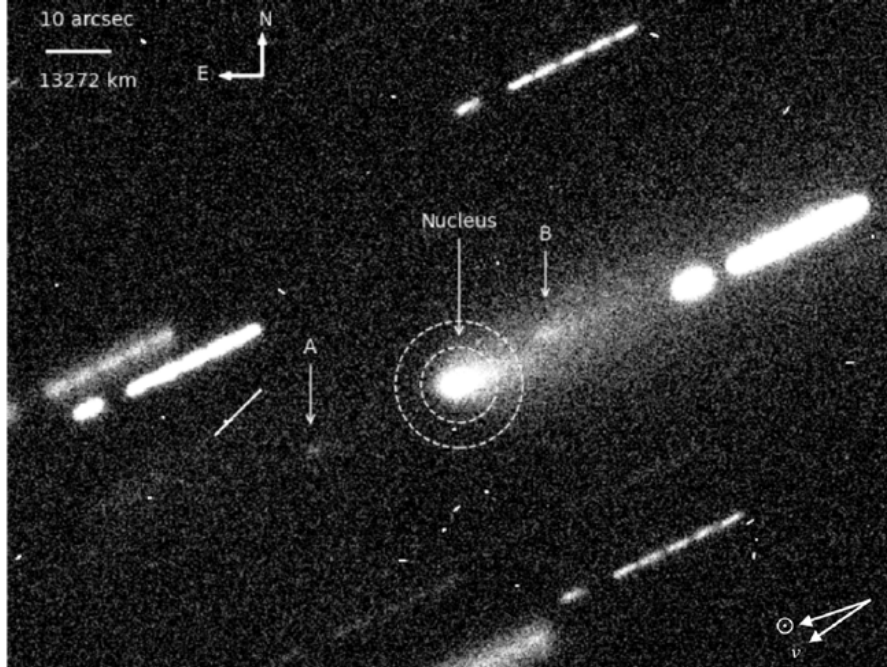


Figura 1.12: Cometa 157P/Tritton posiblemente fragmentado debido a inestabilidad rotacional de su núcleo. Imagen extraída de Luu & Jewitt 2025

Los cuerpos menores, al ser relativamente pequeños, tienen una autogravedad baja. Si el material tiene además una baja cohesión interna, por ejemplo, un cuerpo muy fragmentado producto de la evolución colisional o agrietado y erosionado producto del estrés térmico, podría volverse inestable, es decir, que las fuerzas centrífugas en algunos puntos del mismo superen a la autogravedad y cohesión interna, y entonces partes del cuerpo alcancen velocidades de escape y por lo tanto, el cuerpo se fragmente o comience a perder masa. Los cuerpos de tipo *rubble pile* (ver figura 1.10) se piensa que serán susceptibles a este mecanismo de fragmentación (como se ejemplifica en la figura 1.12) ya que poseen una baja cohesión interna caracterizados por valores del *tensile strength* σ en el orden de 10-100 Pa (Toth y Lisse, 2006). Un cuerpo se vuelve rotacionalmente inestable si verifica la ecuación (1.16) (Boehnhardt, 2004, *Comets*, 1982).

$$\sigma < \frac{2\pi^2 \rho R^2}{P^2} \quad (1.16)$$

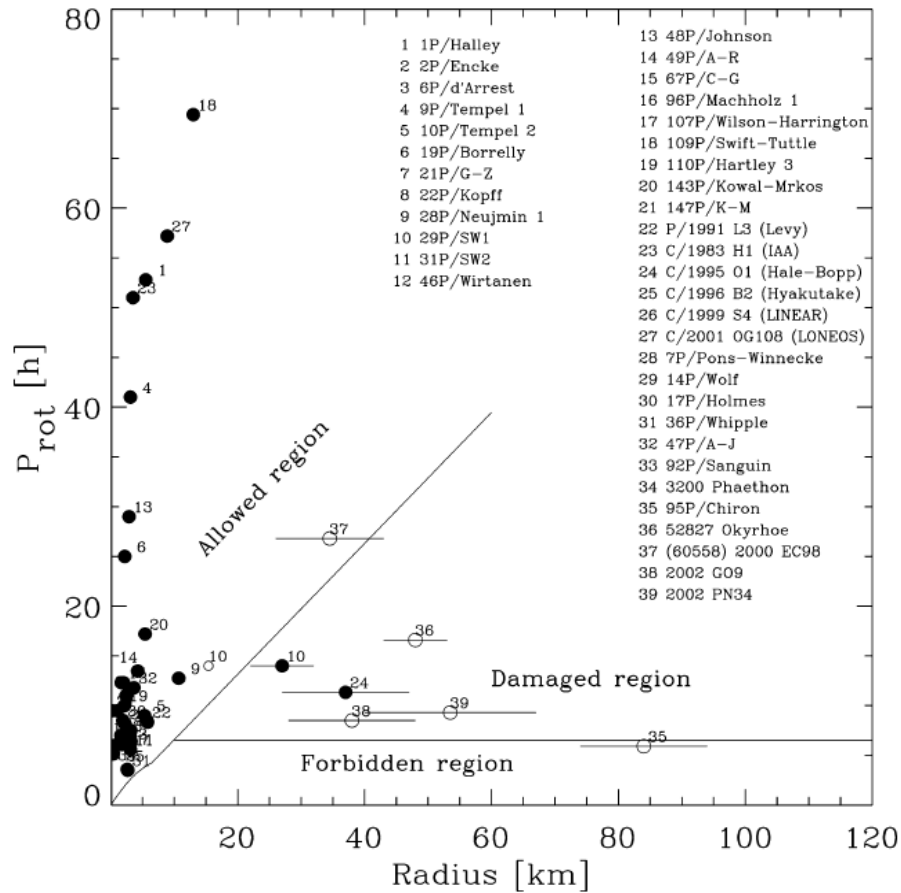


Figura 1.13: Gráfico de Período vs Radio y demarcación de zonas seguras e inestables para el estado rotacional de los núcleos cometarios. La densidad utilizada es la obtenida por (Greenberg et al. 1995) para el cometa Shoemaker-Levy 9 de $\rho = 300\text{kg/m}^3$ y asumiendo núcleos esféricos. Extraído de Toth y Lisse, 2006

En la ecuación (1.16) la densidad del material es ρ , el radio del cometa es R y el período de rotación es P . En base a modelos físicos que provean un valor de σ y asumiendo valores de albedo geométrico típicos para obtener tamaños, se pueden calcular zonas seguras y zonas inestables para los núcleos cometarios de los cuales se conoce el período de rotación, como se muestra en la figura (1.13).

1.6.3. Estrés térmico

Los núcleos cometarios pueden ser sometidos a tensiones superficiales y estrés térmico generado por los cambios de temperatura debido a la variación

de la insolación en distintas partes del cuerpo por la rotación cuando se acercan al perihelio. El estrés térmico puede generar grietas y espacios por los cuales pueda exponerse nuevo material volátil a la radiación solar y generar *jets* y/o *outbursts* o provocar episodios de fragmentación (Tauber y Kührt, 1987) o disrupción completa del núcleo como se cree que ocurrió con el cometa C/2012 S1 (ISON) (ver figura 1.14).

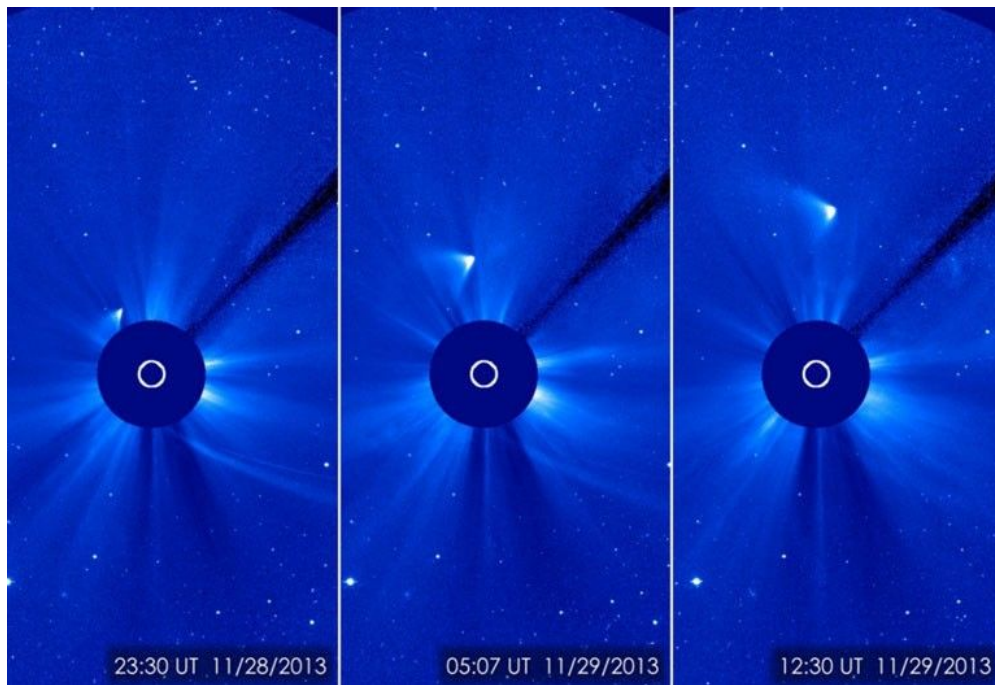


Figura 1.14: Fragmentación por estrés térmico del cometa C/2012 S1 (ISON). Imagen tomada con la cámara wide de la ESA/NASA Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Fuente: <https://science.nasa.gov/solar-system/comets/c-2012-s1-ison/>

La magnitud del estrés térmico también depende de la temperatura inicial del núcleo, por lo que los cometas provenientes de la Nube de Oort, serán más propensos a fragmentaciones y desintegraciones causadas por el estrés térmico, que los provenientes del cinturón trans-neptuniano. Los objetos que más sufren las consecuencias del estrés térmico, son los objetos con tamaños del orden de $\sim 1\text{km}$ en comparación con los objetos más grandes (Shestakova y Tambovtseva, 1997).

Hay evidencia de que el estrés térmico es un factor importante de erosión en las superficies de los núcleos cometarios, como por ejemplo, el cometa

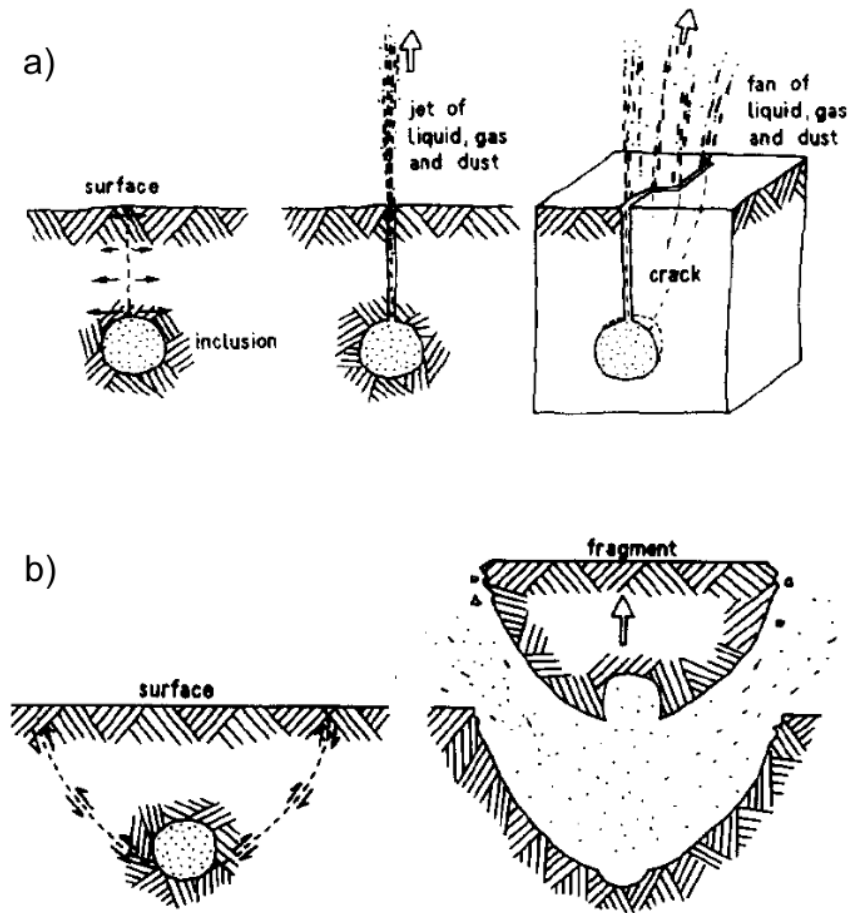


Figura 1.15: Esquema de la generación de jets (a) y expulsión de un fragmento (b) producto de la confluencia de grietas formadas por el estrés térmico en los núcleos cometarios. Extraído de Tauber y Kührt, 1987

67P/Churyumov-Gerasimenko (Attree, N. et al. 2018). También se piensa que pueda actuar en conjunto con la fragmentación por mareas, agrietando el material y debilitando su cohesión interna previamente antes de la fragmentación o que el agrietamiento pueda generar *jets* (figura 1.15) que modifiquen el estado de rotación del núcleo volviéndolo inestable y desencadenando una fragmentación por inestabilidad rotacional (Jewitt et al. 2016).

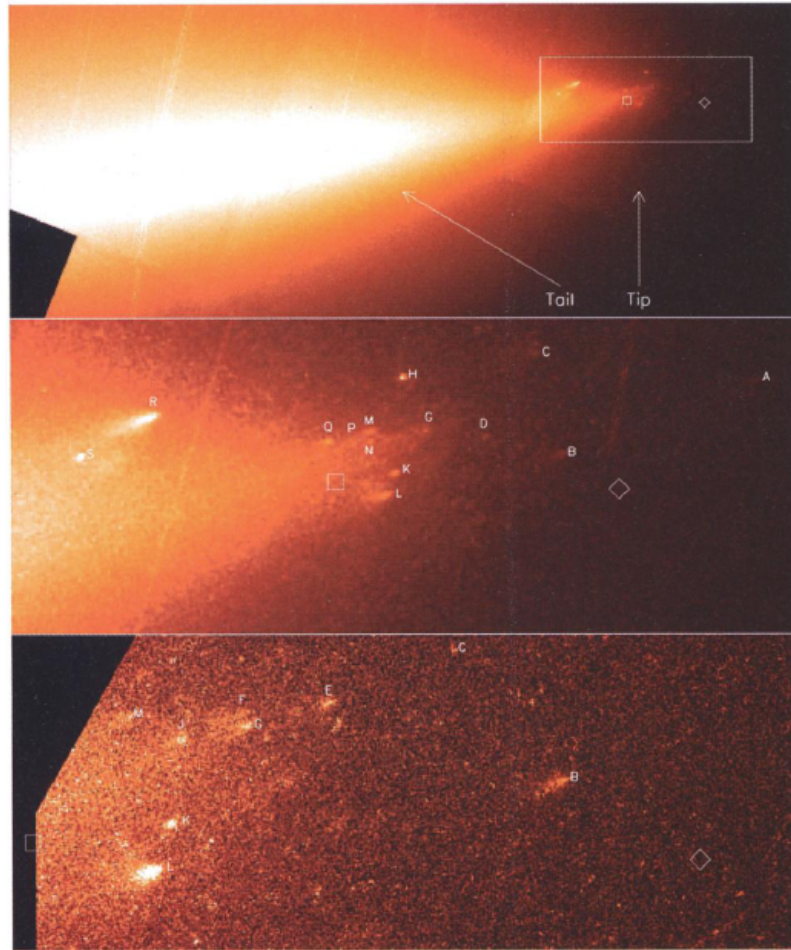


Figura 1.16: Imagen del cometa C/1999 S4 (LINEAR) tomada con la Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC 2) del telescopio Espacial Hubble cuya fragmentación podría ser explicada por la presión interna de gases super-volátiles (Samarasinha, 2001). Imagen extraída de Weaver et al. 2001.

1.6.4. Presión interna de gases

A medida que transcurren las revoluciones del cometa en torno al Sol, las regiones de la superficie donde están expuestos los volátiles se van reduciendo y gastando de manera que el núcleo puede formar una costra o capa de silicatos y materiales refractarios no volátiles que forman parte del núcleo, o de partículas sólidas que vuelven a caer al cometa y se depositan en una capa. Este es el mecanismo por el cual un cometa puede volverse inactivo, es decir, que se queda sin volátiles expuestos aunque todavía quedan en su interior otros volátiles por sublimar. Aquellos volátiles que estén cerca de la superficie

igualmente pueden sublimar a través de los poros que existan en esa costra cometaria.

Si el espacio para que escapen los gases sublimados no es suficiente, se comen-

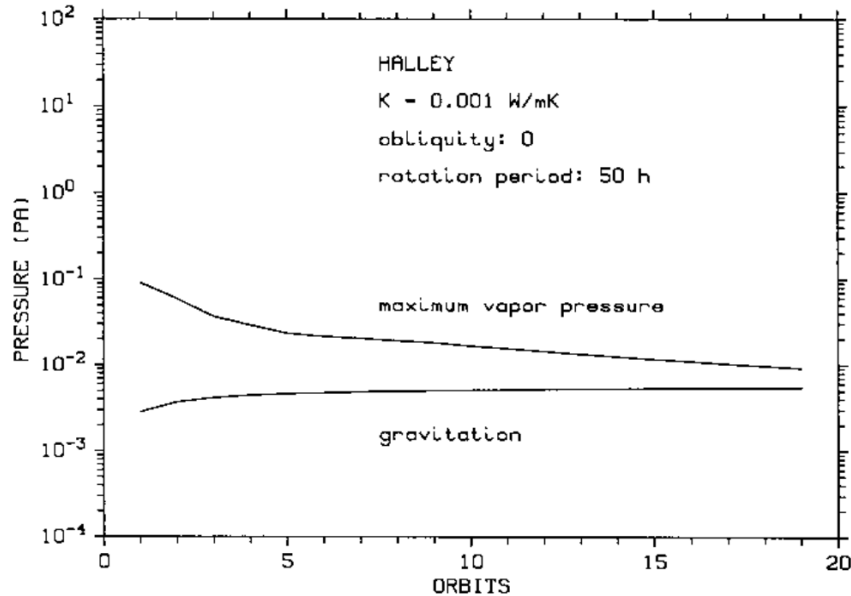


Figura 1.17: Simulación de la presión de gas y presión gravitatoria para el cometa 1P/Halley conforme pasan las revoluciones y se conforma la costra de material en la superficie. Bajo ciertas circunstancias, la presión del gas puede ser hasta un orden de magnitud mayor que la gravitatoria. Imagen extraída de Kührt y Keller, 1994

zará a acumular una presión de gas que en algún momento puede ser mayor a la presión gravitatoria del material acumulado en la superficie. También ocurrirá que el albedo de la superficie disminuirá, ya que los silicatos que componen el regolito superficial tiene menor albedo que los volátiles, por lo que se generarán ondas térmicas producto de la insolación de la superficie y absorción de energía. Es por esto que el gas acumulado en el interior del núcleo, puede volver la costra o "crust" inestable y ser fuente de episodios de desprendimiento de material o fragmentación (Kührt y Keller, 1994) como se ve en la figura (1.16). También existen especies químicas super-volátiles como el CO y el CO₂ (mucho más volátiles que el agua) que podrían desencadenar procesos de acumulación de presión entre los intersticios del interior del núcleo al ser evaporados (Samarasinha, 2001).

Otro escenario alternativo a la liberación de energía que supondría la sublimación de super-volátiles, es la cristalización del hielo amorfo, que es un proceso

altamente exotérmico. Este mecanismo es el que se propone para explicar el *outburst* post-perihelio que tuvo el cometa 1P/Halley en 1991, como se muestra en simulaciones en la figura (1.17). La cristalización se piensa, puede haber ocurrido hasta una profundidad de decenas de metros, asumiendo una densidad media $\rho = 500\text{kg}/\text{m}^3$ y entre 5 y 17 ua de distancia heliocéntrica (Prialnik y Bar-Nun, 1992).

1.6.5. Impactos

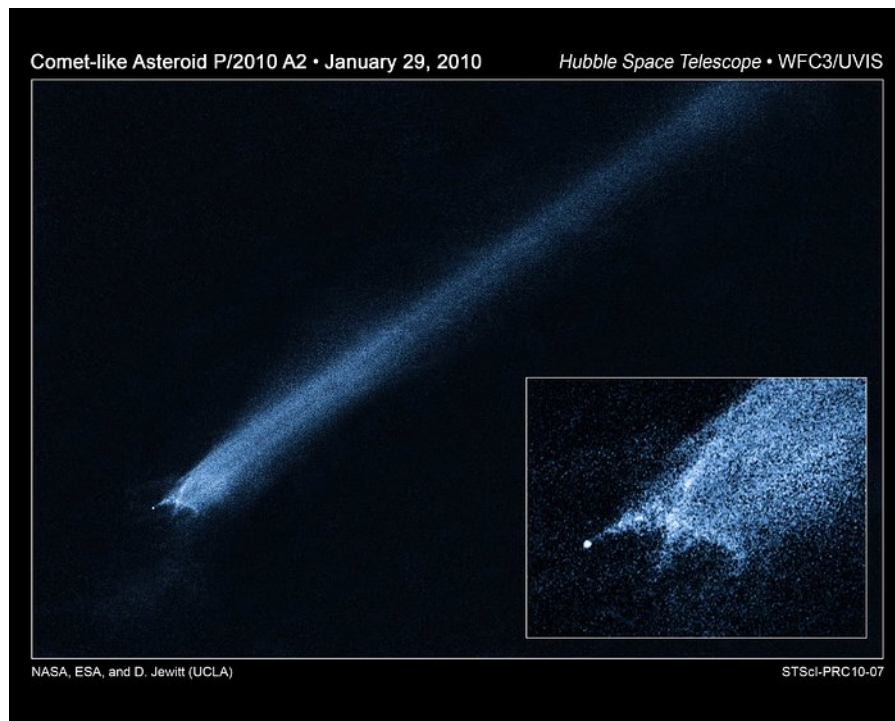


Figura 1.18: Imagen del cometa 354P/LINEAR luego de la fragmentación inducida por impactos. Extraída de ESA/Hubble: <https://esahubble.org/images/opo1007a/> y publicada en Jewitt et al. 2010.

Las órbitas cometarias suelen ser excéntricas y si además se trata de cometas de baja inclinación orbital, como las de los JFC, entonces la órbita puede cruzar órbitas de otros objetos, como por ejemplo, asteroides del cinturón principal. Se puede decir, a priori, que la probabilidad de impacto será proporcional al tiempo que el cometa permanezca en la región del MBA (lo que favorece a las órbitas poco excéntricas, ya que las muy excéntricas pasan más rápidamente por el perihelio) según Beech y Gauer, 2002. También se verá afectado por

la inclinación y por el diámetro del núcleo cometario o área de sección. Las consecuencias de un impacto pueden ser, dependiendo de la velocidad a la que se produzca (ver figura 1.19), desde un cráter en la superficie, exposición de nuevo material volátil o daños estructurales importantes que afecten la estabilidad del núcleo y puedan desencadenar otros procesos, como alteración en el estado rotacional o desintegración como en el caso de la figura (1.18).

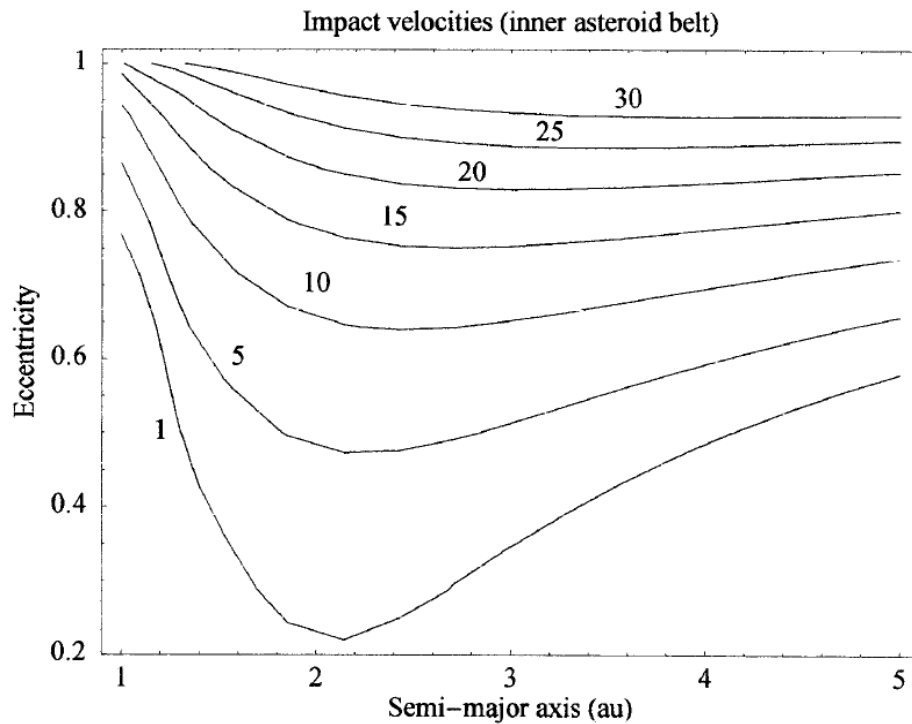


Figura 1.19: Diagrama de curvas de velocidad de impacto en km/s de un cometa con una a , e dadas y con $i = 0$, con un asteroide típico en órbita circular con un semi-eje mayor $a=2.06$ correspondiente al borde interior del MBA. Extraído de Beech y Gauer, 2002

Beech y Gauer, 2002 calcularon estas probabilidades para varios cometas donde los valores obtenidos son del orden de 0.01 a 0.05 % de probabilidad de impacto por órbita para impactores de 1m. Esto puede traducirse en un impacto cada 20 a 100 revoluciones.

La fragmentación catastrófica del cometa 354P/LINEAR (Jewitt et al. 2010), la activación y episodio de actividad del 7968 Elst-Pizarro (Toth, 2000) o incluso la posibilidad de la fragmentación también catastrófica del cometa C/1999 S4 (LINEAR) (Toth, 2001) podrían haber sido inducidas por impactos.

1.6.6. Modelos dinámicos

A priori, los modelos de fragmentación que pueden plantearse de manera más o menos completa o autosuficiente, son los modelos dinámicos, o sea, los que explican el movimiento de los fragmentos una vez que ha ocurrido la fragmentación. No es posible, o por lo menos muy difícil, plantear modelos físicos que puedan explicar los procesos internos que, en ese caso, desencadenen una fragmentación, como por ejemplo, gradientes de temperatura, presión interna o fenómenos físico-químicos que puedan ocurrir en el interior del cometa. Por lo tanto no existen de momento, modelos que puedan explicar las fragmentaciones cometarias espontáneas y para ello, se necesitaría conocer mucha información sobre el interior del cometa, presión, temperatura, composición y cohesión interna del material, entre otros. Si en cambio, el proceso de fragmentación es desencadenado por fuerzas de marea planetarias o solares, es posible explicar la evolución dinámica de los fragmentos exitosamente, como en el caso del cometa D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9). Para el caso de las fragmentaciones espontáneas, los modelos dinámicos pueden ayudar a comprender la evolución posterior de los fragmentos una vez que el evento ha ocurrido.

1.6.6.1. Modelo de Sekanina

En varios trabajos de fines de los 70s hasta principios de los 2000s (Marsden y Sekanina, 1974, *Comets*, 1982, Sekanina et al. 1998, Sekanina et al. 2002, Sekanina y Chodas, 2004) implementaron un modelo dinámico de 5 parámetros para describir la fragmentación simple y en un solo paso (1-step, two-body fragmentation) que han aplicado a una treintena de cometas. Este modelo consta de las 3 componentes de la velocidad relativa del fragmento secundario con respecto al primario v_r , v_t y v_n radial, transversa y normal, un intervalo de tiempo t_s y un factor de desaceleración Γ cuya existencia se propone debido a la transferencia de momento lineal entre los dos fragmentos que tienen diferentes tasas de desgaseamiento. Se asume también que este factor tiene una dependencia cuadrática inversa con la distancia heliocéntrica $\Gamma \sim \frac{1}{r^2}$ y es únicamente en dirección radial, lo cual es un tanto arbitrario y genera un poco de escepticismo sobre su real significado físico.

El ajuste exitoso de un modelo de estas características, implica realizar un ajuste en todas las observaciones astrométricas que se tengan disponibles de los fragmentos cometarios. Aquí es de vital importancia contar con posiciones

astrométricas lo más precisas posibles y procurar que el escenario de fragmentación no sea lo demasiado complejo (por ejemplo, varias fragmentaciones sucesivas), que permita aplicar el modelo de 1-step, two-body fragmentation.

Como resultados relevantes obtenidos mediante este modelo, se observa un parámetro de desaceleración Γ entre 10^{-5} y 10^{-2} gravedades solares, siendo los valores más grandes para los cometas nuevos de largo período y los valores más chicos para los cometas de corto período. Esto podría corresponderse con el hecho de que los cometas de corto período que ya llevan varias revoluciones en la región planetaria, tengan superficies con una mayor fracción de polvo, mayor densidad y menor cantidad de volátiles disponibles para la sublimación y en cambio los cometas nuevos, tengan mayor cantidad de volátiles que se reflejen en un valor mayor del parámetro de desaceleración Γ .

Las velocidades de separación entre el fragmento y el objeto principal tienen valores ajustados entre 0.3 y hasta 20 m/s en la mayoría de los casos, pudiendo haber valores de varias decenas de m/s y el tiempo de vida de los fragmentos va desde pocos días a algunos pocos años.

El modelo de Sekanina aplica para eventos de fragmentación que pueden ser observados telescópicamente y se pueden obtener datos astrométricos del cometa y sus fragmentos, en el mismo campo de imagen telescópica, o sea, estamos hablando de fragmentaciones cercanas tanto espacialmente como recientes. La tarea de vincular posibles fragmentos a un progenitor común, cuando los fragmentos ya están lejos entre sí y el tiempo transcurrido es mayor a la escala de tiempo en la que aplica el modelo de Sekanina, esto es por ejemplo, muchos años o décadas, es una tarea más difícil y hay que abordarlo con simulaciones de otro tipo, por ejemplo numéricas, como es el caso del estudio de los cometas [Sungrazers](#).

1.6.6.2. Cometas Sungrazers

Los cometas sungrazers (Kreutz, 1888) son en sí mismo, un tema de estudio desde hace más de un siglo. Son cometas rasantes al Sol cuyas distancias de perihelio van desde 0.02 a 6 radios solares. Los miembros más prominentes de esta familia (casi una decena) fueron estudiados por Marsden, 1967. Hoy en día se conocen al menos 3400⁽¹⁾ cometas rasantes (Sekanina, 2025) con orbitas similares que fueron capaces de detectar los modernos instrumentos como

¹NASA, 2020.

LASCO y SOHO con equipamiento especializado para la observación del Sol en las últimas décadas. Muchos de ellos ni siquiera sobrevivían al pasaje luego del perihelio y se evaporaban completamente cuando llegaban a las inmediaciones solares ya que son muy pequeños (Seargent, 2009).



Figura 1.20: El gran cometa de 1882 o C/1882 R1 un cometa de la familia de Kreutz. Dibujo de los fragmentos del A al D, por C. L. Prince., publicado en el libro *The Story of the Comets* de Barnard, 1910.

Este caso es interesante porque se trata de cometas cuyas órbitas están relacionadas entre sí mediante un progenitor común. Los cometas C/1965 S1 (Ikeya-Seki) y C/1882 R1 (Great September Comet) figura (1.20), se habrían originado a partir de la fragmentación de un progenitor en el año 1106 d.c. (Marsden, 1967, *Comets*, 1982). También el cometa C/1970 K1 (White-Ortiz-Olelli) es compatible con la hipotética fragmentación en el siglo XVIII de un tercer fragmento desconocido del progenitor, en 1106 d.c., y también el cometa C/1880 C1 (Great Southern Comet) fragmentado del C/1843 D1 (Great March Comet) en el siglo XV luego de pasar por el perihelio en el siglo XI, por lo que estaríamos ante una cadena o cascada de fragmentaciones cometarias, según Sekanina y Chodas, 2004 como se muestra en la figura (1.21).

FRAGMENTATION HIERARCHY OF MAJOR SUNGRAZERS (TWO-SUPERFRAGMENT MODEL)

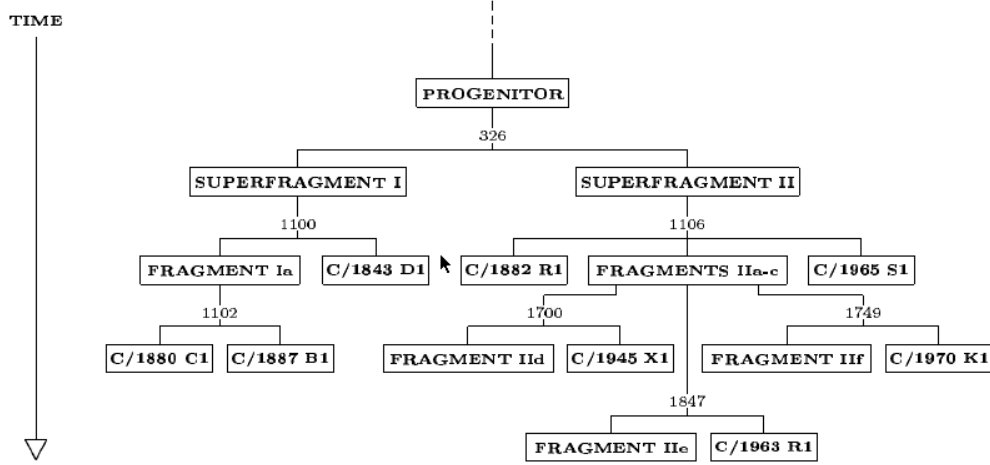


Figura 1.21: Árbol genealógico modelo para la fragmentación jerárquica de superfragmentos en Sekanina y Chodas, 2004.

1.6.7. Velocidades de fragmentación

Dado que los cometas son objetos pequeños, del orden del kilómetro, sus velocidades de escape son bajas, por debajo de 1 m/s como se muestra en la ecuación (1.17) para el caso de una densidad de 400 kg/m³ y un radio de 1 km. Por lo tanto se espera que las velocidades de fragmentación sean un poco por encima de este valor

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \sim 0.47m/s \quad (1.17)$$

Diferentes modelos aplicados a casos reales de fragmentación cometaria, arrojan valores razonables del orden de unos pocos m/s. En la tabla (1.3) se muestran valores determinados para varios cometas.

1.7. Método

En esta sección presentamos los datos utilizados y los cálculos realizados.

Tabla 1.3: Velocidades de fragmentación típicas de las componentes con respecto al cuerpo progenitor por varios autores.

Cometa o Par	$v_F(m/s)$	Referencia
3D/Biela	0.7 - 1.4	Marsden & Sekanina 1971
C/1986 P1 (Wilson)	4	Sekanina 1989
"	1	Meech et al 1995
D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9)	0.36 - 1.7	Sekanina et al 1997
141P/Machholz 2	1.3 - 2.8	Sekanina 1999
49 Sungrazers (promedio)	5	Sekanina 2002a
C/1970 K1 (White-Ortiz-Bolelli)	3 - 5	Sekanina 2002b
C/2002 A1 - C/2002 A2	2.7	Sekanina 2003
73P/Schwassmann-Wachmann	2.5	Sekanina 2006
C/1965 S1 (Ikeya-Seki)	<3	Sekanina 2007
C/1882 R1 (Great September Comet)	<5	Sekanina 2007
332P/Ikeya-Murakami	0.06 - 3.5	Jewitt et al 2016
C/2011 J2 (LINEAR)	3 - 5	Manzini et al 2016
C/2019 Y4	2.4	Sekanina 2023

1.7.1. Bases de datos del JPL/Horizons

Las órbitas de los cometas 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO) presentan una gran similitud en sus elementos orbitales, hecho que fue advertido por Sosa y Fernández, 2016. Ambos son cometas de la familia de Júpiter cercanos a la Tierra y esta enorme similitud orbital, es parte fundamental de la motivación de este trabajo. La órbita de ambos cometas fueron adquiridas de JPL/Horizons mediante la librería de Python AstroQuery (Ginsburg et al. 2019) que descarga la última órbita disponible para los objetos con la matriz de covarianza correspondiente, como se muestra en la tabla (1.4 y (1.7)).

1.7.2. Integraciones numéricas

Las integraciones numéricas de las órbitas se realizaron con el integrador numérico de N cuerpos "Mercury6" (Chambers, 1999). El integrador dispone de muchas sub-rutinas para realizar los cálculos. Dado que no tenemos restricciones computacionales porque la ventana temporal que nos interesa simular, es de algunos miles de años, podemos utilizar una rutina precisa y que resuelva bien los encuentros. Dicha rutina es la Bullirsch-Stoer que se desenvuelve muy bien en todas las situaciones. La precisión de los elementos orbitales se lista en la tabla (1.5) y los parámetros del integrador en la tabla (1.6).

Tabla 1.4: Tabla con las incertidumbres orbitales del 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO). Valores extraídos del JPL/Horizons

	169P/NEAT		P/2003 T12 (SOHO)	
	Epoca (JD): 2455087.5		Epoca (JD): 2456072.5	
	valor	σ	valor	σ
q (au)	0.6077309056	4.08×10^{-8}	0.57480572	1.90×10^{-6}
a (au)	2.60596600301	1.00×10^{-9}	2.568001678	4.66×10^{-7}
e	0.7667924659	1.63×10^{-8}	0.7761661416	7.56×10^{-7}
i ($^\circ$)	11.29962168	7.50×10^{-6}	11.4751543	7.17×10^{-5}
Ω ($^\circ$)	176.1922768	3.92×10^{-5}	176.4657154	0.0007064
ω ($^\circ$)	217.9597779	3.92×10^{-5}	217.66883337	0.00087347
M ($^\circ$)	341.65414507	1.80×10^{-6}	28.6334145	4.03×10^{-5}
t_0 (JD)	2455165.80455026	8.07×10^{-6}	2455952.94657536	0.00014678
T (yr)	4.203489900	2.23×10^{-8}	4.1152970	1.12×10^{-6}
H	16.8		19.6	

Tabla 1.5: Elementos orbitales keplerianos y componentes cartesianos, considerados en las integraciones numéricas con Mercury

Nombre	Variable	Formato de precisión
q	Distancia perihélica (au)	15.13
e	Excentricidad	15.13
i	Inclinación (deg)	13.10
g	Argumento de perihelio (deg)	13.10
n	Longitud de nodo ascendente (deg)	13.10
T	Época de perihelio	13.5
x	Coord. heliocéntrica X (au)	15.12
y	Coord. heliocéntrica Y (au)	15.12
z	Coord. heliocéntrica Z (au)	15.12
vx	Vel. heliocéntrica $V_x(\frac{au}{d})$	15.12
vy	Vel. heliocéntrica $V_y(\frac{au}{d})$	15.12
vz	Vel. heliocéntrica $V_z(\frac{au}{d})$	15.12

La configuración de nuestro archivo de parámetros de integración contiene los siguientes valores que han sido ajustados para nuestros cálculos (el formato de salida incluye tanto elementos orbitales como componentes cartesianas heliocéntricas de posición y velocidad). El formato numérico indicado en la tercera columna de la tabla ?? corresponde a la notación P.Q, donde P representa el ancho total del campo en caracteres y Q el número de cifras decimales. Las integraciones numéricas se realizaron en presencia de los 8 planetas del Sistema Solar y Plutón.

Tabla 1.6: Parámetros de las integraciones numéricas con Mercury6

Parámetro	Valor
output interval (days)	3
timestep (days)	0.1
accuracy parameter	1.d-12
ejection distance (AU)	100
radius of central body (AU)	0.005
central mass (solar)	1.0
Hybrid integrator changeover (Hill radii)	3
number of timesteps between data dumps	500
number of timesteps between periodic effects	100
include relativity in integration	no
include user-defined force	no

1.7.3. Parámetros no gravitacionales

Al tratarse los cometas de objetos con actividad, esto es, la expulsión de volátiles y partículas desde su superficie hacia el espacio, presentan lo que se conocen como fuerzas no gravitacionales. Las partículas y moléculas gaseosas que escapan del cometa, lo hacen llevándose consigo una pequeña cantidad de momento, lo que ocasionará, por la conservación del mismo, que el cometa sufra un pequeño impulso en la dirección contraria a la que escapan las partículas. Este impulso puede no solo afectar el movimiento del cometa y su órbita, si no también causar torques que modifiquen su período de rotación y estado de espín, tal como el efecto Yarkovski o YORP respectivamente con la diferencia que ahí es la propia radiación la que porta el momento y no partículas con masa producto del desgaseamiento (Vokrouhlický et al. 2015).

Las fuerzas no gravitacionales pueden modelarse con 3 parámetros que dan cuenta de la aceleración en las 3 direcciones linealmente independientes, radial, transversa y normal al plano orbital, y se llaman A_1 , A_2 y A_3 (Froeschle y Rickman, 1986, Marsden, 1968, Yeomans et al. 2004) llamados parámetros no gravitacionales. Es muy difícil medir estos parámetros experimentalmente, ya que dependen de la tasa de actividad del cometa y dependen además, de consideraciones geométricas de como es el desgaseamiento en el mismo, pero si se pueden ajustar como parámetros en aquellas órbitas que no se pueden ajustar puramente a un movimiento kepleriano heliocéntrico. JPL/Horizons calcula para los cometas que así lo requieran, los parámetros no gravitacionales. En nuestro caso ninguno de los cometas estudiados cuenta con parámetros

no gravitacionales al momento del estudio por lo que las integraciones numéricas se realizaron sin tenerlos en cuenta. Igualmente realizamos simulaciones numéricas con valores artificiales típicos de A_1 y A_2 y no observamos diferencias significativas con las integraciones sin parámetros no-gravitacionales para el período de tiempo estudiado.

1.8. Incertidumbre orbital

La incertidumbre orbital de ambos cometas es diferente debido a varios factores, como por ejemplo, el número de observaciones disponibles para calcular la órbita y la confiabilidad de las medidas. Los cometas más brillantes (en este caso el 169P/NEAT) generalmente cuentan con un número mayor de observaciones de diferentes observatorios lo cual permite un mejor ajuste de su órbita y en general los datos astrométricos son de mejor calidad. El número de observaciones astrométricas para el 169P/NEAT es de 1332 y abarcan unos ~ 36 años (1989 al 2022) mientras que para el P/2003 T12 (SOHO) es de 491 y abarcan unos ~ 12 años (2003 al 2016). También es importante la ventana de observación o arco observado. En los cometas más brillantes es mayor que en los cometas más tenues que solamente pueden ser detectados por los grandes telescopios. Los arcos de trayectoria más grandes permiten un mejor ajuste ya que ese arco significa una porción mayor de su órbita. En el caso ideal, lo mejor es disponer de observaciones de varias revoluciones u órbitas, cosa que no es posible en la mayoría de los cometas dado su gran excentricidad orbital y diferencia de brillo entre el perihelio y afelio. Todos estos factores resultan en una incertidumbre algunos órdenes de magnitud mayor para el cometa más pequeño, el P/2003 T12 (SOHO).

1.9. Generación de clones

Cualquier estudio numérico de la evolución de objetos, en este caso cometas, se limita a las órbitas nominales, o sea, la simulación numérica se realiza sobre la órbita nominal y en ningún momento del proceso de integración, se toman en cuenta las incertidumbres de los elementos orbitales. Para tomar en

cuenta la incertidumbre de una manera indirecta, una aproximación es utilizar clones (también llamados *clones geométricos* por Holt et al. 2020) de los objetos, es decir objetos ficticios generados en forma aleatoria y con ciertas restricciones para que sean compatibles con las incertidumbres orbitales observacionales..

El problema es de que manera se generan esos clones y con que criterio se toman esas pequeñas diferencias en los elementos orbitales con respecto a los nominales. Un criterio posible es tomar una distribución normal o uniforme en torno de los valores nominales con una dispersión igual a la incertidumbre del elemento. Generalmente se toma una distribución de tipo normal o gaussiana y se utiliza la incertidumbre como la desviación estándar de la distribución, como se muestra en la figura 1 del artículo.

Tabla 1.7: Matriz de covarianza de los elementos orbitales del cometa P/169 NEAT utilizada para la generación de los clones

	e	q	t_P	Ω	ω	i
e	2.7E^{-16}	-6.6E^{-16}	7.4E^{-14}	-1.9E^{-14}	4.9E^{-14}	9.5E^{-16}
q	-6.6E^{-16}	1.7E^{-15}	-1.8E^{-13}	4.3E^{-14}	-1.2E^{-13}	-5.0E^{-15}
t_P	7.4E^{-14}	-1.8E^{-13}	6.5E^{-11}	-3.4E^{-11}	5.8E^{-11}	1.0E^{-12}
Ω	-1.9E^{-14}	4.3E^{-14}	-3.4E^{-11}	1.5E^{-9}	-1.5E^{-9}	-2.0E^{-10}
ω	4.9E^{-14}	-1.2E^{-13}	5.8E^{-11}	-1.5E^{-9}	1.5E^{-9}	2.0E^{-10}
i	9.5E^{-16}	-5.0E^{-15}	1.0E^{-12}	-2.0E^{-10}	2.0E^{-10}	5.6E^{-11}

Las incertidumbres de los elementos orbitales están relacionadas entre sí, de manera que no es válido tomar cualquier valor dentro de $1-\sigma$ del semieje mayor y combinarlo con otros cualesquiera valores dentro de $1-\sigma$ de los elementos restantes. Esto es debido a que los errores en un elemento orbital afectan más o menos a otros elementos como se aprecia en los valores cruzados de los diferentes sigmas en la tabla (1.7)

La relación que guardan las incertidumbres de los diferentes elementos orbitales está contenida en la matriz de covarianza (Muinonen, 1996) y forma parte de las órbitas publicadas por el JPL/Horizons. Una forma de representar visualmente la matriz de covarianza es como una función gaussiana 6-dimensional donde los elementos de la diagonal son las incertidumbres de cada elemento orbital con respecto a si mismo, y los elementos fuera de la diagonal son las incertidumbres cruzadas de un elemento con respecto a otro.

El hecho que los clones no sean generados utilizando dicha matriz, no da

más o menos validez al clon en cuestión, simplemente que el mismo no será compatible con las incertidumbres observacionales conocidas hasta el momento. Los clones que generaremos, serán respetando las relaciones numéricas dictadas por esta matriz para que sean compatibles con las observaciones, porque de ellas deviene la órbita de los cometas estudiados.

1.10. Mapas de densidad

Una herramienta que utilizaremos para estudiar la evolución del conjunto de clones son los mapas de densidad. Una vez que se cuenta con las integraciones numéricas de todos los clones hacia el pasado, procedemos a calcular un histograma de los semiejes mayores para un instante dado de tiempo. Si este instante es muy cercano al inicio de la integración, es de esperar que el semieje de los clones se encuentre muy próximo a la condición inicial dada por la matriz de covarianza. Este histograma tendrá sus valores muy concentrados cerca del valor nominal del semieje y a medida que el tiempo transcurra en la integración, dicho histograma se irá dispersando y ensanchando. Dado que el histograma puede traducirse en la densidad numérica de clones en cierto intervalo de semiejes (dado por el bin del histograma), solo basta con definir límites en común para todos los histogramas y los mismos bins para poder construir para cada tiempo, su histograma correspondiente (Bevington y Robinson, 2003, Wall y Jenkins, 2012)

El mapa luego se construye uniendo todos los histogramas con bins en el elemento estudiado a lo largo de distintos intervalos de tiempo que también identificamos como bins temporales. La imagen resultante tiene como coordenada X el bin temporal y como coordenada Y el eje de bins del elemento orbital estudiado y la intensidad del píxel es el valor del histograma o densidad numérica de clones en ese bin (Bevington y Robinson, 2003). La escala de valores tiene como máximo el número total de clones (en el caso de que todos los clones caigan en el mismo bin) y 0 en el caso de que lo caiga ningún clon en ese bin.

Un mapa de estas características (como se muestra en la figura 6 del artículo) permite ver la dispersión de los clones a medida que transcurre la simulación numérica e identificar eventos de mayor o menor dispersión de estos elementos. En particular nos interesa estudiar no un elemento en particular, sino la distancia física relativa entre los cometas y la velocidad relativa entre ellos.

Capítulo 2

Artículo N^o1: Comet P/2003

T12 (SOHO): A possible
fragment of comet 169P/NEAT?



Comet P/2003 T12 (SOHO): A possible fragment of comet 169P/NEAT?

Santiago Roland Alvarez*, Andrea Sosa Oyarzabal

Centro Universitario Regional del Este, Universidad de la República, ruta nacional 9 y ruta 15, Rocha 27000, Uruguay

ARTICLE INFO

Keywords:

Jupiter family comets
Near-earth objects
Numerical
Dynamics

ABSTRACT

This work provides insights into the possible origin of comet P/2003 T12 (SOHO) and the dynamics of comet fragmentation events. We studied the hypothesis of the origin of the comet P/2003 T12 (SOHO) as a fragment of the Jupiter family comet 169P/NEAT. We studied the recent dynamical evolution of the comet pair and determined the epochs of relative minimum distance and velocity as well as the similarity between the orbits using different criteria following Rožek et al. (2011) and Kholshevnikov et al. (2016). We generated 6000 clones of both comets with orbital elements compatible with the observational uncertainties of the actual orbits and found that their evolution is stable for the past ~ 5000 years. We found four epochs where the relative distance and velocity exhibit simultaneous minima. We studied possible fragmentation events in these epochs by applying a simple break-up model for the generation of fictitious fragments at different relative speeds. Analyzing the orbital distance between the fragments, we found some fragments that exhibit noticeable stable behavior at a very low mutual orbital distance according to several distance definitions, which suggest that those fragments evolve in orbits very similar to that of the P/2003 T12 (SOHO). We conclude that comet P/2003 T12 (SOHO) could be a fragment of comet 169P/NEAT and the most likely epoch for such fragmentation would be at least 2000 years ago (around 94 A.D.), given that the fragments that best resemble comet P/2003 T12 (SOHO) are found in this epoch.

1. Introduction

The fragmentation of comets is a phenomenon that has been observed for the last 150 years, more than 100 times, in several dozen comets, and it is completely impossible to predict given the fact that it is depending on unknown data such as the strength of the internal cohesive forces, the abundance of volatiles, and the internal stress of the minor body (Trigo-Rodríguez, 2005). With the advent of large telescopes, it has been possible to record events with sufficient detail to develop more complex dynamic models of fragmentation, thanks to the astrometric and photometric study of the nucleus and its fragments. Broadly speaking, fragmentation generates few fragments (2) or many (more than 2) and even originates families like the Kreutz family, from the successive fragmentation of the parent body (Sekanina and Chodas, 2004). Comets can fragment recurrently, several times like comet C/2001 A2 (LINEAR) (Sekanina et al., 2002), or even undergo cascading fragmentation of larger fragments. These events are best observed near the perihelion of the comet and are usually accompanied by phenomena such as sudden changes in brightness (outbursts) due to the expulsion of dust towards the cometary coma, which is ejected together with the volatile that sublimate on the surface of the comet. Although there is no unified theory as to which internal mechanisms are the ones that will trigger cometary fragmentation, due to the fact

that many parameters that describe its internal structure are not known (i.e. abundance of volatile, internal geology of the comet, internal strength of the material), there are dynamical models that apply to particular cases that have been well studied and observed telescopically, such as the case of comet D/1993 F2 Shoemaker-Levy 9 (Sekanina et al., 1998), comet C/1999 S4 (LINEAR) (Samarasinha, 2001) and comet 332P/Ikeya-Murakami (Jewitt et al., 2016).

Fernández and Sosa (2015) found that the Jupiter family comets (hereafter JFCs) in near-Earth orbits (i.e. JFCs with perihelion distances at the time of discovery <1.3 au) 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO), move on stable orbits for the past $\sim 10^4$ yr, avoiding very close encounters with Jupiter, and showing an orbital behavior very similar to that of near-Earth asteroids (hereafter NEAs) in cometary orbits. Unlike the vast majority of the JFCs in near-Earth orbits, the source region of 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO) may be the main asteroid belt. That would explain their much longer physical lifetimes in the near-Earth region of several thousands years, due to a more consolidated structure and a higher mineral content, than those of comets coming from the trans-Neptunian belt or the Oort Cloud.

Many of these comets are also responsible for populating the planetary region with dust and particles which feed the meteor showers observed on Earth, like the case for α -Capricornids shower, that could be

* Corresponding author.

E-mail address: santiago.roland@cure.edu.uy (S.R. Alvarez).

Table 1

Data extracted from NASA-JPL/Horizons at http://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html. q is the perihelion distance, a is the semimajor axis, e is the eccentricity, i is the inclination, Ω is the longitude of ascending node, ω is the argument of perihelion, M is the mean anomaly, t_0 is the time of passage of perihelion, T is the orbital period and H_T is the absolute magnitude.

Nominal orbital elements and uncertainties				
	169P/NEAT		P/2003 T12 (SOHO)	
	Value	Uncertainty	Value	Uncertainty
q (au)	0.6077309056	4.08×10^{-8}	0.57480572	1.90×10^{-6}
a (au)	2.60596600301	1.00×10^{-9}	2.568001678	4.66×10^{-7}
e	0.7667924659	1.63×10^{-8}	0.7761661416	7.56×10^{-7}
i ($^\circ$)	11.29962168	7.50×10^{-6}	11.4751543	7.17×10^{-5}
Ω ($^\circ$)	176.1922768	3.92×10^{-5}	176.4657154	0.0007064
ω ($^\circ$)	217.9597779	3.92×10^{-5}	217.66883337	0.00087347
M ($^\circ$)	341.65414507	1.80×10^{-6}	28.6334145	4.03×10^{-5}
t_0 (JD)	2455165.80455026	8.07×10^{-6}	2455952.94657536	0.00014678
T (yr)	4.203489900	2.23×10^{-8}	4.1152970	1.12×10^{-6}
$Epoch$ (JD)	2455087.5		2456072.5	
H_T	16.8		19.6	

associated with a meteoroid generation event by comet 169P/NEAT, as late as 30 A.D. for meteoroids to reach Earth's orbit, according to [Jenniskens \(2007\)](#) or even as late as 2500 B.C. according to [Jenniskens and Vaubaillon \(2010\)](#) for a massive break-up event that explain the total meteoroid mass observed today. Could it have generated a larger fragment at this same time that gave rise to P/2003 T12 (SOHO) in this time frame? Is the current orbit of P/2003 T12 (SOHO) compatible with some fragment originating from a fragmentation of 169P/NEAT in the past? To explore this hypothesis, we approach the problem numerically using an N-body integrator that allows us to study the dynamics of both comets into the past searching for epochs of close approaches between both comets that could be considered as fragmentation events. Once those epochs are found, by means of new numerical integration of synthetic fragments towards the future, we determine if some fragments can reproduce the actual orbit of P/2003 T12 (SOHO).

Following [Jenniskens and Vaubaillon \(2010\)](#) and based on the de-biased near-Earth Objects (hereafter NEOs) distribution with $H < 18$ by [Bottke et al. \(2002\)](#), we estimated the probability of chance alignment between 169P/NEAT and P/2003 T12 to be of 1 in 277 if we consider the near-Earth Comets (hereafter NECs) population, or 1 in 31 if we consider the NEOs population. We used updated values (by January 2024) from the JPL database¹ for the size of the NEOs population with $H < 18$ and for the size of the NECs population with $H < 18$ (1060 and 120 objects, respectively).

2. Data and method

We used the available orbital data provided by NASA-JPL/Horizons for comet 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO) showed in [Table 1](#). Comet 169P/NEAT is the biggest and brightest of the pair with an absolute total magnitude $H_T = 16.8$ mag in comparison with P/2003 T12 (SOHO) with $H_T = 19.6$ mag. 169P/NEAT's orbital uncertainties are roughly one order of magnitude smaller than those of P/2003 T12 (SOHO) due to a larger number of astrometric observations and a longer observational time span (~ 33 years for 169P/NEAT and ~ 12 years for P/2003 T12 (SOHO)).

For numerical integration of the cometary orbits, we used Mercury 6 N-body numerical integrator ([Chambers, 1999](#)) that uses the Bullirsh-Stoer algorithm of integration. From the dynamical evolution of both comets, we can determine the epochs of maximum approach between their orbits and determine the relative distance and relative speed to look for times when both comets had a similar spatial location and speed. Although the existence of this minimum relative distance and velocity does not assure us that both objects come from the fragmentation of a larger body, it serves as a first approximation to the problem.

2.1. Orbital element uncertainties

We study if the relative minima of distances and velocities are maintained for different pairs of orbits that are within the uncertainty interval of their orbital elements. Orbital element variations cannot be generated randomly because errors in one element may affect another element and the relationship between them is given by the co-variance matrix. According to [Muinonen \(1996\)](#), we generated them by means of Eq. (1),

$$n(X, X_o, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^3 \sqrt{\det(\Sigma)}} \exp\left(-\frac{1}{2} \Delta X^T \Sigma^{-1} \Delta X\right) \quad (1)$$

where n is the orbital element density function, X is the vector with the set of orbital elements, X_o is the nominal orbital element values for the actual epoch, Σ is the co-variance matrix and ΔX is the departure of orbital elements from nominal values.

We generated 1000 orbital variations of each comet choosing a set of orbital elements given by its 1- σ covariance matrix. [Fig. 1](#) shows the orbital elements generated for the orbital element variations of comet 169P.

2.2. Fragmentation model

Comets undergo fragmentation events in which one or more fragment bodies are generated. In these events, fragments may reach a escape velocity of a few meters per second, and leave the gravitational field of the progenitor as observed in cases like the breakup of comet 332P Ikeya-Murakami ([Jewitt et al., 2016](#)). In order to model the comet breakup showed in [Fig. 2](#), we consider the positions of fragment and parent body to be the same at the instant of breakup (as showed in Eq. (2)), and the fragment moving away from the parent body with a relative velocity \vec{v}_L given by Eq. (3), where \vec{v}_C is the velocity of the parent body and \vec{v}_F is the velocity of the fragment in a Cartesian heliocentric frame.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{Fragment} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{Comet} \quad (2)$$

We generated a spherical distribution of relative velocities where the initial position of the fragment is the same as that of the parent body, and the heliocentric ecliptic Cartesian coordinates of the relative velocities are given by Eq. (4), where $-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq +\frac{\pi}{2}$ and $0 \leq \beta \leq 2\pi$, shown in [Fig. 2](#).

$$\vec{v}_C - \vec{v}_F = \vec{v}_L \quad (3)$$

$$\begin{cases} v_F^{(x)} = v_C^{(x)} - v_L^{(x)} \cos \alpha \cos \beta \\ v_F^{(y)} = v_C^{(y)} - v_L^{(y)} \cos \alpha \sin \beta \\ v_F^{(z)} = v_C^{(z)} - v_L^{(z)} \sin \alpha \end{cases} \quad (4)$$

We generated a total of 6000 clones, 1000 for each value of relative speeds of 0.3, 0.5, 1, 3, 10 and 20 m s⁻¹, at the different epoch of minima.

2.3. Orbit similarity using metrics

Finally, to compare the orbits of the fragments with that of P/2003 T12 (SOHO), we used orbital metric functions that have been proposed to determine whether or not two orbits have a common origin to study the genesis of meteor streams and asteroid families. These methods consist of metric functions defined in multidimensional spaces of the osculating orbital elements ([Southworth and Hawkins, 1963](#); [Rožek et al., 2011](#)). By applying these metric functions we obtain a value for a parameter D which can be related to the orbital similarity of a pair.

¹ JPL/Horizons database: http://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html.

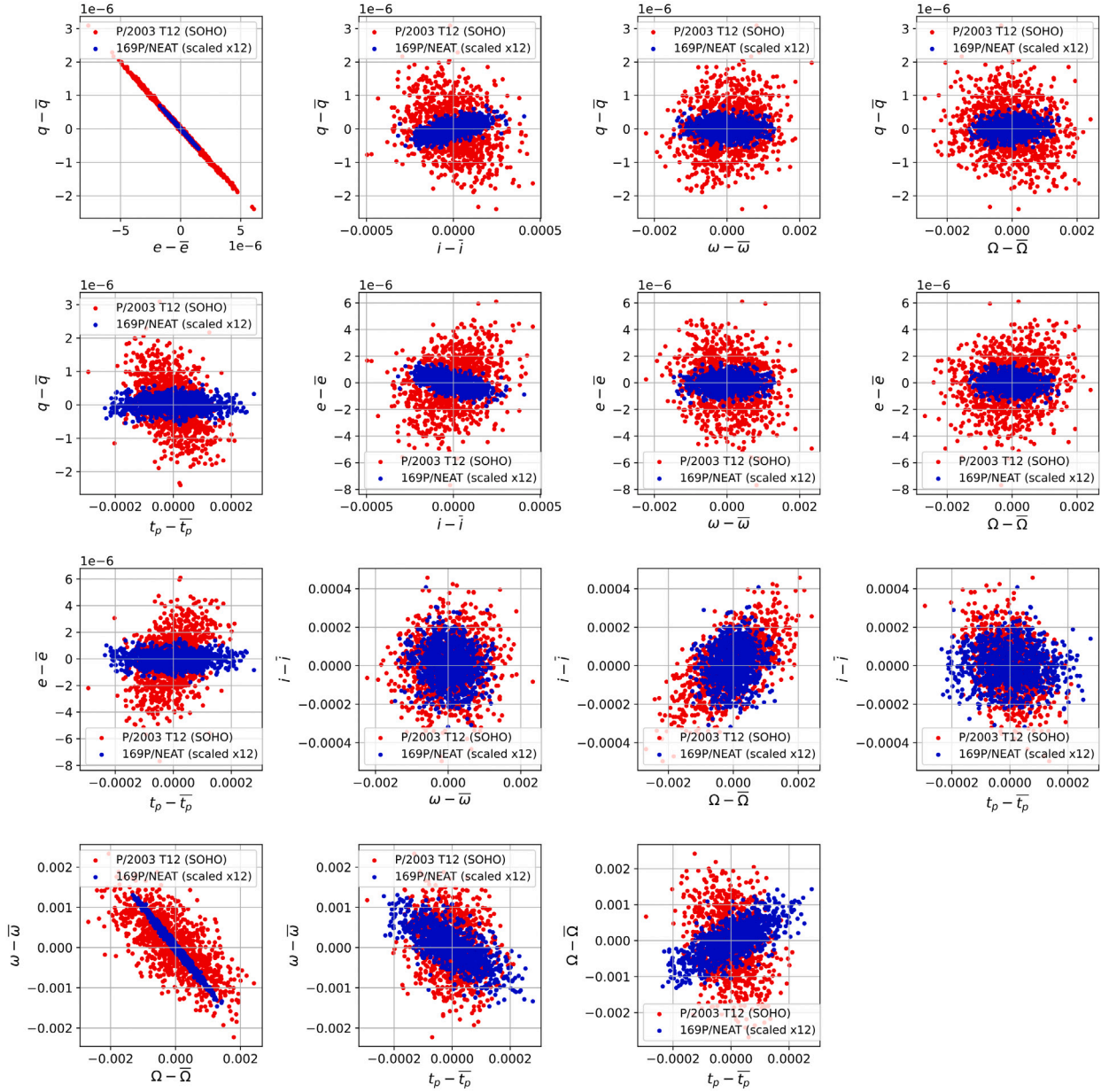


Fig. 1. Orbital elements compatible with observation uncertainties generated with the covariance matrix within $1\text{-}\sigma$ of nominal values for comets 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO).

2.3.1. Southworth and Hawkins criteria

The metric function proposed by Southworth and Hawkins (1963) uses as input values the perihelion distances and eccentricities. The quantities I_{BA} and Π_{BA} are the angle between orbital planes of both orbits and the difference in longitude of perihelion respect to the orbit's intersection line respectively, as given in Eq. (5).

$$D_{SH}^2 = (e_B - e_A)^2 + (q_B - q_A)^2 + 4 \sin^2 \left(\frac{I_{BA}}{2} \right) + 4 \left(\frac{e_B + e_A}{2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\Pi_{BA}}{2} \right) \quad (5)$$

where the quantities I_{BA} and Π_{BA} can be calculated as follows by Eqs. (6)–(8), and e_A , e_B , i_A , i_B , Ω_A and Ω_B represents, eccentricity, inclination and longitude of ascending node, respectively for bodies A and B.

$$\sin^2 \left(\frac{I_{BA}}{2} \right) = \sin^2 \left(\frac{i_B - i_A}{2} \right) + \sin i_A \sin i_B \sin^2 \left(\frac{\Omega_B - \Omega_A}{2} \right) \quad (6)$$

$$\Pi_{BA} = \omega_B - \omega_A + 2 \arcsin (S_{BA}) \quad (7)$$

$$S_{BA} = \cos \left(\frac{i_B + i_A}{2} \right) \sin \left(\frac{\Omega_B - \Omega_A}{2} \right) \sec \left(\frac{I_{BA}}{2} \right) \quad (8)$$

2.3.2. Drummond criteria

Drummond (1981) proposed all terms to be dimensionless and introducing the quantity Θ_{BA} as the angle between the Laplace–Runge–Lenz vectors of the orbit pair \vec{e}_A and \vec{e}_B given in Eq. (9).

$$D_D^2 = \left(\frac{e_B - e_A}{e_B + e_A} \right)^2 + \left(\frac{q_B - q_A}{q_B + q_A} \right)^2 + \left(\frac{I_{BA}}{180^\circ} \right)^2 + \left(\frac{e_B + e_A}{2} \right)^2 \left(\frac{\Theta_{BA}}{2} \right) \quad (9)$$

where we can calculate Θ_{BA} as given in Eq. (10)

$$\Theta_{BA} = \arccos \left(\frac{\vec{e}_A \cdot \vec{e}_B}{e_A e_B} \right) \quad (10)$$

2.3.3. Jopek criteria

Jopek (1993) introduced an hybrid criteria to compute the orbital distance parameter that aims to solve the overdependence of the

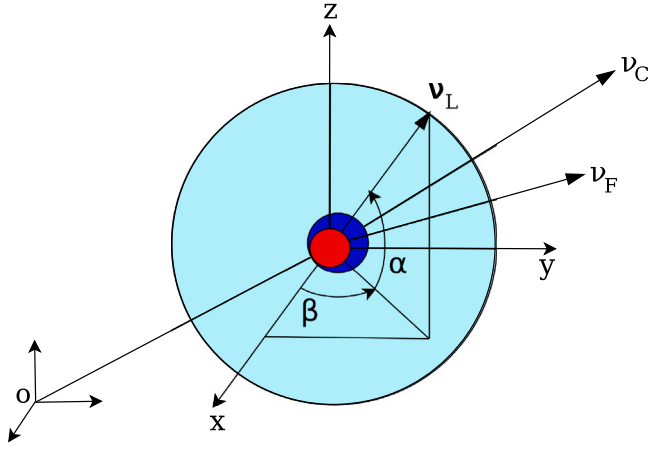


Fig. 2. Scheme showing the geometric definition of the relative velocities for fragments.

first Drummond term on eccentricity and overall overdependence of Southworth and Hawkins criteria on perihelion distance. It is given in Eq. (11).

$$D_H^2 = (e_B - e_A)^2 + \left(\frac{q_B - q_A}{q_B + q_A}\right)^2 + 4 \sin^2 \left(\frac{I_{BA}}{2}\right)^2 + 4 \left(\frac{e_B + e_A}{2}\right)^2 \times \sin^2 \left(\frac{\Pi_{BA}}{2}\right) \quad (11)$$

2.3.4. Kholshchevnikov's natural metrics

In a mathematical review of metric criterias, Kholshchevnikov et al. (2016) proposes several space metrics that are in addition, mathematically well defined. Here we show some of the five metrics proposed. The function ρ_1 given in Eq. (12) satisfies all axioms of a metric and for our purposes, the scale factor L can be taken as 1.

$$\rho_1^2 = \frac{1}{L} (p_1 + p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} \cos I) + (e_1 + e_2 - 2e_1 e_2 \cos P) \quad (12)$$

Additional metric functions can be considered by defining metrics in factor-spaces as a way to eliminate the dependence on the longitude of ascending node and the argument of perihelion. Such quantities then can be affected by secular perturbations in Eq. (13), according to Kholshchevnikov et al. (2016).

$$\rho_4^2 = (1 + e_1)^2 p_1 + (1 + e_2)^2 p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} (e_1 e_2 + \cos I) \quad (13)$$

Metric function ρ_4 disregards the argument of perihelion ω and ρ_5 both argument of perihelion ω and longitude of ascending node Ω and constitute a 4-dimension and 3-dimension space respectively showed in Eq. (14).

$$\rho_5^2 = (1 + e_1)^2 p_1 + (1 + e_2)^2 p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} (e_1 e_2 + \cos(i_1 - i_2)) \quad (14)$$

where the quantities $\cos P$ and $\cos I$ can be calculated as follows with Eqs. (15) and (16)

$$\cos I = c_1 c_2 + s_1 s_2 \cos(\Omega_1 - \Omega_2) \quad c = \cos i \quad s = \sin i \quad (15)$$

$$\cos P = s_1 s_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + (\cos \omega_1 \cos \omega_2 + c_1 c_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2) \times \cos(\Omega_1 - \Omega_2) \quad (16)$$

ρ_1 , ρ_4 and ρ_5 are function of the semi-latus rectum p , eccentricity e , inclination i , argument of perihelion ω , longitude of ascending node Ω and a factor scale L equal to 1.

Table 2

Epoch for each one of the four relative distance and velocity minima V_{min} and D_{min} studied.

Minimum	1	2	3	4
JD	2 347 903.5	2 146 698.5	1 951 546.5	1 755 423.5
Year	1716 A.D.	1165 A.D.	631 A.D.	94 B.C.
D_{min} (au)	0.012	0.020	0.014	0.02
V_{min} (m s ⁻¹)	61	8	87	40

3. Results and discussion

3.1. Evolution of the comet pair

To identify potential epochs for a hypothetical fragmentation of 169P/NEAT that may have given rise to comet P/2003 T12 (SOHO), we conducted a dynamic study of both orbits over a span of 10 000 years in the past. However, for the sake of clarity, the plots presented herein focus on the most recent 5000 years. We found an overall stable evolution shown in Fig. 3.

We identified multiple minima in both relative velocity and position, closely coinciding in epochs. All of these minima exhibit an orbital metric function value below $\bar{D} < 0.1$, indicative of strong orbital alignment. Notably, certain epochs revealed even lower values of $\bar{D} < 0.01$. Comet 169P/NEAT had encounters with Earth, Mars and Venus, roughly every 2000 years with encounter distances near the Hill radius of each planet. This could be the reason of the randomization of minima after 2000 years of the integration to the past as showed in Fig. 5. Following Kholshchevnikov et al. (2016), we also calculated proposed metrics ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 , and ρ_5 , and found similar behavior as classical metrics, as shown in Fig. 4. Hereafter, we will consider the average metric function as an indicator of orbital metric distance \bar{D} .

It is clearly seen in Fig. 6 that before 2000 years in the past, clones evolve in such a way that relative velocity and position are completely randomized. This defines a time span of interest, between the present and 2000 years to the past in which any given orbit pair in the present time within 1- σ error show similar evolution. This ensures that times of relative distance and velocity minima are similar regardless the orbital uncertainty and make this minima epochs more robust in order to search for favorable and plausible fragmentation events.

3.2. Density plot of minimum epochs

We studied the robustness of minima computing relative distances and velocities for each combination of the simulated cometary cloned pairs by means of the covariance-matrix as explained in 2.1. Fig. 6 shows a density plot constructed as a 2-dimensional histogram with horizontal and vertical bins in which four minima can be found within 2000 years in the past. First and second distance and velocity minimum are very strong and visible. The third and fourth minimum shows higher dispersion and start to fade in the background. Earlier minima are completely randomized.

3.3. Possible fragmentation epochs

After the orbit evolution analysis, we selected the four most recent minima as candidates for tentative epochs that correspond to fragmentation events. In all cases the minima of the relative position and velocity occur somewhat simultaneously. Results are shown in Table 2.

We found absolute values of 8 m s⁻¹ for relative velocity, and 0.012 au for relative distance, in the 5000 year long time span. Numerical integration of fragments generated in the first and second minima exhibit slow velocity fragments evolving close together and far from P/2003 T12 (SOHO) as shown in Figs. 7 and 8. Unless higher fragmentation velocities are considered, we conclude that this fragmentation is so recent in the past that is rather unlikely.

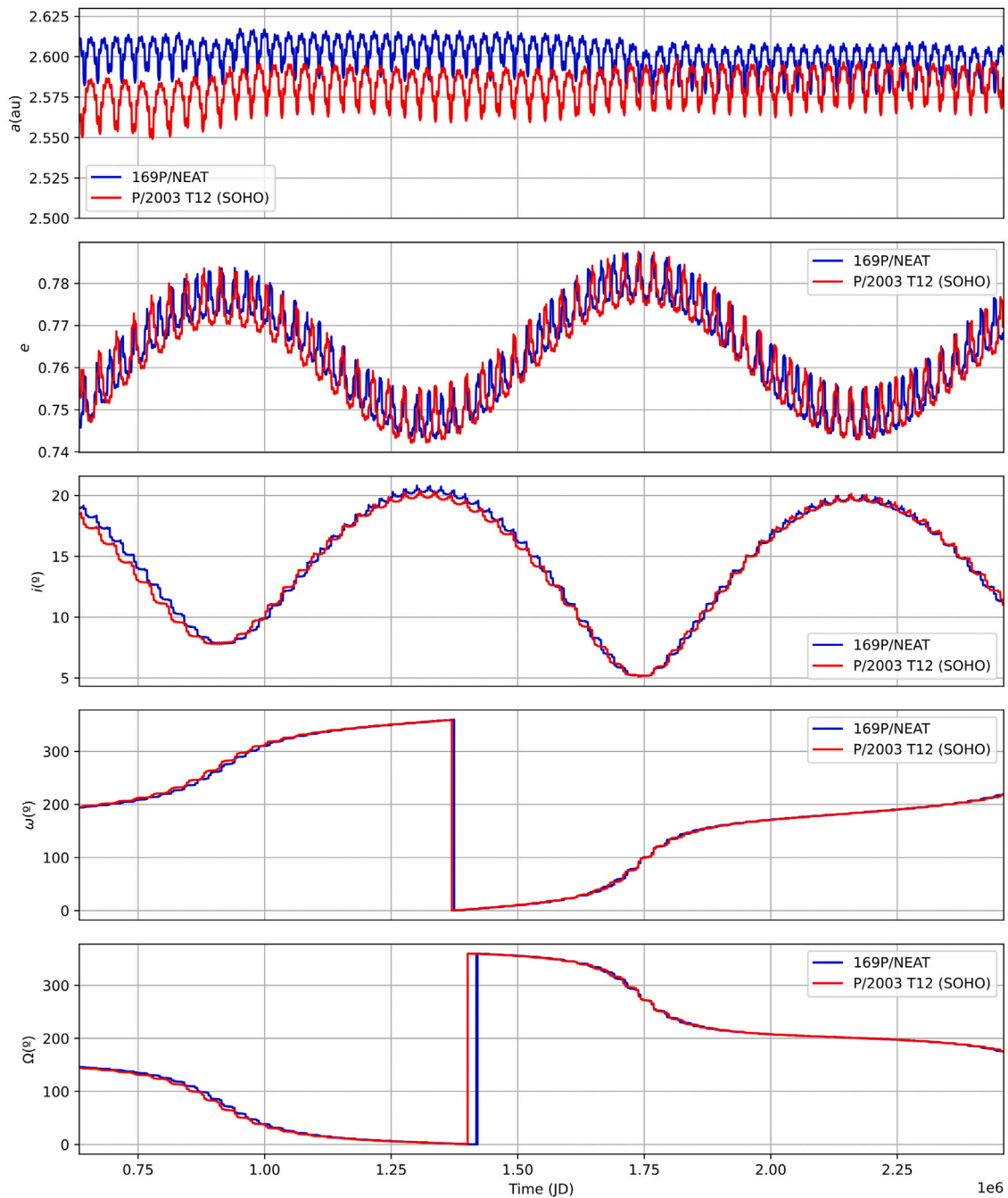


Fig. 3. Evolution of 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO) orbital elements for the past 5000 years.

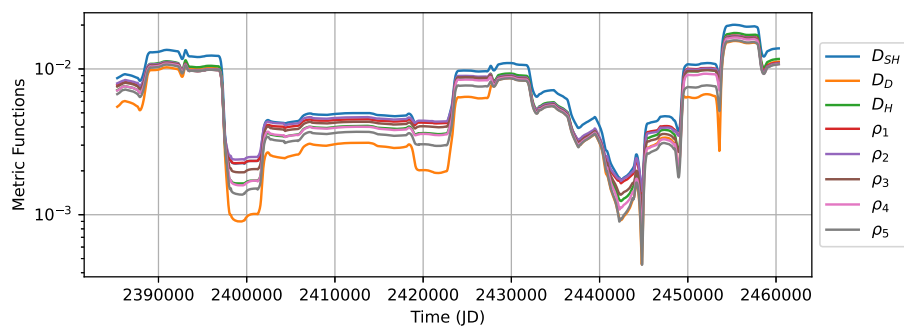


Fig. 4. Presentation of various metric functions explored in the study for a randomly selected object, highlighting the consistent agreement observed across all metrics.

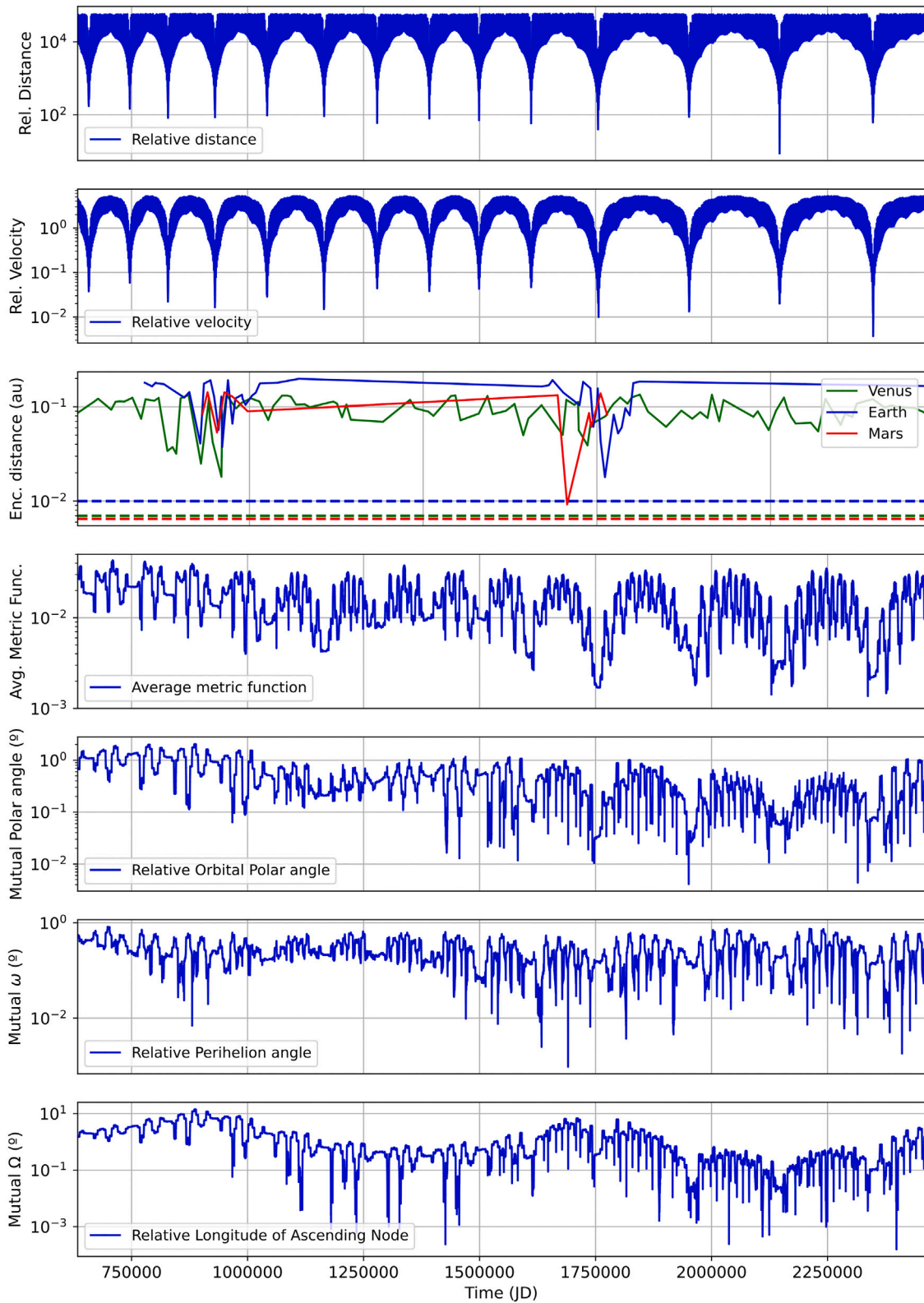


Fig. 5. Detailed plot of relative distance and velocity, encounter distance with Venus, Earth and Mars, Averaged metric functions and mutual orbit polar angle, perihelion direction angle and nodal angle. It is easily seen that the first four minima starting from the right, also match with orbital distances minima below $\bar{D} < 0.005$.

Analyzing the third and fourth minima we found that the fragments become compatible with P/2003 T12 (SOHO) orbit evolution as shown in Fig. 9, showing lower values of metric distances, specially for the fourth minimum which exhibit P/2003 T12 (SOHO) surrounded by evolved fragments at intermediate fragmentation velocities ($\sim 10 \text{ m s}^{-1}$)

shown in Fig. 10. In order to determine the best fragment candidate that better resembles the actual orbit of comet P/2003 T12 (SOHO), we compute the orbit metric function for a period of time larger than the comet’s orbital period. We chose the last 50 periods before present time and evaluate the mean value of the averaged orbital metric function

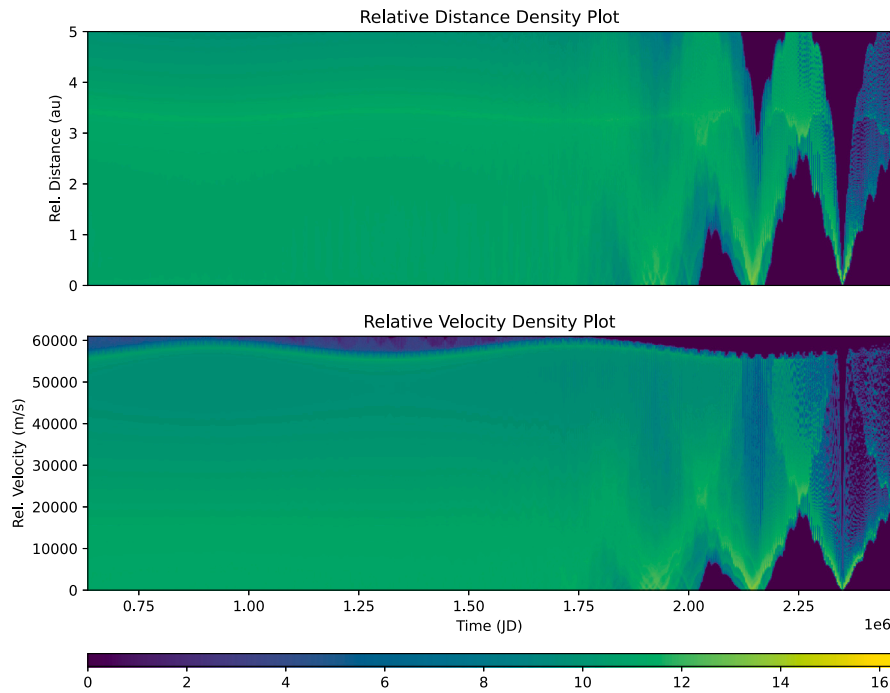


Fig. 6. Logarithmic density plot of relative distance and velocity for combination of approximately 200 000 comet pairs for 5000 years in the past.

of each fragment shown in Fig. 11. The best fragment found for each one of the four minima has an evolution of its orbital distance \bar{D} below 0.02, and in particular the intermediate velocity fragments in the 4th minimum have values \bar{D} below 0.002 resulting in the best fragmentation event candidate which is shown in Fig. 11 and Table 3.

3.4. The case of 2017 MB1

The object 2017 MB1 is worth a mention since its orbital elements could be regarded as very similar to 169P/NEAT as noted by Wiegert et al. (2017). By means of numerical integrations, we found that minima in relative velocity and distance, as well as the orbit distances exhibit higher values as shown in Fig. 12, and therefore it seems unlikely that comet P/2003 T12 (SOHO) could be generated as a first-generation fragment of object 2017 MB1.

4. Conclusions

Orbital evolution of comet 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO) are very stable in the past 5000 years and several minima of relative velocities and distances were found. Adding observational uncertainties to comet's orbital elements shows that most recent minima remain roughly unchanged in time. Earlier minima randomize and there is no pattern observed. This could be caused by gravitational influence of the inner planets in a similar fashion NEOs are influenced by close encounters with inner planets like Earth and Venus (Gladman et al., 2000), as shown in Fig. 5 in which encounter distances almost reach Hill's radius of inner planets roughly 2000 and 4500 years ago.

In Table 3 results are summarized and it can be easily seen that for the first and second minima, best fragments candidates are found to be at high fragmentation speeds. In some cases the best fragment has the minimum distance mean value for several metric definitions. The dispersion is high and not stable in time, and that can be seen in the high values of σ_D in Table 3. All three metrics are consistent showing best fragments to have high fragmentation speeds.

In the case of the third minimum, distance values are roughly half of the ones on the second minimum but the best fragment is still obtained at maximum fragmentation velocity of 20 m s⁻¹. The 4th

Table 3

Average metric function of the best fragments of 169P/NEAT closest to P/2003 T12 (SOHO) calculated with metrics D_{SH} , D_D , D_H , ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 and ρ_5 for the four minima. The best fragment among all fragmentation speeds is marked.

Min	$ \bar{v}_f $ (m s ⁻¹)	frag ID	\bar{D}	σ_D	
1	0.3	f-1624	0.01818	0.00770	
	0.5	f-249	0.01817	0.00767	
	1	f-680	0.01814	0.00766	
	3	f-1886	0.01783	0.00779	
	10	f-113	0.01706	0.00776	
	20	f-674	0.01353	0.00722	♣
2	0.3	f-1704	0.01526	0.00782	
	0.5	f-1667	0.01544	0.00789	
	1	f-317	0.01525	0.00787	
	3	f-1969	0.01523	0.00785	
	10	f-415	0.01534	0.00793	
	20	f-737	0.01523	0.00769	♣
3	0.3	f-1717	0.00629	0.00406	
	0.5	f-1542	0.00639	0.00414	
	1	f-444	0.00641	0.00385	
	3	f-554	0.00599	0.00389	
	10	f-1973	0.00579	0.00361	
	20	f-678	0.00509	0.00240	♣
4	0.3	f-1002	0.00668	0.00423	
	0.5	f-455	0.00669	0.00464	
	1	f-1404	0.00713	0.00475	
	3	f-1780	0.00268	0.00190	
	10	f-1119	0.00126	0.00014	♣
	20	f-782	0.00196	0.00107	

minimum shows the best fragment obtained (f-1119) at intermediate fragmentation speeds (~ 10 m s⁻¹) and a noticeable low σ_D , indicating that fragment distance value is stable in time. Further analysis could take advantage of intermediate velocities for a better sampling.

4.1. Minima at ~ 1716 A.D., ~ 1165 A.D. and ~ 631 A.D.

After analyzing the four candidates for fragmentation events with our simple model, it is clear that a fragmentation with relative fragmentation velocities ranging from 0.3 to 20 m s⁻¹ in the two most recent

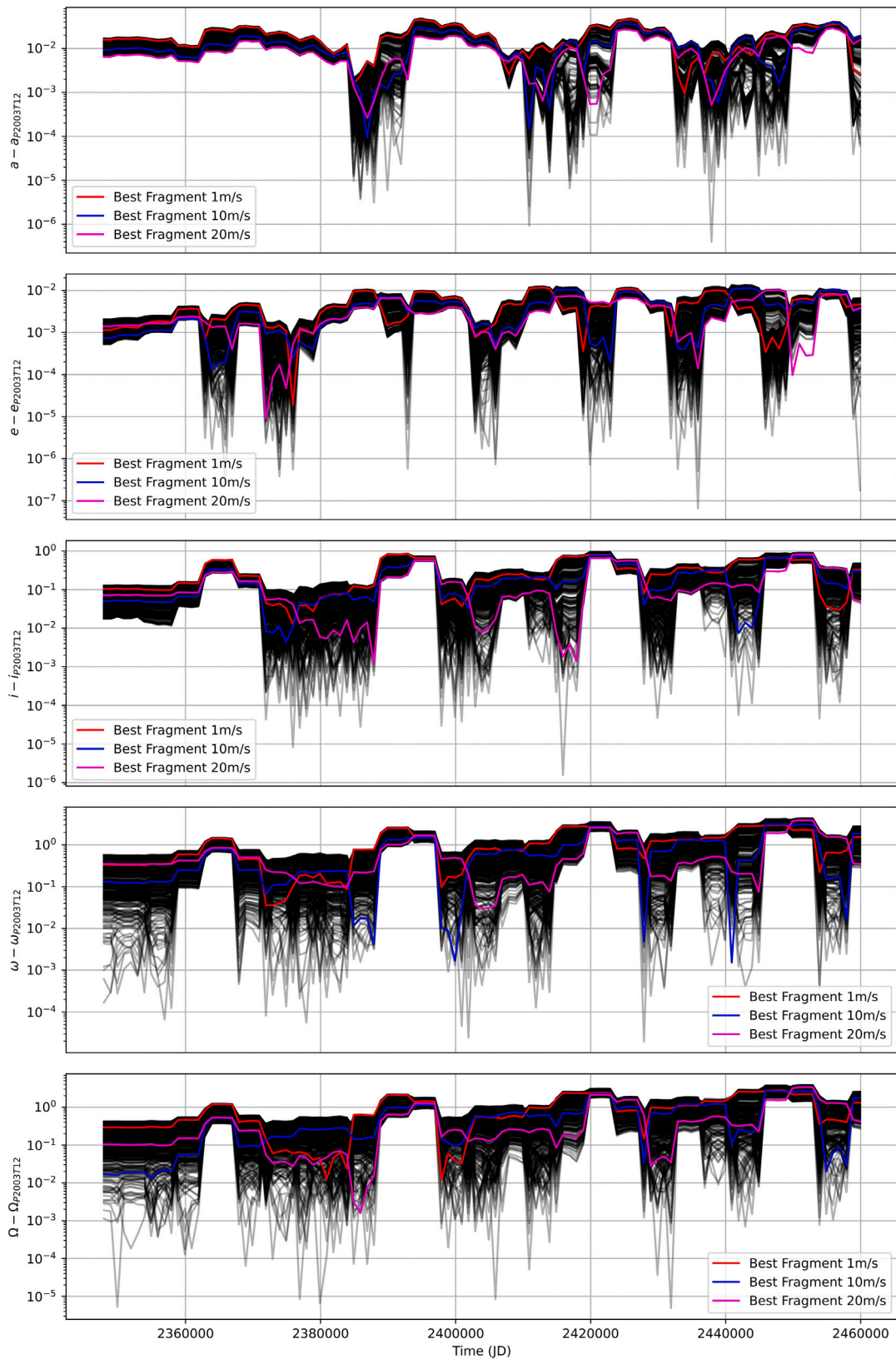


Fig. 7. Semi-major axis relative to P/2003 T12 (SOHO) showing cumulative evolution of fragments and best fragments calculated for 1, 10 and 20 m s⁻¹ velocity at the first minimum in logarithmic scale.

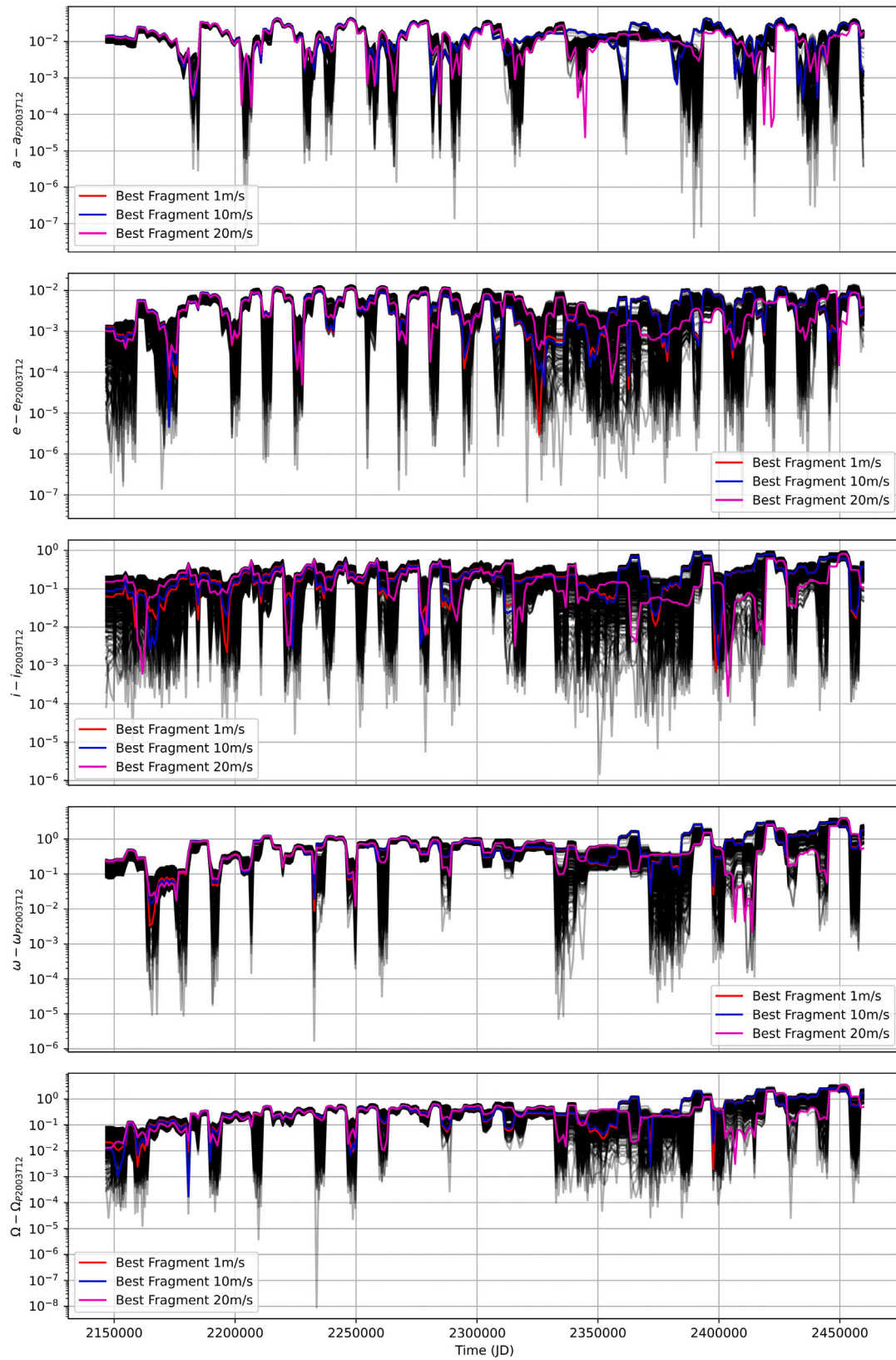


Fig. 8. Semi-major axis relative to P/2003 T12 (SOHO) showing cumulative evolution of fragments and best fragments calculated for 1, 10 and 20 m s⁻¹ velocity at the second minimum in logarithmic scale.

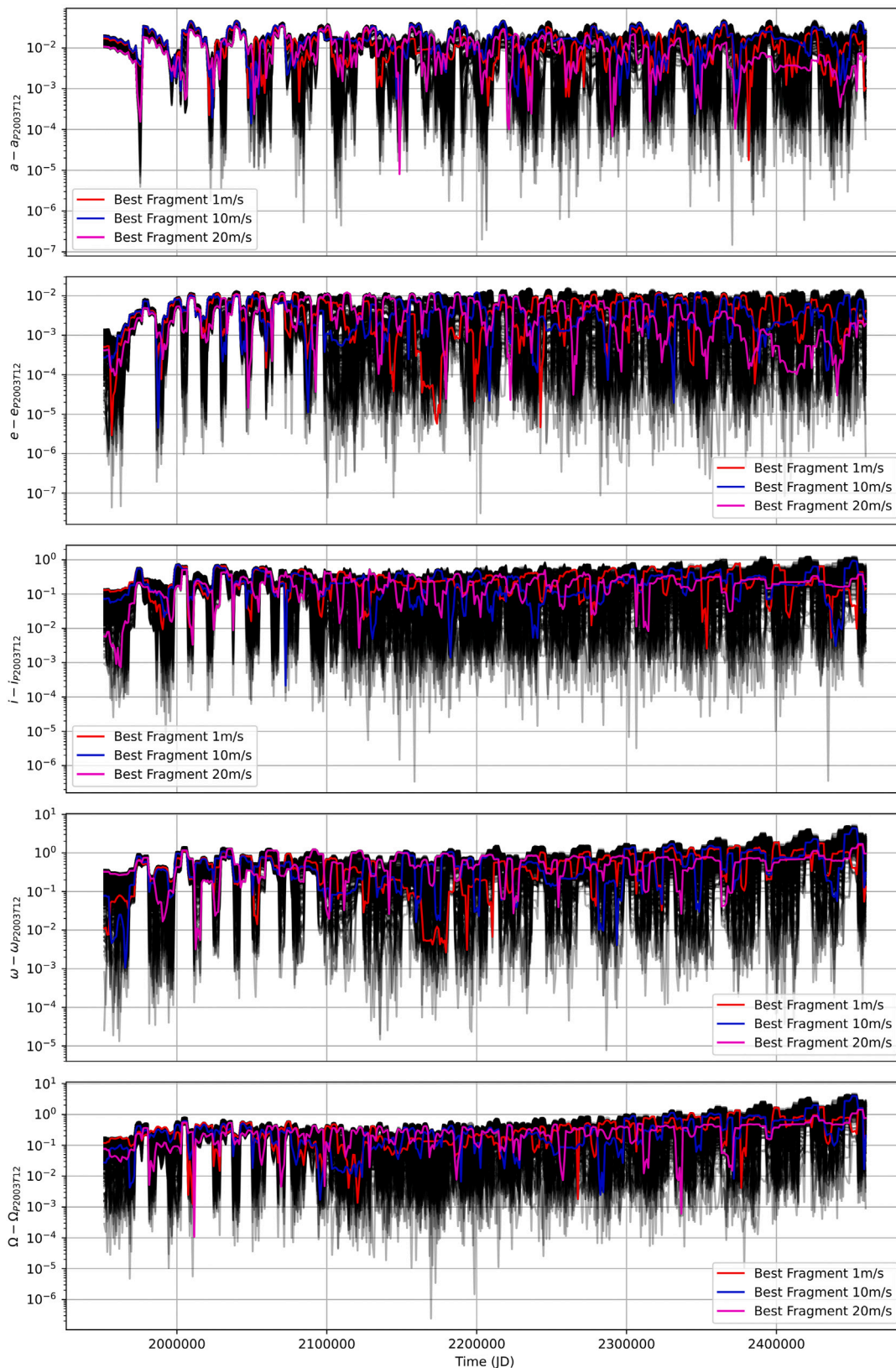


Fig. 9. Semi-major axis relative to P/2003 T12 (SOHO) showing cumulative evolution of fragments and best fragments calculated for 1, 10 and 20 m s⁻¹ velocity at the third minimum in logarithmic scale.

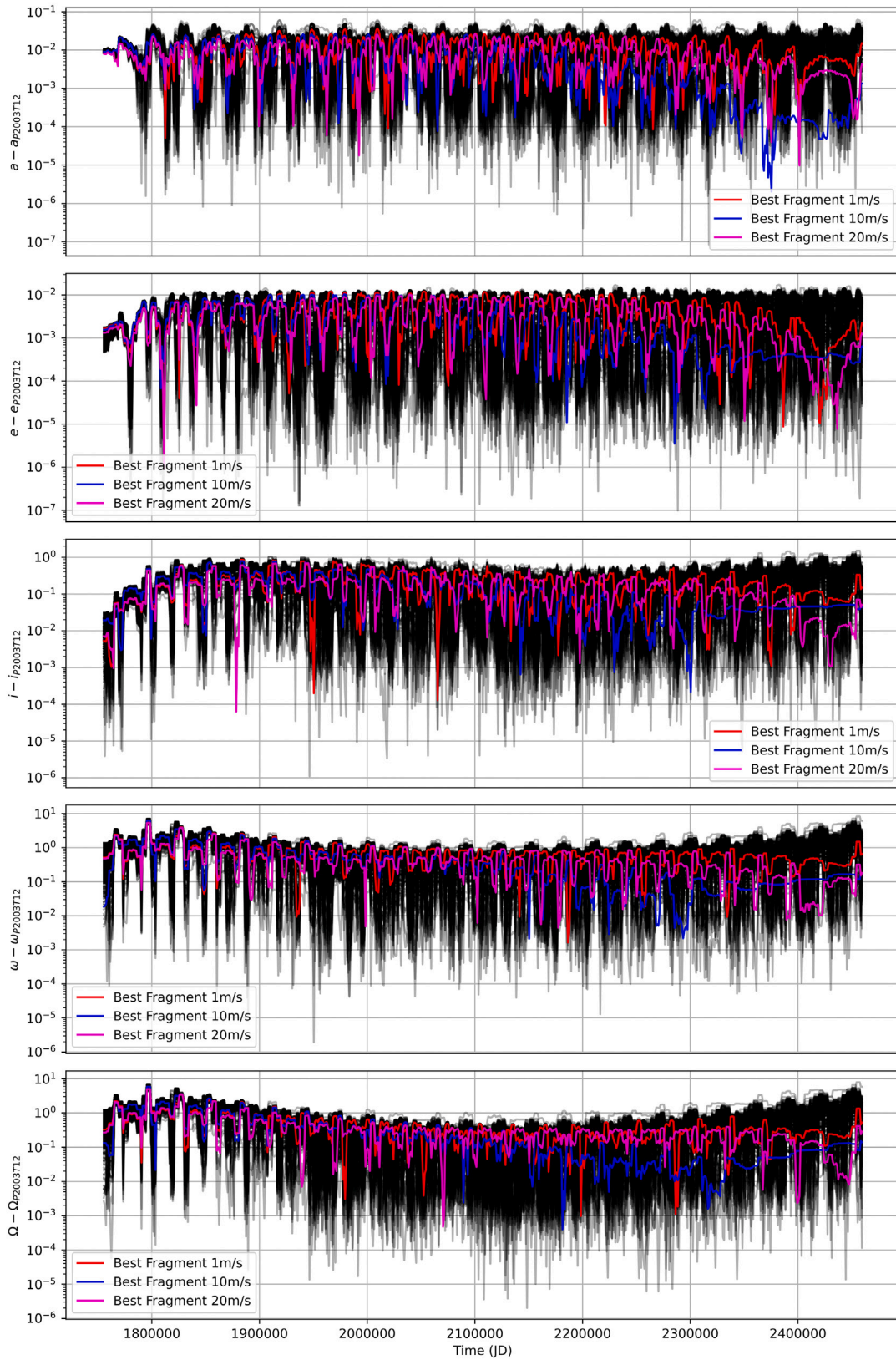


Fig. 10. Semi-major axis relative to P/2003 T12 (SOHO) showing cumulative evolution of fragments and best fragments calculated for 1, 10 and 20 m s⁻¹ velocity at the fourth minimum in logarithmic scale.

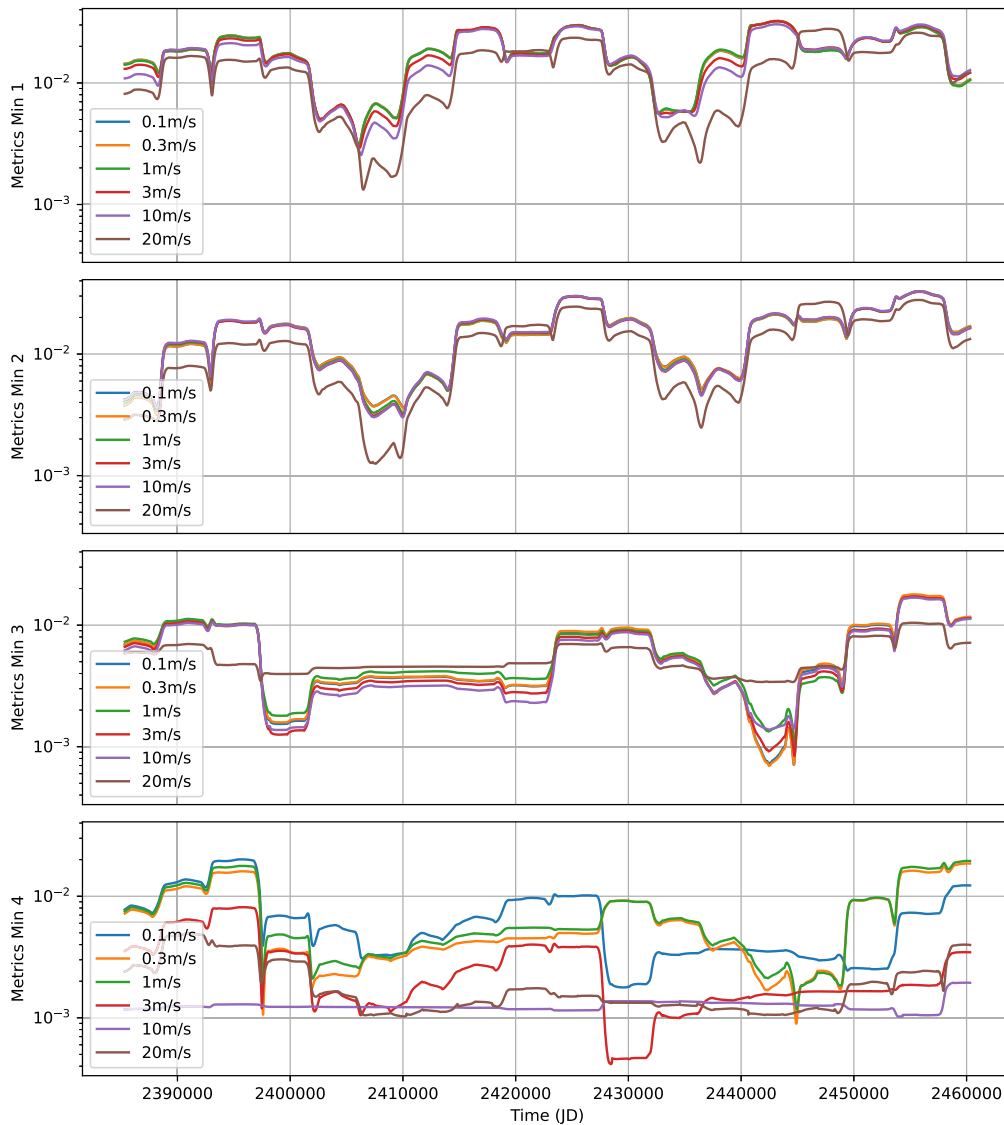


Fig. 11. Averaged metric functions calculated for the best fragments of each velocity in a time span of ~ 50 orbital periods of P/2003 T12 (SOHO) for fragmentation occurred in the studied minima.

minima are unlikely to reproduce P/2003 T12 (SOHO) actual orbit, see Figs. 7 and 8. In the case of the third minimum, some fragments at 20 m s^{-1} are found to have a low value of $\bar{D} < 0.005$ in the last 50 orbital periods. The orbital element evolution show some resemblance of P/2003 T12 (SOHO) in fragment speeds ranging from 1 to 20 m s^{-1} meaning that some fragments could approximate the comet's present orbit (the case for fragment f-678 in Table 3).

4.2. Minimum at ~ 94 A.D.

In the fourth minimum there is a noticeable matching in the orbital elements evolution (see Fig. 10) and also a noticeable stable value of D , even at a lower value $\bar{D} < 0.002$, at intermediate speeds of 10 m s^{-1} , (see Fig. 13), meaning that fragments could resemble very nicely the orbital evolution of comet P/2003 T12 (as shown in Fig. 10) like the case of fragment f-1119 (see Table 3).

We conclude that it is possible that comet 169P/NEAT had a fragmentation event ~ 2000 years ago (around 94 A.D.), that could have generated fragments which orbits evolve very similar to the actual orbit of P/2003 T12 (SOHO). We found this result consistent with Jenniskens and Vaubaillon (2010). They found a significant breakup of 169P/NEAT (2002 EX12) that would have occurred about 4500–5000 years ago as the cause of the α -Capricornid meteor shower, but they also found other plausible times for fragmentation events such as 0 A.D., which is relatively close to the time (94 A.D.) where we found the fragment orbits that best fit the actual orbit of P/2003 T12. Furthermore, they estimated a mass of about 50% of the original mass of 169P/NEAT (which would have been $\sim 9.7 \times 10^{13} \text{ kg}$) for the remaining body after the aforementioned major breakup, which would be sufficient to generate the comet P/2003 T12 in a subsequent fragmentation event of the same parent body as we propose.

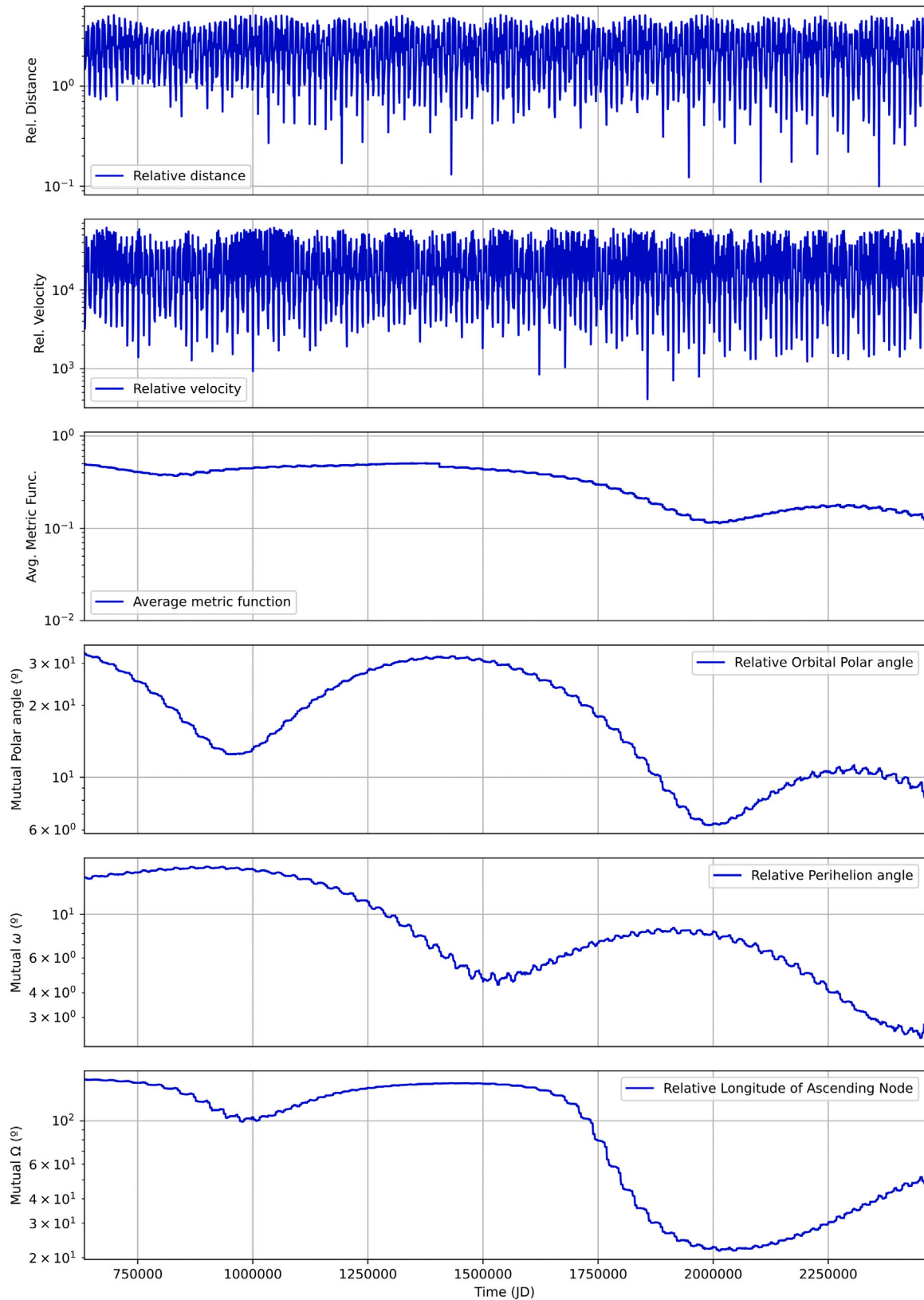


Fig. 12. 2017 MB1 and P/2003 T12 relative distance, velocity, average orbital metric function and mutual polar angle, perihelion direction and nodal distance.

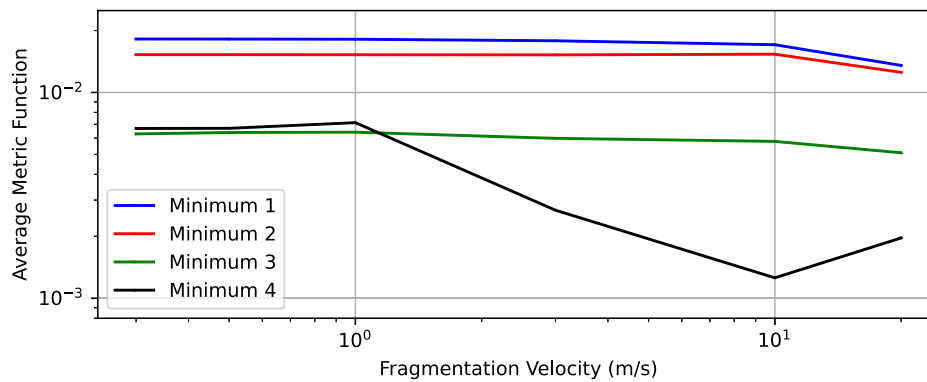


Fig. 13. Average metric functions \bar{D} for every fragmentation velocity for all minima studied, showing the lowest fragment metric distance obtained at a fragmentation speed of 10 m s^{-1} in the fourth minimum.

CRediT authorship contribution statement

Santiago Roland Alvarez: Writing – original draft, Visualization, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation.
Andrea Sosa Oyarzabal: Writing – review & editing, Validation, Supervision, Project administration, Funding acquisition, Formal analysis, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Santiago Roland reports financial support, equipment, drugs, or supplies, and travel were provided by University of the Republic Uruguay, CSIC, PEDECIBA y Science Physics Group of CURE. Santiago Roland reports a relationship with University of the Republic Uruguay - University Center of the Eastern Region - Rocha Headquarters that includes: employment.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This research was partially supported by the project I+D (2018) 327 of the Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República (UdelaR), Uruguay. We thank Julio Fernández, Gonzalo Tancredi, Tabaré Gallardo, Ricardo Gil-Hutton, Quan-Zhi Ye and Peter Jenniskens for their helpful comments on advances of this work presented at scientific meetings. We thank the anonymous referees, and especially one of them, for their valuable comments and suggestions that helped greatly improve both the content and presentation of this paper.

References

- Bottke, William F., Morbidelli, Alessandro, Jedicke, Robert, Petit, Jean-Marc, Levi-son, Harold F., Michel, Patrick, Metcalfe, Travis S., 2002. Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-earth objects. *Icarus* (ISSN: 0019-1035) 156 (2), 399–433. <http://dx.doi.org/10.1006/icar.2001.6788>, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103501967880>.
- Chambers, J.E., 1999. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 304 (4), 793–799. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x>.
- Drummond, J.D., 1981. A test of comet and meteor shower associations. *Icarus* 45 (3), 545–553. [http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(81\)90020-8](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(81)90020-8).
- Fernández, Julio A., Sosa, Andrea, 2015. Jupiter family comets in near-Earth orbits: Are some of them interlopers from the asteroid belt? *Planet. Space Sci.* (ISSN: 0032-0633) 118, 14–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2015.07.010>, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063315002287>, SI:ACM Interrelated.
- Gladman, Brett, Michel, Patrick, Froeschlé, Christiane, 2000. The near-earth object population. *Icarus* (ISSN: 0019-1035) 146 (1), 176–189. <http://dx.doi.org/10.1006/icar.2000.6391>, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103500963917>.
- Jenniskens, Peter, 2007. *Meteor showers and their parent comets*. pp. 56–62.
- Jenniskens, P., Vaubaillon, J., 2010. Minor planet 2002 EX₁₂ (=169P/NEAT) and the alpha capricornid shower. *Astron. J.* 139 (5), 1822–1830. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/139/5/1822>.
- Jewitt, David, Mutchler, Max, Weaver, Harold, Hui, Man-To, Agarwal, Jessica, shiguro, Masateru, Kleyna, Jan, Li, Jing, Meech, Karen, Micheli, Marco, Wainscoat, Richard, Weryk, Robert, 2016. Fragmentation kinematics in comet 332p/ikeya-murakami. *Astrophys. J. Lett.* 829 (1), L8. <http://dx.doi.org/10.3847/2041-8205/829/1/L8>.
- Jopek, Tadeusz J., 1993. Remarks on the meteor orbital similarity D-criterion. *Icarus* 106 (2), 603–607. <http://dx.doi.org/10.1006/icar.1993.1195>.
- Kholshchikov, K.V., Kokhirova, G.I., Babadzhanyan, P.B., Khamroev, U.H., 2016. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (ISSN: 0035-8711) 462 (2), 2275–2283. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stw1712>.
- Muinenen, K., 1996. Orbital covariance eigenproblem for asteroids and comets. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 280 (4), 1235–1238. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/280.4.1235>.
- Rožek, A., Breiter, S., Jopek, T.J., 2011. Orbital similarity functions – application to asteroid pairs. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (ISSN: 0035-8711) 412 (2), 987–994. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17967.x>.
- Samarasinha, Nalin H., 2001. A model for the breakup of comet LINEAR (C/1999 S4). *Icarus* (ISSN: 0019-1035) 154 (2), 540–544. <http://dx.doi.org/10.1006/icar.2001.6685>, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103501966850>.
- Sekanina, Zdenek, Chodas, Paul W., 2004. Fragmentation hierarchy of bright sun-grazing comets and the birth and orbital evolution of the kreutz system. I. Two-superfragment model. *Astrophys. J.* 607 (1), 620–639. <http://dx.doi.org/10.1086/383466>.
- Sekanina, Z., Chodas, P.W., Yeomans, D.K., 1998. Secondary fragmentation of comet Shoemaker-Levy 9 and the ramifications for the progenitor's breakup in July 1992. *Planet. Space Sci.* (ISSN: 0032-0633) 46 (1), 21–45. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-0633\(97\)00115-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-0633(97)00115-3), URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063397001153>.
- Sekanina, Zdenek, Jehin, Emmanuel, Boehnhardt, Hermann, Bonfils, Xavier, Schuetz, Oliver, Thomas, Daniel, 2002. Recurring outbursts and nuclear fragmentation of comet C/2001 A2 (LINEAR). *Astrophys. J.* 572 (1), 679. <http://dx.doi.org/10.1086/340284>.
- Southworth, R.B., Hawkins, G.S., 1963. *Statistics of Meteor Streams*. Smithsonian Contributions to Astrophysics.
- Trigo-Rodríguez, Josep, 2005. *Comets II*, edited by M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver. *Meteorit. Planet. Sci.* 40, 1749–1750. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1945-5100.2005.tb00142.x>.
- Wiegert, P., Clark, D., Campbell-Brown, M., Brown, P., 2017. Minor planet 2017 MB₁ and the alpha capricornids meteor shower. In: *Central Bureau Electronic Telegrams*. Vol. 4415, p. 1.

Capítulo 3

Análisis y Conclusiones

En esta sección pretendemos discutir los resultados obtenidos y cuales serían los mecanismos posibles para una fragmentación en la época en la cual se obtienen fragmentos que reproducen mejor la órbita actual del P/2003 T12 (SOHO) con una métrica de distancia orbital menor a $D \sim 10^{-3}$. Exploraremos información adicional sobre los objetos que complementan nuestras conclusiones y que nos ayuda a plantear posibles fenómenos desencadenantes de un episodio de fragmentación y descartar otros.

3.1. Probabilidad de alineamiento orbital

Las órbitas del 169P/NEAT y el P/2003 T12 (SOHO) son muy similares entre sí (como se muestra en la tabla (1.4) y se visualiza en la figura 3.1). Este hecho despierta curiosidad y nos hace preguntarnos sobre la probabilidad de que dos órbitas al azar, sean tan parecidas. Para resolver este problema es necesario conocer o suponer una distribución de tamaños de los objetos cuyas órbitas queremos comparar. Esto lo realizaron mediante simulaciones de Monte Carlo P. Wiegert, 2005 y Q.-Z. Ye, 2018 basados en la distribución de magnitudes absolutas de Bottke et al. 2002, Granvik et al. 2018, obteniendo que la probabilidad de que existan dos objetos al azar en ese rango de elementos orbitales es de 3×10^{-5} . Jenniskens y Vaubaillon, 2010 utilizan esta probabilidad para estimar la chance de alineamiento utilizando 63 como número para la población de los cometas de la familia de Júpiter cercanos a la Tierra NEJFCs y también con el número total de NEOs. Recalculamos la chance de alineamiento actualizando el número total de NEJFCs de 120 obteniendo una probabilidad

es de 1 en 277 ($\sim 0.4\%$). Si optamos por un criterio más flexible utilizando el número total de NEOs de 1060 objetos, obtenemos una chance de alineamiento de 1 en 31 ($\sim 3\%$).

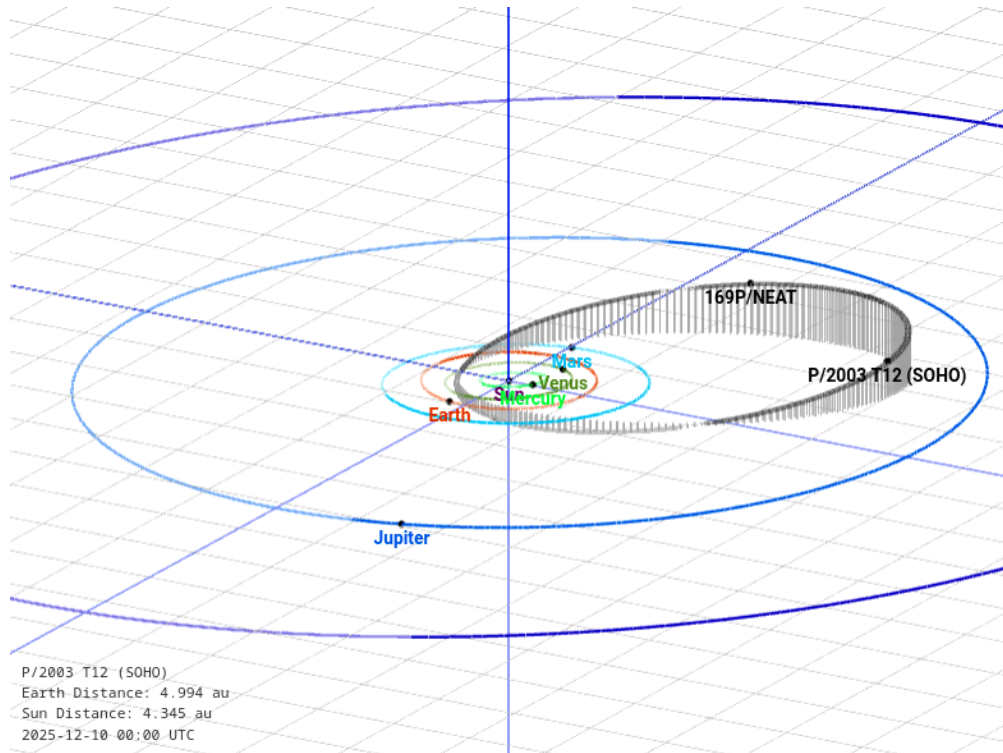


Figura 3.1: Órbitas del 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO) en el Orbit Viewer del JPL-Horizons

3.2. Evolución orbital y encuentros

La pareja de cometas evoluciona en forma estable por $\sim 10^4$ años de acuerdo con los resultados obtenidos por (Sosa y Fernández, 2015) con aproximaciones a los planetas interiores que en algunos casos llegan a distancias del orden del radio de Hill (Cavallari et al. 2023) del planeta (ver figura 4 y 5 del artículo). La ocurrencia de encuentros introduce caos y aleatoriza la evolución de los clones. Este factor es importante porque nos muestra hasta donde la integración numérica goza de cierto nivel de validez, cosa que no sería posible ver solamente con la integración de las órbitas nominales. La evolución de la nube de clones permite ver si los mismos evolucionan cerca de las órbitas nominales

cometarias o si rápidamente se dispersan. El período de interés para nosotros será aquel donde los clones muestren un comportamiento estable y cercano a los objetos nominales. En los mapas de densidad (ver figura 6 del artículo) pueden observarse el efecto de los encuentros gravitatorios de los clones con los planetas mayores incluidos en la simulación.

3.3. Épocas posibles de fragmentación

Identificamos cuatro mínimos en distancia y velocidad relativa del par de cometas en este período de tiempo donde los clones no se dispersan completamente y que identificamos como épocas favorables para un posible escenario de fragmentación. De los cuatro mínimos más recientes (en distancia y velocidad relativa 1716 A.D.) de la pareja de cometas, el cuarto, o sea el más antiguo, es en el que encontramos el fragmento con la órbita que mejor se acerca a la del actual cometa P/2003 T12 (SOHO), medido utilizando las funciones de distancia orbital expuestas anteriormente en las ecuaciones 1.10, 1.11 y 1.12. Este mínimo entra en concordancia con el mínimo absoluto encontrado por (Sosa y Fernández, 2015) unos 2900 años en el pasado.

La pareja de cometas mantiene una serie de mínimos de velocidad y distancia relativa, recurrente hacia el pasado, según nuestras integraciones numéricas, más allá de los cuarto estudiados en este trabajo (como se ve en la figura 5 del artículo) donde se ven un total de 14 mínimos. De acuerdo con Jenniskens y Vaubaillon, 2010 la época más favorable para la generación de la corriente de meteoroides de las α -Capricornidas es hace unos 5000 años, tiempo suficiente para que mediante una sola ruptura o fragmentación del 169P/NEAT pueda explicar toda la masa observada de meteoroides y la dispersión de los mismos para que lleguen a la Tierra.

Esto puede deberse a varios factores, entre ellos, el principal de todos que son los encuentros con los planetas interiores Marte, Tierra y Venus. Como se muestra en la figura (5) del artículo, el 169P/NEAT no tiene encuentros fuertes con Júpiter. Las distancias de encuentro con el planeta gigante son del orden de 0.9 - 1.0 ua. Sin embargo sí existen encuentros con los planetas interiores, hecho que es natural ya que se trata de un NEJFC que presenta oscilaciones en su inclinación y excentricidad producto del mecanismo de Lidov-Kozai (Ito, 2024) que produce encuentros con los planetas interiores en las épocas en que la inclinación es mínima y la excentricidad es máxima. Este mecanismo hace

disminuir la inclinación y aumentar la excentricidad. Al disminuir la inclinación, la órbita del cometa se vuelve más coplanar con las órbitas planetarias interiores y las distancias de encuentro aumentan hasta llegar al orden del radio de Hill del planeta.

Tabla 3.1: Tabla con las distancias o separacion orbital D_{SH} , D_D y D_H entre el P/2003 T12 (SOHO) y los mejores fragmentos para los 4 mínimos estudiados junto con el 169P/NEAT para comparación.

	D_{sh}	D_d	D_h
169P NEAT	0.016893	0.012070	0.014773
Min 1 best frag	0.013140	0.009252	0.011299
Min 2 best frag	0.011159	0.007969	0.009676
Min 3 best frag	0.008599	0.005243	0.007316
Min 4 best frag	(0.001773)	(0.000834)	(0.001245)

El valor de distancia orbital obtenido para las órbitas del par de cometas es $D \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ (como se ve en la tabla 3.1 y en la figura 11 del artículo, donde se comparan D_{SH} , D_D y D_H). Si bien este valor es más que suficiente para considerar que ambos objetos están vinculados, como se ve en la tabla (3.2), todavía no son valores de distancia que se correspondan con órbitas dentro de las incertidumbres observacionales del objeto fragmentado, en este caso, el P/2003 T12 (SOHO). Esto puede verse fácilmente generando órbitas del propio P/2003 T12 (SOHO) con la matriz de covarianza dentro de 2 o 3- σ de sus incertidumbres, y dichas órbitas distarán de la órbita central en el orden de $D \sim 10^{-5} - 10^{-6}$.

Tabla 3.2: Criterios de distancia utilizados para diferentes problemas. Southworth & Hawkins D_{SH} , Drummond D_D , Kholshchevnikov ρ_2, ρ_3, ρ_4

Pareja	Criterio	Valor	Referencia
Asteroide - lluvia	D_{SH}	<0.01	Steel et al 1991
"	D_{SH}	<0.275	Asher 1994
"	D_{SH}	< 0.2	Galligan 2001
"	D_D	<0.2	Weigert & Brown 2004
"	ρ_1, ρ_4, ρ_5	<0.145	Kokhirova et al 2018
"	D_{SH}	<0.001	Ye 2016, Ye 2018
Asteroide - asteroide	D_{SH}	<0.01	Ohtsuka et al 2007
Asteroide - cometa	ρ_1, ρ_4, ρ_5	<0.2	Kholshchevnikov et al 2016

Sin embargo estos valores de distancia orbital obtenida para los fragmentos, son una cota inferior porque de hacer una generación más densa de fragmentos

posibles, se lograría una cobertura de direcciones mayor y la posibilidad de encontrar un mejor fragmento aumentaría. La estabilidad de la distancia del mejor fragmento por los últimos 200 años es de $\pm 11\%$ del valor de D , estabilidad que no se observa en los otros fragmentos (ver figura 11 del artículo).

3.3.1. Estimaciones de algunos parámetros físicos

A partir de la distribución de tamaños de NEAs podemos estimar el diámetro de un objeto utilizando la ecuación (3.1) como una aproximación a los NEJFCs como el 169P/NEAT (Bottke et al. 2002), con un valor típico de albedo geométrico de $p = 0.04$.

$$D(km) = 4365 \times 10^{-H/5} \quad (3.1)$$

Tabla 3.3: Estimación del tamaño nuclear del 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO) a partir de diferentes modelos de magnitud absoluta

$D_{169P}(km)$	$D_{2003T12}(km)$	Referencia
1.91	0.52	Bottke et al 2002
2.93	0.81	Boe et al 2019
2.90	0.80	Pravec & Harris 2007

Tabla 3.4: Estimación de la masa utilizando una densidad de $\rho \sim 400kg/m^3$ Sosa y Fernández, 2009

169P/NEAT	5.3×10^{12} kg
P/2003 T12 (SOHO)	1.1×10^{11} kg

De aquí se desprende que la masa del 169P/NEAT es unas 50 veces mayor que la masa del P/2003 T12 (SOHO). Jenniskens y Vaubaillon, 2010 proponen que el progenitor de las α -Capricornidas es un objeto tal que luego de su fragmentación, el 48% de la masa se destinó a la producción de la corriente de meteoros y el restante 52% corresponde a la masa del 169P/NEAT. Estos cálculos están deducidos en base a la estimación de la masa de la corriente de meteoros y se muestran en la tabla 3.5.

Si bien Jenniskens y Vaubaillon, 2010 argumentan que episodios de pérdida de masa del orden del 50% son comunes, en principio no podríamos descartar fragmentaciones adicionales que generen fragmentos con masas del orden de 1/50 masas del 169P/NEAT.

Tabla 3.5: Estimaciones de masa del stream de las α -Capricornidas. Los valores obtenidos por Jenniskens y Vaubaillon, 2010 se calcularon utilizando una densidad más alta $\rho \sim 1000 \text{kg/m}^3$

Objeto	Masa estimada
169P/NEAT	9.7×10^{13} kg
corriente α -Capricornidas	8.9×10^{13} kg
Progenitor	1.9×10^{14} kg

Tabla 3.6: Tabla con densidades cometarias obtenidos de ajustes observacionales y de modelos teóricos por varios autores.

Cometa	$\rho(\text{kg/m}^3)$	Referencia
1P/Halley	500 - 700	Richardson & Rickman 1986
”	500	Sosa & Fernandez 2009
”	550 ± 250	Keller et al 2014
2P/Encke	800	Sosa & Fernandez 2009
6P/d’Arrest	150	”
9P/Tempel 1	400 ± 300	Richardson & Melosh 2006
”	450 ± 250	Richardson & Davidsson 2006
”	200	Sosa & Fernandez 2009
10P/Tempel 2	700 ± 300	”
19P/Borrelly 2	50 ± 300	”
22P/Kopff	200	”
45P/Honda–Mrkos–Pajdušáková	1200	”
46P/Wirtanen	400	”
67P/Churyumov–Gerasimenko	500	”
81P/Wild 2	380 - 600	Rickman et al. 1987
”	300	Sosa & Fernandez 2009
D/1993 F2 (S-L 9)	600	Asphaug & Benz 1996

3.3.1.1. Fragmentación por fuerzas de marea

Como vimos, el 169P/NEAT mantiene encuentros con los planetas interiores, entonces cabe preguntarse si los mismos son suficientemente cercanos a los planetas como para desencadenar una fragmentación por mareas como el caso del D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) o los cometas Sungrazers. Para dicho cálculo utilizamos la ecuación utilizada por Benner y McKinnon, 1995 para el caso de la fragmentación por fuerzas de marea con Júpiter del cometa D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9) para el cálculo del límite de Roche en la ecuación (1.15), y también calculamos el radio de Hill (mediante la ecuación 3.2 Murray y Dermott, 1999 como se muestra en la ec. 3.2) donde M es la masa del Sol, m es la masa del planeta y a_p es el semi-eje mayor del planeta, como se muestra

en la tabla (3.7).

$$R_H \sim a_p \left(\frac{m}{3M} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$

Tabla 3.7: Tabla comparativa de las distancias de encuentro d_e del cometa 169P/NEAT con los planetas interiores y Júpiter en el período estudiado de 10000 años, expresadas en términos del Límite de Roche R_{Ro} y el Radio de Hill R_{Hi} para cada planeta, tomando una densidad para el cometa de $\rho_c=400 \text{ kg/m}^3$

Planeta	R_P (km)	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	R_{Hi} (au)	R_{Ro} (au)	d_e (au)	$d_e(R_{Hi})$	$d_e(R_{Ro})$
Venus	6052	5240	0.0068	$2.3e^{-4}$	0.0182	~ 2.7	~ 78
Tierra	6378	5510	0.0100	$2.5e^{-4}$	0.0180	~ 1.8	~ 72
Marte	3389	3930	0.0073	$1.2e^{-4}$	0.0092	~ 1.3	~ 78
Júpiter	69911	1330	0.3553	$1.7e^{-3}$	0.8695	~ 2.4	~ 512

En todos los casos el 169P/NEAT tiene una distancia de encuentro mínima que es del orden de $10^2 R_{Ro}$ como puede verse en la tabla (3.7), lo cual hace muy difícil pensar en un escenario de fragmentación por fuerzas de marea.

3.3.1.2. Fragmentación por inestabilidad rotacional

La inestabilidad rotacional resulta poco probable dado el valor de período de rotación levemente superior a 8hs (como se ve en la tabla 3.8) el cual estaría ubicado en la zona de estabilidad rotacional según la figura (3.2). Si bien no tenemos un valor certero de la tensión centrífuga, podemos estimar valores estimar un valor de unos 8 Pa utilizando una densidad típica de $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$, un radio de $r \sim 1 \text{ km}$ y un período de $P = 8.4 \text{ h}$ de acuerdo a la ecuación 1.16. La única posibilidad para que este mecanismo pudiera volver inestable el núcleo, sería que la densidad del mismo fuera muy alta, alcanzando valores $> 1000 \text{ kg/m}^3$ demasiado alto para un NEJFC de las características evolutivas del 169P/NEAT que le permitan superar resistencias internas del orden de los 50-100 Pa.

Tabla 3.8: Tamaños y períodos publicados para el 169P/NEAT

D(km)	P(h)	Referencia
4.54	8.4	Kasuga 2010
5.7	-	Jenniskens & Vaubaillon 2010
-	8.37	Holst 2024

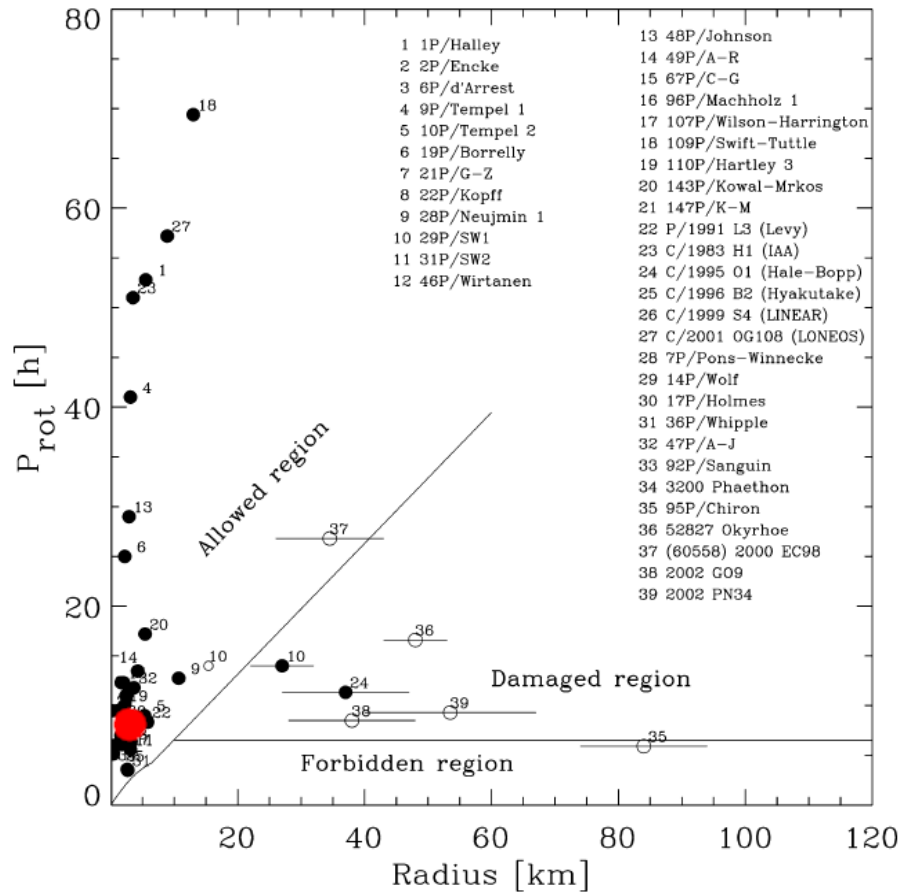


Figura 3.2: Gráfico de Período vs. Radio y demarcación de zonas seguras e inestables para el estado rotacional de los núcleos cometarios. El punto rojo indica el cometa 169P/NEAT asumiendo núcleo esférico de radio ~ 2.3 km y un período rotacional de ~ 8 hs como se desprende de la tabla (3.8). Extraído y adaptado de Toth & Lisse 2006

3.3.1.3. Fragmentación por impacto

Asumiendo una tasa de impactos de 1 impacto cada 20 a 10 revoluciones para impactores del tamaño de 1 m (Di Sisto et al. 2009), para el caso del 169P/NEAT cuyo período orbital es 4.2 años, obtendríamos un impacto cada 80 a 400 años con un asteroide del MBA de al menos 0.5 m a una velocidad dada por la figura (3.3) del orden de ~ 10 m/s. Parece razonable tomar esta probabilidad de impacto para el cometa 169P/NEAT a la luz de los datos de la tabla (3.9) donde se muestra la probabilidad para otros NEJFCs. Esto equivale a unos pocos impactos en el intervalo de tiempo estudiado lo cual

hace plausible una fragmentación por esta causa (Beech y Gauer, 2002).

Tabla 3.9: Probabilidad de impacto de un asteroide de 0.5m con otros NEJFC con similares características orbitales que el 169P/NEAT. Extraído de Beech y Gauer, 2002

Cometa	a(au)	e	i	q	Tipo	P(0.5m)
103P/Hartley 2	3.4	0.69	13.6	1.06	NEJFC	0.052
107P/Wilson-Harrington	2.6	0.63	2.7	0.96	NEJFC	0.032
169P/NEAT	2.6	0.77	11.3	0.61	NEJFC	-

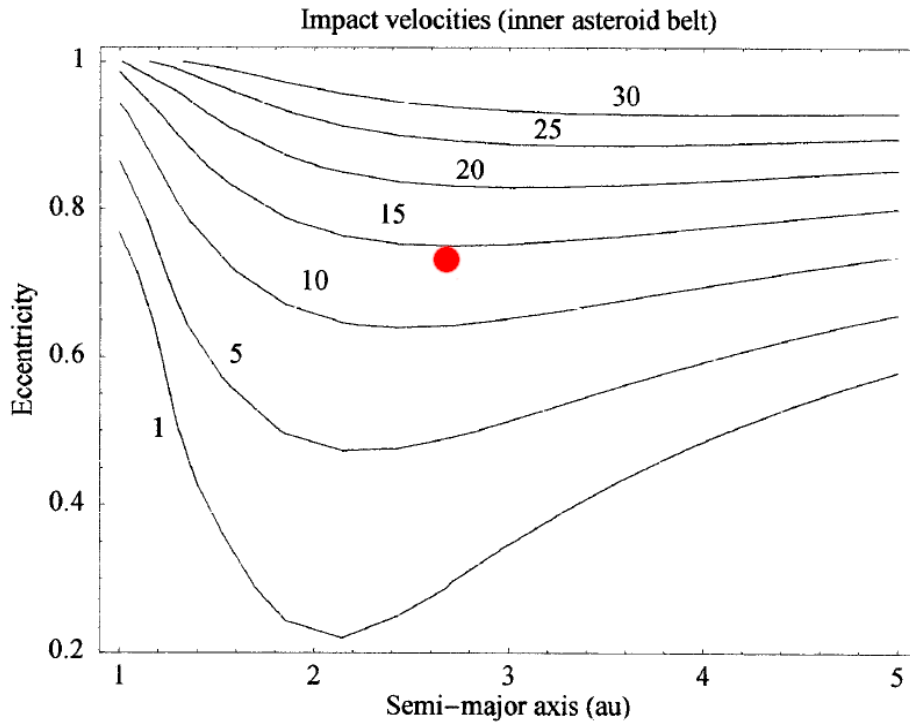


Figura 3.3: Diagrama de contornos de velocidades de impacto en km/s de un cometa con una a, e dadas y con $i=0^0$, con un asteroide típico en órbita circular con un semi-eje mayor $a=2.06$ correspondiente al borde interior del MBA. El punto rojo es el correspondiente a un cometa similar al 169P/NEAT con $i=0^0$. Extraído y adaptado de Beech y Gauer, 2002

3.3.1.4. Fragmentación por causas internas

El 169P/NEAT es un cometa con baja actividad y una fracción de área de actividad $f < 10^{-4}$ por lo que se trataría de un cometa con un manto o

costra refractaria ya evolucionada con un índice de color V-R ~ 0.43 similar al observado en cometas difuntos (Kasuga et al. 2010). En este escenario de cometa difunto, es razonable pensar que la superficie del 169P/NEAT estará bajo estrés térmico y que las tensiones superficiales pudieran sobrepasar la resistencia interna o *tensile strenght* del material del núcleo cometario, tal como se observa en el NEJFC 67P/Churyumov-Gerasimenko (ver tabla 3.10) ya que sus órbitas son similares. En este cometa casi la totalidad de la superficie está sometida a tensiones producto del estrés térmico que superarían la resistencia interna del material (ver figura 3.4) y explicarían la superficie fracturada del mismo observada por la misión Rosetta (Attree, N. et al. 2018)

Tabla 3.10: Comparación de las órbitas del 67P/Churyumov-Gerasimenko y el 169P/NEAT.

Cometa	a(au)	e	i	q	Tipo
169P/NEAT	2.6	0.77	11.3	0.61	NEJFC
67P/Churyumov-Gerasimenko	3.5	0.64	7.0	1.24	NEJFC

3.4. Consideraciones finales

Hui, 2013 publica datos observacionales del P/2003 T12 (SOHO) obtenidos por Stereo-B a grandes ángulos de fase (~ 175) con dos instrumentos diferentes COR-2 y HI-1 un coronógrafo anular que observa entre 2.5 y $15R_{Sol}$ y una cámara heliosférica que monitorea una zona cercana a la eclíptica. En esas observaciones determinan luego de un exhaustivo procesamiento, que el color del cometa es V-R ~ -1.1 y argumentan que el color azulado de la coma puede deberse a líneas de emisión significativas en la banda observada y al hecho de que el instrumento HI-1 tiene una sensibilidad adicional hacia el azul, donde podrían encontrarse líneas del CN, entre otros. Es por esto que no podemos asegurar que el índice de color, como un indicativo del espectro, sea diferente al 169P/NEAT. Sería deseable contar con observaciones del P/2003 T12 (SOHO) en momentos de su órbita donde no presente tanta actividad, para poder comparar los colores más fehacientemente y tener un indicio de parentesco genético entre ellos que dé soporte a la teoría de un progenitor común.

Matlovič, Pavol et al. 2019 observan diferencias espectrales en los meteoros provenientes de la lluvia α -Capricornidas, lo que sugiere que la corriente de

meteoros no es homogénea.

Wiegert et al. 2017 señalan que el objeto 2017 MB1 también tiene similitudes orbitales con el 169P/NEAT, hecho que se discute en nuestra publicación. En principio nosotros podríamos descartar una relación genética entre el P/2003 T12 (SOHO) y el 2017 MB1 ya que no encontramos mínimos en distancia y velocidad relativa que sean épocas favorables para una posible fragmentación. Sin embargo Q.-Z. Ye, 2018 advierte que 2017 MB1 es aún un mejor candidato para relacionar con las α -Capricornidas dado que su chance de alineamiento con la órbita de la corriente de meteoros como producto del azar, es 1 en 250, similar a la chance de alineamiento entre el 169P/NEAT y el P/2003 T12 (SOHO). Finalmente especula que el 169P/NEAT, el 2017 MB1 y la corriente de meteoros puedan estar emparentados genéticamente entre sí por medio de un pregunitor común.

Esto sin dudas abre un abanico de posibilidades que requieren un estudio más profundo. Entre los posibles caminos a seguir y profundizar podemos proponer los siguientes:

- Mejorar la determinación de los instantes mínimos de velocidad y distancia relativa. Actualmente los mínimos utilizados son los mínimos en velocidad relativa de las órbitas nominales del par de cometas. Se podría hacer una determinación más fina, utilizando la información de los clones visible en los gráficos de densidad, para determinar un mínimo que sea representativo del comportamiento general de los clones. Esta determinación no es trivial, pero haría que los instantes de fragmentación sean más robustos y plausibles.
- Plantear un modelo con más parámetros: El modelo utilizado no incorpora un parámetro de frenado por desgaseamiento, similar al parámetro Γ del modelo de Sekanina u otros parámetros asociados con la caracterización de fuerzas no gravitacionales que puedan tener un efecto relevante en el corto plazo en las integraciones numéricas de las órbitas de los fragmentos.
- Mejorar la generación de fragmentos: Las velocidades relativas de los fragmentos generados en el instante de la fragmentación de tipo *one step - two body fragmentation*, son escalonadas y de distribución angular y módulo de velocidad uniforme. Utilizar una distribución de velocidades podría aportar nueva información y le daría robustez al cálculo de las

órbitas resultantes de los fragmentos además de optimizar los recursos computacionales.

- Plantear fragmentaciones en cascada: Nuestro modelo está limitado a una fragmentación de un único fragmento, pero podría ocurrir una fragmentación en cascada en la que se generaran más de un fragmento, posiblemente cuerpos intermedios relacionados con la corriente meteórica de las α -Capricornidas, quizá en el escenario de una fragmentación primaria anterior en la que se generara dicha corriente y activara inestabilidades térmicas en el núcleo que luego ocasionara una fragmentación por estrés térmico o por presión interna de gas.

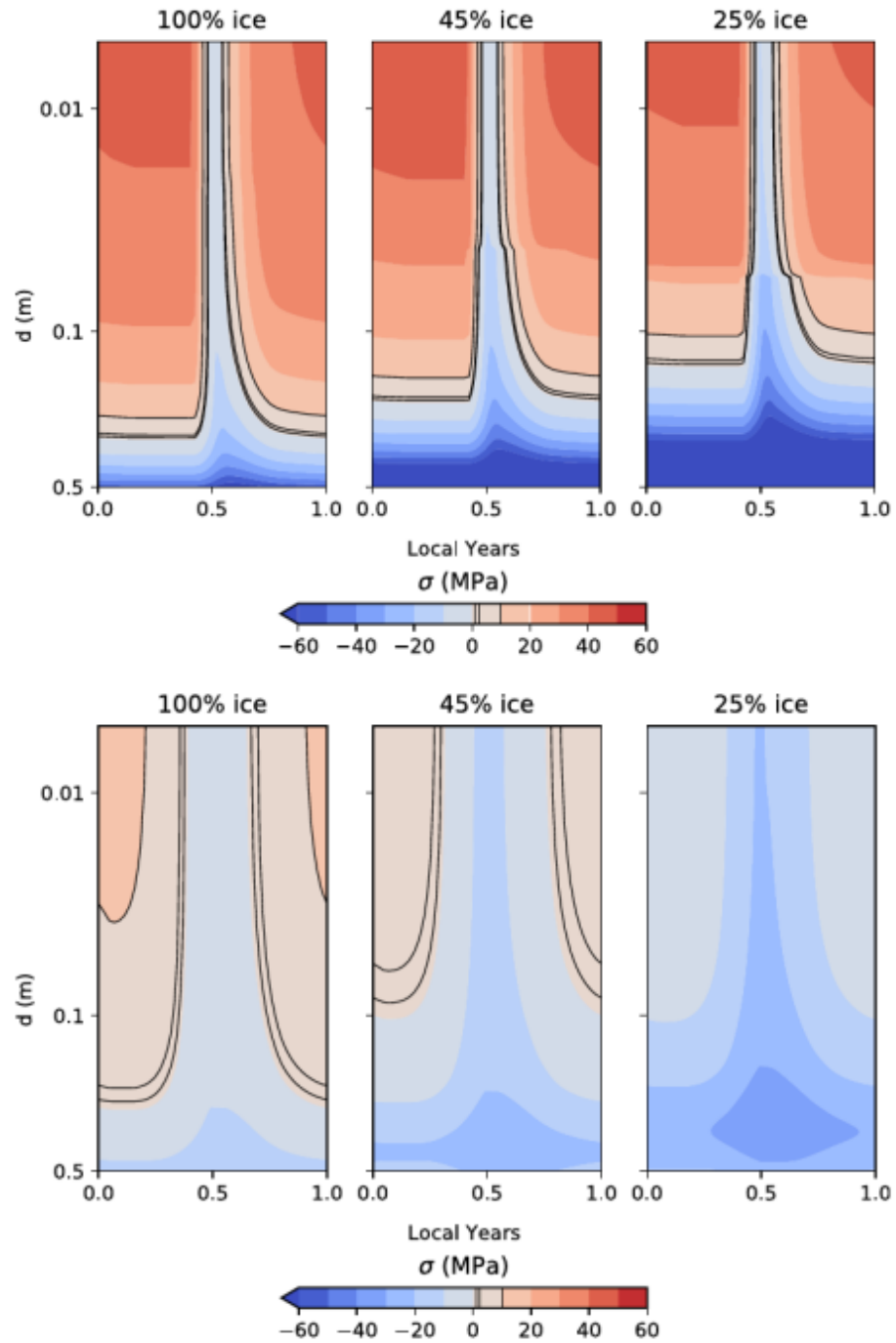


Figura 3.4: Magnitud de la tensión producto del estrés térmico modelado para diferentes proporciones composicionales en la superficie del cometa 67/Churyumov-Gerasimenko para latitudes de 60° (arriba) y ecuatoriales (abajo). 0 y 1 corresponden al afelio y 0.5 al perihelio. Extraído de Attree, N. et al. 2018

Referencias Bibliográficas

- Aggarwal, H. R., y Oberbeck, V. R. (1974). Roche Limit of a Solid Body. *ApJ*, *191*, 577-588. <https://doi.org/10.1086/152998>
- Armitage, P. J. (2025). Planet formation theory: an overview. <https://arxiv.org/abs/2412.11064>
- Attree, N., Groussin, O., Jorda, L., Rodionov, S., Auger, A.-T., Thomas, N., Brouet, Y., Poch, O., Kührt, E., Knapmeyer, M., Preusker, F., Scholten, F., Knollenberg, J., Hviid, S. y Hartogh, P. (2018). Thermal fracturing on comets - Applications to 67P/Churyumov-Gerasimenko. *A&A*, *610*, A76. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731937>
- Barnard, E. E. (1910). The Story of the Comets by George F. Chambers. *ApJ*, *31*, 92. <https://doi.org/10.1086/141730>
- Beech, M., y Gauer, K. (2002). Cosmic Roulette: Comets In The Main Belt Asteroid Region. *Earth Moon and Planets*, *88*(4), 211-221. <https://doi.org/10.1023/A:1019813115494>
- Benner, L. A., y McKinnon, W. B. (1995). On the Orbital Evolution and Origin of Comet Shoemaker-Levy 9. *Icarus*, *118*(1), 155-168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.1995.1182>
- Bevington, P. R., y Robinson, D. K. (2003). *Data reduction and error analysis for the physical sciences; 3rd ed.* McGraw-Hill. <https://cds.cern.ch/record/1305448>
- Boehnhardt, H. (2004). Split comets. En M. C. Festou, H. U. Keller y H. A. Weaver (Eds.), *Comets II* (p. 301).
- Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.-M., Levison, H. F., Michel, P., y Metcalfe, T. S. (2002). Debaised Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus*, *156*(2), 399-433. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.2001.6788>
- Bottke, W. F., y Norman, M. D. (2017). The Late Heavy Bombardment. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *45*(Volume 45, 2017),

619-647. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020131>

- Canup, R. M., Righter, K., Dauphas, N., Pahlevan, K., Čuk, M., Lock, S. J., Stewart, S. T., Salmon, J., Rufu, R., Nakajima, M., y Magna, T. (2021). Origin of the Moon. <https://arxiv.org/abs/2103.02045>
- Cavallari, I., Grassi, C., Gronchi, G. F., Baù, G., y Valsecchi, G. B. (2023). A dynamical definition of the sphere of influence of the Earth. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 119. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2023.107091>
- Chambers, J. E. (1999). A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *MNRAS*, 304(4), 793-799. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x>
- Comets*. (1982). University of Arizona Press. Consultado el 14 de agosto de 2025, desde <http://www.jstor.org/stable/j.ctv1v7zds6>
- Davis, D. R., Chapman, C. R., Weidenschilling, S. J., y Greenberg, R. (1985). Collisional history of asteroids: Evidence from Vesta and the Hirayama families. *Icarus*, 62(1), 30-53. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0019-1035\(85\)90170-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0019-1035(85)90170-8)
- de Pater, I., y Lissauer, J. J. (2015). *Planetary Sciences* (2.^a ed.). Cambridge University Press.
- Di Sisto, R. P., Fernández, J. A., y Brunini, A. (2009). On the population, physical decay and orbital distribution of Jupiter family comets: Numerical simulations. *Icarus*, 203(1), 140-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.05.002>
- Drummond, J. D. (1981). A test of comet and meteor shower associations. *Icarus*, 45(3), 545-553. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(81\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(81)90020-8)
- Duncan, M., Quinn, T., y Tremaine, S. (1988). The Origin of Short-Period Comets. *ApJ*, 328, L69. <https://doi.org/10.1086/185162>
- Durda, D. D., y Dermott, S. F. (1997). The Collisional Evolution of the Asteroid Belt and Its Contribution to the Zodiacal Cloud. *Icarus*, 130(1), 140-164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.1997.5803>
- Fernández, J. A. (1980). On the existence of a comet belt beyond Neptune. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 192(3), 481-491.
- Fernández, J. A., Gallardo, T., y Brunini, A. (2002). Are There Many Inactive Jupiter-Family Comets among the Near-Earth Asteroid Population?

Icarus, 159(2), 358-368. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.2002.6903>

- Fernández, J. A., Sosa, A., Gallardo, T., y Gutiérrez, J. N. (2014). Assessing the physical nature of near-Earth asteroids through their dynamical histories. *Icarus*, 238, 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.04.048>
- Fernández, J. A. (2005). *Comets - Nature, Dynamics, Origin and their Cosmological Relevance* (Vol. 328). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3495-4>
- Froeschle, C., y Rickman, H. (1986). Model calculations of nongravitational forces on short-period comets. I - Low-obliquity case. II - High-obliquity case. *A&A*, 170(1), 145-166.
- Ginsburg, A., Sipőcz, B. M., Brasseur, C. E., Cowperthwaite, P. S., Craig, M. W., Deil, C., Guillochon, J., Guzman, G., Liedtke, S., Lian Lim, P., Lockhart, K. E., Mommert, M., Morris, B. M., Norman, H., Parikh, M., Persson, M. V., Robitaille, T. P., Segovia, J.-C., Singer, L. P., ... a subset of the astropy collaboration. (2019). astroquery: An Astronomical Web-querying Package in Python. *AJ*, 157, Artículo 98, 98. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aafc33>
- Granvik, M., Morbidelli, A., Jedicke, R., Bolin, B., Bottke, W. F., Beshore, E., Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., y Michel, P. (2018). Debaised orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects. *Icarus*, 312, 181-207. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.04.018>
- Greenberg, J. M., Mizutani, H., y Yamamoto, T. (1995). A new derivation of the tensile strength of cometary nuclei: application to comet Shoemaker-Levy 9. *A&A*, 295, L35-L38.
- Guilbert-Lepoutre, A., Davidsson, B. J. R., Scheeres, D. J., Ciarletti, V., y Dotson, R. (2024). Comet Nucleus Interiors. En *Comets III* (pp. 249-288). University of Arizona Press. Consultado el 28 de octubre de 2025, desde <http://www.jstor.org/stable/jj.21819446.15>
- Hirayama, K. (1918). Groups of asteroids probably of common origin. *AJ*, 31, 185-188. <https://doi.org/10.1086/104299>
- Holt, T. R., Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., Brož, M., y Horner, J. (2020). A pair of Jovian Trojans at the L4 Lagrange point. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499(3). <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3064>

- Hui, M. -. (2013). Observations of Comet P/2003 T12 = 2012 A3 (SOHO) at large phase angle in STEREO-B. *MNRAS*, *436*(2), 1564-1575. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1683>
- Ito, T. (2024). On the location of the monograph "The Lidov-Kozai oscillation and Hugo von Zeipel". <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.19620609>
- Jenniskens, P. (1994). Meteor stream activity I. The annual streams. *A&A*, *287*, 990-1013.
- Jenniskens, P., y Vaubaillon, J. (2007). 3D/Biela and the Andromedids: Fragmenting versus Sublimating Comets. *AJ*, *134*(3), 1037-1045. <https://doi.org/10.1086/519074>
- Jenniskens, P., y Vaubaillon, J. (2010). Minor Planet 2002 EX₁₂ (=169P/NEAT) and the Alpha Capricornid Shower. *Astronomical Journal*, *139*(5), 1822-1830. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/5/1822>
- Jenniskens, P. (2007). *Meteor showers and their parent comets* (F. Bettonvil y J. Kac, Eds.).
- Jewitt, D., Mutchler, M., Weaver, H., Hui, M.-T., Agarwal, J., Ishiguro, M., Kleyna, J., Li, J., Meech, K., Micheli, M., Wainscoat, R., y Weryk, R. (2016). Fragmentation Kinematics in Comet 332P/Ikeya-Murakami. *ApJ*, *829*(1), Artículo L8, L8. <https://doi.org/10.3847/2041-8205/829/1/L8>
- Jewitt, D., Weaver, H., Agarwal, J., Mutchler, M., y Drahus, M. (2010). A recent disruption of the main-belt asteroid P/2010 A2. *Nature*, *467*(7317), 817-819. <https://doi.org/10.1038/nature09456>
- Jopek, T. J. (1993). Remarks on the Meteor Orbital Similarity D-Criterion. *Icarus*, *106*(2), 603-607. <https://doi.org/10.1006/icar.1993.1195>
- Kasuga, T., Balam, D. D., y Wiegert, P. A. (2010). COMET 169P/NEAT(=2002EX12): THE PARENT BODY OF THE α -CAPRICORNID METEOROID STREAM. *The Astronomical Journal*, *140*(6), 1806. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/140/6/1806>
- Kholshevnikov, K. V., Kokhirova, G. I., Babadzhanov, P. B., y Khamroev, U. H. (2016). Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *462*(2), 2275-2283. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1712>

- Kreutz, H. C. F. (1888). *Untersuchungen uber das comentesystem 1843 I, 1880 I und 1882 II*.
- Kührt, E., y Keller, H. (1994). The Formation of Cometary Surface Crusts. *Icarus*, 109(1), 121-132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.1994.1080>
- Kuiper, G. P. (1951). On the Origin of the Solar System. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 37(1), 1-14. <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=6f74c3b8-dc54-338b-a6af-5c0318ef05f2>
- Levison, H. F. (1996). Comet Taxonomy. En T. Rettig y J. M. Hahn (Eds.), *Completing the Inventory of the Solar System* (pp. 173-191, Vol. 107).
- Levison, H. F., y Duncan, M. J. (1994). The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets. *Icarus*, 108(1), 18-36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.1994.1039>
- Levison, H. F., y Duncan, M. J. (1997). From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets. *Icarus*, 127(1), 13-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.1996.5637>
- Levison, H. F., Terrell, D., Wiegert, P. A., Dones, L., y Duncan, M. J. (2006). On the origin of the unusual orbit of Comet 2P/Encke. *Icarus*, 182(1), 161-168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.12.016>
- Levy, D. H. (1998). The Collision of Comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter. *Space Sci. Rev.*, 85, 523-545.
- Marov, M. (2018). The Formation and Evolution of the Solar System. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.2>
- Marsden, B. G. (1967). The sungrazing comet group. *AJ*, 72, 1170. <https://doi.org/10.1086/110396>
- Marsden, B. G. (1968). Comets and Nongravitational Forces. *AJ*, 73, 367. <https://doi.org/10.1086/110640>
- Marsden, B. G., y Sekanina, Z. (1974). Comets and nongravitational forces. VI. Periodic comet Encke 1786-1971 . *Astronomical Journal*, 79, 413. <https://doi.org/10.1086/111560>
- Matlovič, Pavol, Tóth, Juraj, Rudawska, Regina, Kornoš, Leonard y Pisarcíková, Adriana. (2019). Spectral and orbital survey of medium-sized meteoroids. *A&A*, 629, A71. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936093>

- McFarland, J. (1996). Kenneth Essex Edgeworth—Victorian polymath and founder of the Kuiper belt? *Vistas in Astronomy*, *40*(2), 343-354. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0083-6656\(96\)00014-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0083-6656(96)00014-1)
- Milani, A., y Knežević, Z. (1994). Asteroid Proper Elements and the Dynamical Structure of the Asteroid Main Belt. *Icarus*, *107*(2), 219-254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.1994.1020>
- Milani, A., y Knežević, Z. (1990). Secular perturbation theory and computation of asteroid proper elements. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, *49*(4), 347-411. <https://doi.org/10.1007/BF00049444>
- Morbidelli, A. (2005). *Origin and Dynamical Evolution of Comets and their Reservoirs*. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0512256>
- Muononen, K. (1996). Orbital covariance eigenproblem for asteroids and comets. *MNRAS*, *280*(4), 1235-1238. <https://doi.org/10.1093/mnras/280.4.1235>
- Murray, C. D., y Dermott, S. F. (1999). *Solar System Dynamics*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174817>
- NASA. (2020). *4000th Comet Discovered by ESA/NASA Solar Observatory*. NASA. Consultado el 15 de octubre de 2023, desde <https://www.nasa.gov/solar-system/4000th-comet-discovered-by-esa-nasa-solar-observatory/>
- Nesvorný, D., Jenniskens, P., Levison, H. F., Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., y Gounelle, M. (2010). COMETARY ORIGIN OF THE ZODIACAL CLOUD AND CARBONACEOUS MICROMETEORITES. IMPLICATIONS FOR HOT DEBRIS DISKS. *The Astrophysical Journal*, *713*(2), 816. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/713/2/816>
- 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.
- Öpik, E. J. (1968). The Cometary Origin of Meteorites. *Irish Astronomical Journal*, *8*, 185.
- Prialnik, D., y Bar-Nun, A. (1992). Crystallization of amorphous ice as the cause of Comet P/Halley's outburst at 14 AU. *A&A*, *258*(2), L9-L12.
- Rigley, J. K., y Wyatt, M. C. (2021). Comet fragmentation as a source of the zodiacal cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *510*(1), 834-857. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3482>

- Safronov, V. S. (1972). *Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the earth and planets*.
- Samarasinha, N. H. (2001). A Model for the Breakup of Comet LINEAR (C/1999 S4). *Icarus*, 154(2), 540-544. <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6685>
- Seargent, D. A. J. (2009). *The Greatest Comets in History*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09513-4>
- Sekanina, Z., Chodas, P., y Yeomans, D. (1998). Secondary fragmentation of comet Shoemaker-Levy 9 and the ramifications for the progenitor's breakup in July 1992. *Planetary and Space Science*, 46(1), 21-45. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(97\)00115-3](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(97)00115-3)
- Sekanina, Z. (2025). Bright Sungrazing Comets in a Great Historical Controversy and Prospects for Their Appearance in the Near Future. <https://arxiv.org/abs/2503.15467>
- Sekanina, Z., y Chodas, P. W. (2004). Fragmentation Hierarchy of Bright Sungrazing Comets and the Birth and Orbital Evolution of the Kreutz System. I. Two-Superfragment Model. *Astrophysical Journal*, 607(1), 620-639. <https://doi.org/10.1086/383466>
- Sekanina, Z., Jehin, E., Boehnhardt, H., Bonfils, X., Schuetz, O., y Thomas, D. (2002). Recurring Outbursts and Nuclear Fragmentation of Comet C/2001 A2 (LINEAR). *The Astrophysical Journal*, 572(1), 679. <https://doi.org/10.1086/340284>
- Shestakova, L. I., y Tambovtseva, L. V. (1997). The Thermal Destruction of Solids Near the Sun. *Earth, Moon, and Planets*, 76(1), 19-45. <https://doi.org/10.1023/A:1005925214405>
- Snodgrass, C., Feaga, L., Jones, G. H., Küppers, M., Tubiana, C., y Dotson, R. (2024). Past and Future Comet Missions. En *Comets III* (pp. 155-192). University of Arizona Press. Consultado el 28 de octubre de 2025, desde <http://www.jstor.org/stable/jj.21819446.12>
- Sosa, A., y Fernández, J. A. (2009). Cometary masses derived from non-gravitational forces. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 393(1), 192-214. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14183.x>
- Sosa, A., y Fernández, J. A. (2016). Dynamical evolution of comet pairs. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #48*, 48, Artículo 301.02, 301.02.

- Sosa, A., y Fernández, J. A. (2015). Comets 169P/NEAT and P/2003 T12 (SOHO): Two possible fragments of a common ancestor? *IAU General Assembly, 29*, Artículo 2255583, 2255583.
- Southworth, G. S., R. B.; Hawkins. (1963). *Statistics of meteor streams*. Smithsonian Contributions to Astrophysics.
- Tancredi, G., Fernández, J. A., Rickman, H., y Licandro, J. (2006). Nuclear magnitudes and the size distribution of Jupiter family comets [Results from the Mars Express ASPERA-3 Investigation]. *Icarus*, 182(2), 527-549. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.01.007>
- Tauber, F., y Kührt, E. (1987). Thermal stresses in cometary nuclei. *Icarus*, 69(1), 83-90. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0019-1035\(87\)90008-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0019-1035(87)90008-X)
- Tiscareno, M. S., y Hedman, M. M. (2014). Chapter 41 - Planetary Rings. En T. Spohn, D. Breuer y T. V. Johnson (Eds.), *Encyclopedia of the Solar System (Third Edition)* (Third Edition, pp. 883-905). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415845-0.00041-4>
- Toth, I. (2000). Impact-generated activity period of the asteroid 7968 Elst-Pizarro in 1996: Identification of the asteroid 427 Galene as the most probable parent body of the impactors. *A&A*, 360, 375-380.
- Toth, I. (2001). Impact-triggered breakup of comet C/1999 S4 (LINEAR): Identification of the closest intersecting orbits of other small bodies with its orbit. *A&A*, 368, L25-L28. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010182>
- Toth, I., y Lisse, C. (2006). On the rotational breakup of cometary nuclei and centaurs. *Icarus*, 181(1), 162-177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.10.012>
- Vokrouhlický, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., Scheeres, D. J., y Statler, T. S. (2015). The Yarkovsky and YORP Effects. En P. Michel, F. E. DeMeo y W. F. Bottke (Eds.), *Asteroids IV* (pp. 509-531). https://doi.org/10.2458/azu_uapress.9780816532131-ch027
- Wall, J. V., y Jenkins, C. R. (2012). *Practical Statistics for Astronomers* (2.^a ed.). Cambridge University Press.
- Wargnier, A., Poggiali, G., Yumoto, K., Fornasier, S., Mahlke, M., Gautier, T., y Doressoundiram, A. (2025). Insights into the origins of Phobos and Deimos based on a spectral comparison with small bodies and Martian

- materials. *A&A*, *694*, Artículo A304, A304. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202453080>
- Weaver, H. A., Sekanina, Z., Toth, I., Delahodde, C. E., Hainaut, O. R., Lamy, P. L., Bauer, J. M., A'Hearn, M. F., Arpigny, C., Combi, M. R., Davies, J. K., Feldman, P. D., Festou, M. C., Hook, R., Jorda, L., Kee-sey, M. S. W., Lisse, C. M., Marsden, B. G., Meech, K. J., ... West, R. (2001). HST and VLT Investigations of the Fragments of Comet C/1999 S4 (LINEAR). *Science*, *292*(5520), 1329-1333. Consultado el 13 de agosto de 2025, desde <http://www.jstor.org/stable/3083760>
- Weidenschilling, S. J., y Binzel, R. P. (2004). From Icy Grains to Comets. En *Comets II* (pp. 97-104). University of Arizona Press. Consultado el 28 de octubre de 2025, desde <http://www.jstor.org/stable/j.ctv1v7zdzq5.13>
- Weissman, P. R. (1986). Are cometary nuclei primordial rubble piles? *Nature*, *320*(6059), 242-244. <https://doi.org/10.1038/320242a0>
- Weissman, P. R., McFadden, L.-A., y Johnson, T. V. (1999). *Encyclopedia of the solar system*.
- Wiegert, P., Clark, D., Campbell-Brown, M., y Brown, P. (2017). Minor Planet 2017 MB₁ and the Alpha Capricornids Meteor Shower. *Central Bureau Electronic Telegrams*, *4415*, 1.
- Wiegert, P., P. and Brown. (2005). The problem of linking minor meteor showers to their parent bodies: Initial considerations. *Earth, Moon and Planets*, *95*(1-4), 19-25. <https://doi.org/10.1007/s11038-005-4342-8>
- Woolfson, M. M. (2000). *The Origin and Evolution of the Solar System* (1st). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367806347>
- Ye, Q.-Z. (2018). Meteor showers from active asteroids and dormant comets in near-Earth space: A review. *Planetary and Space Science*, *164*, 7-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.04.018>
- Ye, Q., Jenniskens, P., y Dotson, R. (2024). Comets and Meteor Showers. En *Comets III* (pp. 799-822). University of Arizona Press. Consultado el 28 de octubre de 2025, desde <http://www.jstor.org/stable/jj.21819446.30>
- Yeomans, D. K., Chodas, P. W., Sitarski, G., Szutowicz, S., y Krolikowska, M. (2004). Cometary orbit determination and nongravitational forces. En M. C. Festou, H. U. Keller y H. A. Weaver (Eds.), *Comets II* (p. 137). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004come.book..137Y>

Zappala, V., Farinella, P., y Paolicchi, P. (1983). Collisional evolution of asteroids. En C. -. Lagerkvist y H. Rickman (Eds.), *Asteroids, Comets, and Meteors* (pp. 3-10).

Glosario

Acreción Proceso fundamental de formación planetaria mediante el cual partículas de polvo y planetesimales colisionan y se unen gravitacionalmente para formar cuerpos más grandes en el disco protoplanetario. [1](#)

Afelio Posición en la órbita de un cuerpo celeste en el que la distancia al Sol es máxima. [7](#)

Asteroide Cuerpo rocoso o metálico del Sistema Solar, de tamaño inferior al de un planeta pero mayor al de un meteoroide, que orbita alrededor del Sol. La mayoría se encuentra en el cinturón principal entre Marte y Júpiter. [5](#)

Astrométrico Astrometría, rama de la astronomía que se ocupa de la medición precisa de las posiciones y movimientos de los cuerpos celestes. Los estudios astrométricos son fundamentales para determinar órbitas exactas. [3](#)

Centauro Cuerpo menor que orbita entre Júpiter y Neptuno, considerado un estado transicional entre los objetos del Cinturón de Kuiper y los cometas de la Familia de Júpiter. Presentan actividad cometaria ocasional y órbitas inestables. [12](#)

Clon En el contexto de integraciones numéricas orbitales, conjunto de órbitas ligeramente diferentes generadas a partir de la misma órbita nominal pero con variaciones dentro del rango de incertidumbre. Los clones permiten estudiar la evolución dinámica de familias de órbitas y evaluar la estabilidad orbital considerando las incertidumbres en los parámetros iniciales. [18](#)

Cometa Cuerpo celeste compuesto principalmente por hielo, polvo y silicatos, que desarrolla una atmósfera temporal (coma) y a veces una o dos colas cuando se aproxima al Sol debido a la sublimación de sus volátiles. [5](#)

Elementos orbitales Conjunto de parámetros que definen completamente la

órbita de un cuerpo celeste. Los elementos orbitales keplerianos incluyen: semieje mayor, excentricidad, inclinación, longitud del nodo ascendente, argumento del perihelio y anomalía media. Estos parámetros permiten calcular la posición del objeto en cualquier momento. [18](#)

Elementos propios También llamados elementos medios, los elementos propios son los que se obtienen tras eliminar las variaciones de corto período y las forzadas por los planetas perturbadores, utilizados para estudiar la evolución dinámica a largo plazo de asteroides y familias. [18](#)

Espectrométrico Espectrometría, técnica que analiza la distribución espectral de la luz. Los estudios espectrométricos revelan información sobre la composición química, temperatura y velocidad de los objetos celestes. [3](#)

Fotométrico Fotometría, técnica astronómica que mide la intensidad de la luz de los objetos celestes. El análisis fotométrico permite determinar propiedades físicas como magnitud, color y su variabilidad. [3](#)

Fuerzas no gravitacionales Aceleraciones adicionales en cometas producidas por la eyección asimétrica de gas y polvo durante la sublimación, que modifican su órbita más allá de los efectos gravitatorios puros. [13](#)

HTC Cometas Tipo Halley (Halley Type Comets). Cometas con períodos orbitales entre 20 y 200 años y órbitas generalmente inclinadas. Se originan en la Nube de Oort y tienen parámetros de Tisserand menores a 2. [XIII](#), [17](#)

JFC Cometas de la Familia de Júpiter (Jupiter Family Comets). Cometas de corto período con parámetros de Tisserand entre 2 y 3, cuyas órbitas están fuertemente influenciadas por la gravedad de Júpiter. [XIII](#), [6](#), [17](#)

LPC Cometas de Largo Período (Long Period Comets). Cometas con períodos orbitales mayores a 200 años, típicamente miles o millones de años. Muchos provienen de la Nube de Oort y tienen órbitas altamente excéntricas e inclinaciones aleatorias. [XIII](#), [17](#)

Límite de Roche Distancia mínima a la que un cuerpo celeste puede aproximarse a un planeta sin ser destruido por las fuerzas de marea. Depende de las densidades del planeta y del cuerpo menor. [27](#)

MBA Cinturón Principal de Asteroides (Main Belt Asteroids). Región entre las órbitas de Marte y Júpiter que contiene la mayor concentración de asteroides del Sistema Solar. [3](#)

Meteoroide Pequeño cuerpo sólido del Sistema Solar, con tamaño entre 100

- micrómetros y 1 metro, que se desplaza por el espacio interplanetario. [5](#)
- NEJFC** Cometas de la Familia de Júpiter Cercanos a la Tierra (Near-Earth Jupiter Family Comets). JFCs con distancias de perihelio menores a 1.3 ua. [14](#)
- NEOs** Objetos Cercanos a la Tierra (Near-Earth Objects). Cuerpos menores del Sistema Solar cuyas órbitas los llevan a proximidad de la Tierra. Incluyen asteroides y cometas con distancias de perihelio menores a 1.3 ua. [5](#)
- Outburst** Evento repentino de aumento de brillo en un cometa, generalmente causado por la liberación explosiva de gas y polvo debido a fracturas térmicas o liberación de volátiles atrapados. [15](#)
- Parámetro de Tisserand** Parámetro dinámico que se conserva aproximadamente en el problema restringido de tres cuerpos. Se utiliza para clasificar cometas y determinar si han tenido encuentros cercanos con Júpiter. [11](#)
- Perihelio** Posición en la órbita de un cuerpo celeste en el que la distancia al Sol es mínima. [8](#)
- Planeta** Cuerpo celeste que cumple con la definición de planeta de la IAU. En el Sistema Solar existen ocho planetas: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. [1](#)
- Proto-planetario** En la etapa de formación planetaria el disco proto-planetario es la estructura de gas y polvo que rodea a una estrella joven donde se forman los planetas mediante procesos de acreción. Esta fase precede a la formación de los planetas completamente desarrollados y es crucial para entender los mecanismos de formación del Sistema Solar. [1](#)
- Radiante** Punto en la esfera celeste desde el cual parecen originarse los meteoros de una lluvia específica, determinado por la dirección del vector velocidad del stream meteórico. [14](#)
- Rubble pile** Modelo estructural de cuerpos menores donde el objeto está compuesto por agregados de rocas y hielo débilmente unidos por gravedad, más que por un material cohesivo sólido. [xi](#), [25](#)
- SDO** Objeto del Disco Disperso (Scattered Disk Object). Cuerpo menor del Sistema Solar exterior con una órbita altamente excéntrica e inclinada, que se cree fue dispersado por encuentros gravitacionales con Neptuno. [3](#)
- Splitting** Fragmentación o ruptura de un cometa en dos o más partes. Puede

ser causada por fuerzas de marea, estrés térmico, inestabilidad rotacional o impactos. [14](#)

Sungrazers Cometas rasantes del Sol. Cometas con distancias de perihelio extremadamente pequeñas, típicamente menores a 0.02 ua (unos 4 radios solares). Muchos pertenecen a la familia Kreutz. [37](#)

TNB Cinturón Transneptuniano (Trans-Neptunian Belt). Región del Sistema Solar más allá de la órbita de Neptuno que alberga una gran población de cuerpos menores de hielo y roca. [3](#)

Tensile strength Resistencia a la tracción del material. En cometas, valores típicamente bajos (1-100 Pa) que los hacen susceptibles a fragmentación por diversos mecanismos. [26](#)

ZHR Tasa Horaria Cenital (Zenithal Hourly Rate). Número máximo de meteoros por hora que un observador ideal vería bajo condiciones perfectas (cielo oscuro, radiante en el cenit). Parámetro estandarizado para comparar la actividad de diferentes lluvias de meteoros. [15](#)

planetesimales Cuerpo aglomerado sólido y pequeño que existe en el disco proto-planetario y que es el componente fundamental de la acreción planetaria en las etapas de formación del Sistema Solar. [1](#)

APÉNDICES

Apéndice 1

Fragmentaciones cometarias

Tabla 1.1: Lista de cometas fragmentados, tipo de cometa, parámetro de Tisserand y posibles causas de fragmentación. FM = Fuerzas de marea; Int/Desc = Interna o Desconocida; ET = Estrés Térmico; IR = Inestabilidad Rotacional. Los cometas indicados con (D) se desvanecieron repentinamente sin observarse fragmentos

Cometa	Clase	T_J	Causa
C/1882 R1 Great September Comet	Otro	-0.018	FM
16P/Brooks 2	JFC	2.863	FM
C/1963 R1 (Pereyra)	Otro	-0.015	FM
C/1965 S1 (Ikeya-Seki)	Otro	-0.029	FM
D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9)	Otro	2.989	FM
3D/Biela	JFC	2.531	Int/Desc
C/1860 D1 (Liais)	Otro	-	Int/Desc
C/1888 D1 (Sawerthal)	Otro	0.797	Int/Desc
205P/Giacobini	JFC	2.779	Int/Desc
C/1889 O1 (Davidson)	Otro	0.526	Int/Desc
C/1899 E1 (Swift)	Otro	-	Int/Desc
C/1906 E1 (Kopff)	Otro	2.263	Int/Desc
C/1914 S1 (Campbell)	Otro	0.964	Int/Desc
C/1915 C1 (Mellish)	Otro	-	Int/Desc
69P/Taylor	JFC	2.797	Int/Desc
C/1942 X1 (Whipple-Fedtke-Tevzadze)	Otro	1.385	Int/Desc
C/1947 X1 (Southern Comet)	Otro	-0.301	Int/Desc
C/1955 O1 (Honda)	Otro	-	Int/Desc
C/1956 F1 (Wirtanen)	Otro	-	Int/Desc

Continuación de la Tabla

Cometa	Clase	T_J	Causa
C/1968 U1 (Wild)	Otro	-1.418	Int/Desc
C/1969 O1 (Kohoutek)	Otro	0.107	Int/Desc
C/1969 T1 (Tago-Sato-Kosaka)	Otro	0.210	Int/Desc
C/1975 V1 (West)	Otro	0.402	Int/Desc
79P/du Toit-Hartley	JFC	2.943	Int/Desc
108P/Ciffreo	JFC	2.750	Int/Desc
C/1986 P1 (Wilson)	Otro	-	Int/Desc
101P/Chernykh	JFC	2.584	Int/Desc
C/1994 G1 (Takamizawa-Levy)	Otro	-0.980	Int/Desc
51P/Harrington	JFC	2.815	Int/Desc
73P/Schwassmann-Wachmann 3	JFC	2.784	Int/Desc
57P/duToit-Neujmin-Delporte	JFC	2.917	Int/Desc
C/1996 J1 (Evans-Drinkwater)	Otro	-	Int/Desc
128P/Shoemaker-Holt 1	JFC	2.912	Int/Desc
C/1999 S4 (LINEAR)	Otro	-	Int/Desc
C/2001 A2 (LINEAR)	Otro	0.882	Int/Desc
P/2004 V5 (LINEAR-Hill)	JFC	2.743	Int/Desc
168P/Hergenrother	Otro	2.663	Int/Desc
332P/Ikeya-Murakami	Otro	3.012	Int/Desc
483P/PanSTARRS	Otro	3.113	Int/Desc
P/2013 R3 (Catalina-PanSTARRS)	Otro	3.184	Int/Desc
C/2011 J2 (LINEAR)	Otro	-1.258	Int/Desc
C/2018 F4 (PanSTARRS)	Otro	-	Int/Desc
C/1974 V2 (Bennett)	Otro	-0.812	(D)
C/1978 T3 (Bradfield)	Otro	-0.608	(D)
C/1979 M1 (Bradfield)	Otro	-	(D)
C/1983 J1 (Sugano-Saigusa-Fujikawa)	Otro	-0.097	(D)
C/1984 S1 (Meier)	Otro	-0.941	(D)
C/1985 K1 (Machholz)	Otro	-	(D)
C/1987 W1 (Ichimura)	Otro	0.414	(D)
C/1988 P1 (Machholz)	Otro	0.384	(D)
C/1991 X2 (Mueller)	Otro	-	(D)
C/1992 B1 (Bradfield)	Otro	0.823	(D)
C/1992 J2 (Bradfield)	Otro	-	(D)

Continuación de la Tabla

Cometa	Clase	T_J	Causa
C/1992 N1 (Machholz)	Otro	-	(D)
C/1993 Q1 (Mueller)	Otro	-	(D)
C/1996 Q1 (Tabur)	Otro	0.334	(D)
C/1997 N1 (Tabur)	Otro	-	(D)
C/1999 A1 (Tilbrook)	Otro	0.039	(D)
C/2000 W1 (Utsunomiya-Jones)	Otro	-0.661	(D)
C/2002 O4 (Hoenig)	Otro	-	(D)
C/2002 O6 (SWAN)	Otro	0.469	(D)
C/2004 S1 (Van Ness)	Otro	-0.427	(D)
C/2011 W3 (Lovejoy)	Otro	0.002	ET(D)
C/2012 S1 (ISON)	Otro	0.065	ET(D)
C/2019 Y4 (ATLAS)	Otro	0.454	IR/ET(D)
332P/Ikeya-Murakami	JFC	3.012	IR/(D)
483P/PANSTARRS	Otro	3.113	IR/(D)
C/2024 S1 (ATLAS)	Otro	-0.033	IR/(D)
P/2013 R3 (Catalina-PANSTARRS)	Otro	3.184	IR/(D)
354P/LINEAR	Otro	3.583	IR/(D)

Declaracion Autoría Tesis

Santiago Roland

March 2026

1 Declaración de autoría

- Nombre del estudiante: Santiago Roland Alvarez
- Posgrado: Maestría en Física, Opción Astronomía
- Nombre de los tutores: Andrea Sosa Oyarzabal
- Título de la tesis: Estudio del posible origen común de objetos con órbitas similares. Aplicación al caso de los cometas 169P/NEAT y P/2003 T12 (SOHO)
- Fecha: 12 de marzo de 2026

El autor y tutores declaran que se atribuyen la autoría exclusiva de las ideas, desarrollos, programas de computación y resultados de la presente tesis, salvo en los casos que se indique expresamente lo contrario. La presente Declaración de Autoría tiene valor de declaración jurada del estudiante y sus tutores de tesis.

La presente tesis está compuesta por la compilación de N artículo/s que ha sido publicado o aceptados para publicación y N artículo/s que han sido remitidos para publicación, todos ellos, en revistas arbitradas por pares, indexadas y reconocidas en el área específica de la tesis. El estudiante y sus tutores dejan constancia de que las contribuciones aquí declaradas no forman parte de otra tesis.

- Artículo: 1
 - Título: Comet P/2003 T12 (SOHO): A possible fragment of comet 169P/NEAT?
 - Autor de correspondencia: Santiago Roland
 - Co-autores: Andrea Sosa Oyarzabal
 - Correos electrónicos de los co-autores: santiago.roland@cure.edu.uy, asosa@cure.edu.uy
 - Revista: Planetary and Space Science
 - Referencia bibliográfica: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063324000667>

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2024.105902>
- Estatus: Publicado
- Fecha de envío: 5 octubre de 2023
- Fecha de aceptación: 14 marzo de 2024
- Fecha de publicación: 12 de abril de 2024
- Conceptualización del proyecto: Santiago Roland, Andrea Sosa
- Administración del proyecto: Santiago Roland
- Supervisión del proyecto: Andrea Sosa
- Metodología y diseño: Santiago Roland, Andrea Sosa
- Escritura del manuscrito: Santiago Roland
- Revisión y edición del manuscrito: Santiago Roland, Andrea Sosa
- Revisión de la literatura: Santiago Roland, Andrea Sosa
- Desarrollo de Software: Santiago Roland
- Desarrollo de bases de datos: Santiago Roland
- Análisis formal: Andrea Sosa
- Validación de resultados: Santiago Roland
- Obtención de recursos: Andrea Sosa
- Obtención de fondos: Andrea Sosa
- Otra participación (explique): -
- Breve descripción de la contribución: Se presenta un método para detectar épocas de fragmentación en cuerpos con un posible origen común, mediante la búsqueda de fragmentos ficticios generados mediante un modelo de fragmentación simple y donde buscamos que la evolución orbital del fragmento hacia el presente, sea compatible con las incertidumbres observacionales del par de objetos en el presente.
- Si el artículo forma parte de otras tesis nacionales o internacionales exponga brevemente y de manera explícita la contribución diferenciada entre los estudiantes involucrados: No