



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

DOCTORADO EN ASTRONOMÍA

**Actividad cometaria en objetos de la región externa
del cinturón de asteroides**

Lic. Esteban García Migani

Director: Dr. Ricardo A. Gil-Hutton

SAN JUAN

ARGENTINA

Marzo de 2019

a Emiliano, Fernanda, Manuel, Nico, Pablo y Viky
por ser la mejor familia del Sistema Solar.

a Nanci, a quien le debo una dedicatoria exclusiva
después de la tesis de licenciatura.

a Sofia por acompañarme, aguanterme y estar.

a Maitena por enseñarme qué es lo realmente
importante.

Prefacio

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctor en Astronomía de la Universidad Nacional de San Juan. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en cooperación con investigadores del Grupo de Ciencias Planetarias del Departamento de Astronomía y Geofísica de la Universidad Nacional de San Juan, y bajo la dirección del Dr. Ricardo Gil-Hutton. Parte de este trabajo se realizó en el Complejo Astronómico El Leoncito.

Esteban Garcia Migani
egarciamigani@conicet.gov.ar

San Juan

2018

Resumen

En este trabajo se presentan resultados sobre la búsqueda y análisis de la actividad cometaria en objetos de la región externa del cinturón de asteroides con el objetivo de entender mejor el transporte de material volátil de las zonas externas a las regiones más internas del Sistema Solar, tales como el cinturón de asteroides o las proximidades a la Tierra.

Inicialmente se realizó una búsqueda de objetos provenientes del Sistema Solar exterior que, luego de ser perturbados por Júpiter, llegan transitoriamente a la región de los Hildas. Como las propiedades físicas superficiales de estos objetos y los asteroides del grupo Hilda son similares, la única manera de distinguirlos es mediante estudios de su evolución dinámica. Mediante este procedimiento se seleccionaron 11 candidatos.

A continuación se seleccionaron algunos de estos candidatos para su observación con el objeto de detectar actividad cometaria cuando se encuentran próximos al perihelio de su órbita. En esta Tesis se muestran particularmente los resultados obtenidos para el objeto (457175) 2008 GO98 el cual ha mostrado actividad en un importante arco de su órbita.

Los datos observacionales que se utilizaron en este trabajo fueron adquiridos exclusivamente por mí, mediante observaciones realizadas en el Complejo Astronómico El Leoncito, Instituto operado por convenio entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina (CONICET) y las Universidades

Nacionales de La Plata, Córdoba, y San Juan.

Originalidad

Los conceptos, ideas, resultados y programas de computación son originales del autor, salvo expresa mención al respecto. Los resultados del capítulo 2 fueron publicados en *Astronomy & Astrophysics* **590**, número de artículo 111, año 2016 y los resultados presentados en el capítulo 3 fueron publicados en *Planetary and Space Science* **611**, página 12, año 2018, en ambos casos en co-autoría con R. Gil-Hutton.

Agradecimientos

Antes que nada, quiero agradecer a Ricardo la cantidad de conocimientos compartidos y sin los cuales hubiese sido imposible llevar a cabo este trabajo... también por su inmensa paciencia para conmigo.

Gracias a Cecilia, Florencia y Romina por las horas, viajes, posters, charlas, computadoras, formularios, resoluciones, cursos, etc. etc. etc. etc. compartidos.

Gracias a Marcela y Jorge por su permanente predisposición para dar una mano en lo que sea, y tener siempre un consejo o sugerencia, y no sólo en el ámbito académico.

Gracias a la gente del Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) por los años que compartimos lugar de trabajo y por hacer confortables mis estadías en la montaña.

Gracias a todos aquellos que, de una u otra manera, han aportado para que pueda terminar esta Tesis.

Índice general

Prefacio	I
Resumen	III
Originalidad	V
Agradecimientos	VII
Listado de símbolos y abreviaturas	XXI
1. Introducción	1
1.1. Asteroides	3
1.1.1. El cinturón de asteroides	4
1.1.2. Características superficiales y clases taxonómicas	8
1.2. Cometas	17
1.2.1. Clases dinámicas	18
1.2.2. Reservorios de cometas	23
1.2.3. Física de cometas	27
1.3. Objetos de transición	34
1.3.1. Asteroides activos	35
1.3.2. Asteroides en órbitas cometarias	38

1.3.3. Hildas y quasi-Hildas	40
1.4. Objetivos del trabajo	42
2. Selección de candidatos	43
2.1. Selección inicial	44
2.2. Evolución dinámica	49
2.2.1. Clones	62
3. El caso de 2008 GO₉₈	71
3.1. Observaciones	73
3.2. En busca de actividad	77
3.3. Núcleo	81
3.4. Evolución dinámica	87
4. Conclusiones y posibilidades futuras	91

Índice de Figuras

1.1. Distribución actual de elementos orbitales en el plano a vs e de los primeros 100.000 objetos numerados del cinturón de asteroides. Las líneas verticales indican la posición de las resonancias de movimientos medios más importantes, de izquierda a derecha: 4:1 en 2,06 ua; 3:1 en 2,5 ua; 5:2 en 2,82 ua; 7:3 en 2,95 ua; 2:1 en 3,28 ua; 3:2 en 3,97 ua y 1:1 en 5,2 ua. Datos obtenidos del MPC.	6
1.2. Distribución de la inversa del semieje mayor ($1/a$) para cometas quasi-isotrópicos. Adaptado de Marsden y Williams (1992).	19
1.3. Clasificación dinámica de cometas de acuerdo a Levison (1996). Adaptado de Levison (1996).	22
1.4. Estructura de la nube de Oort y sus diferentes regiones. En la imagen también está representado el cinturón transneptuniano y los planetas gigantes (J, S, U, N). Las flechas indican las rutas principales por las que los objetos de la nube de Oort llegan a la región planetaria. Los números representan distancias heliocéntricas en ua. Adaptado de Fernández (2005)	24

1.5. Tasa de sublimación en función de la distancia heliocéntrica para hielos de H_2O , CO_2 y CO . Estos valores se desprenden de resolver la ecuación de equilibrio radiativo. Las curvas con la marca F hacen referencia al caso “frio” mientras que la marca C al caso “caliente” (ver ecuación 1.2). Adaptado de Jewitt et al. (2017) 30

1.6. Volátiles detectados en cometas mediante estudios espectroscópicos. Lo que se muestra es la abundancia de cada especie molecular en relación a la molécula de H_2O . El número a la derecha indica la cantidad de cometas en los que se observó dicha especie molecular, y el rango de valores encontrado entre esas detecciones se muestra en verde. Todas las moléculas observadas sólo una vez fueron observadas en el cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp). Tomado de Mumma y Charnley (2011). 33

2.1. Distribución de los 2439 objetos seleccionados en la región de los Hildas ($3.7 \text{ ua} \leq a \leq 4.2 \text{ ua}$) en el plano de los elementos lagrangianos $(k; h)$ (ver ecuación 2.1). El círculo negro representa el límite de estabilidad que se eligió para elegir los candidatos a QHCs, los cuales están representados en negro. 45

2.2. Distribución de los 2439 objetos seleccionados en la región de los Hildas ($3.7 \text{ ua} \leq a \leq 4.2 \text{ ua}$) en el plano de los elementos lagrangianos $(q; p)$ (ver ecuación 2.2). En cyan se observan todos los Hildas y en negro los objetos que pudieron haber ingresado recientemente a esta región del cinturón de asteroides desde la región de los Centauros. Las dos estructuras anulares que se observan corresponden a las dos familias que habitan esta región. El anillo interior corresponde a la familia Schubart, mientras que el exterior corresponde a la familia Hilda. 47

- 2.3. Distribución de los 2439 objetos seleccionados en la región de los Hildas ($3.7 \text{ ua} \leq a \leq 4.2 \text{ ua}$) en el plano $(a_x; a_y)$ (ver ecuación 2.3). En cyan se observan todos los Hildas y en negro los objetos que pudieron haber ingresado recientemente a esta región del cinturón de asteroides desde la región de los Centauros. 48
- 2.4. Evolución del semieje mayor (rojo), y de las distancias perihélica (verde) y afélica (azul) del objeto (18916) 2000 OG₄₄ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. $T = 0$ corresponde a las 00:00 hs de TU del 23 de mayo de 2014. El semieje mayor de Júpiter se indica en negro. 51
- 2.5. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto (371837) 2007 VM₃₁₈ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que las descritas en la figura 2.4. 52
- 2.6. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2001 QG₂₈₈. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 53
- 2.7. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2002 UP₃₆ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 54
- 2.8. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2003 UR₂₆₇. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 55
- 2.9. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2006 XL₅. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 56
- 2.10. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2007 UC₉. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 57
- 2.11. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2008 GO₉₈ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 58

2.12. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2009 SR₁₄₃ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 59

2.13. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2009 SR₁₄₃ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 60

2.14. Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2013 QR₉₀. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4. 61

2.15. Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos (18916) 2000 OG₄₄ (arriba) y (371837) 2007 VM₃₁₈ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades. 63

2.16. Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos 2001 QG₂₈₈ (arriba) y 2002 UP₃₆ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades. 64

2.17. Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos 2003 UR₂₆₇ (arriba) y 2006 XL₅ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades. 65

- 2.18. Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos 2007 UC₉ (arriba) y 2008 GO₉₈ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades. 66
- 2.19. Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos 2009 KF₃₇ (arriba) y 2009 SR₁₄₃ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades. 67
- 2.20. Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para el objeto 2013 QR₉₀. Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades. 68
- 3.1. En azul la órbita de 2008 G0₉₈, los cuadrados azules indican las posiciones del objeto cuando este fue observado, correspondiendo el primer turno a la posición más cercana al perihelio. En rojo esta indicada la órbita de Júpiter. Las posiciones de los perihelios de ambas órbitas están indicadas con una cruz. 73
- 3.2. Imagen del telescopio de 2,15 m Jorge Sahade emplazado en la estación de altura del Complejo Astronómico el Leoncito. Foto: Esteban García Migani. 75

3.3. (Izquierda) Resultado de co-adicionar 16 imágenes con un tiempo de exposición individual de 30 s tomadas el 5 de Septiembre de 2016. El objeto en el centro es 2008 GO₉₈. Las flechas indican el Norte (N), Este (E), dirección antisolar ($-\odot$) y la dirección opuesta al vector de velocidad heliocéntrica del objeto ($-v$). La imagen tiene un tamaño de $180 \times 180 \text{ arcsec}$. (Derecha) En azul el perfil de intensidad de 2008 GO₉₈ y en rojo el de estrellas del campo (PSF). 77

3.4. (Izquierda) Resultado de co-adicionar 30 imágenes con un tiempo de exposición individual de 60 s tomadas el 6 de Septiembre de 2016, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) En azul el perfil de intensidad de 2008 GO₉₈ y en rojo el de estrellas del campo (PSF). 78

3.5. (Izquierda) Resultado de co-adicionar 6 imágenes con un tiempo de exposición individual de 70 s tomadas el 29 de Marzo de 2017, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) En azul el perfil de intensidad de 2008 GO₉₈ y en rojo el de estrellas del campo (PSF). 79

3.6. (Izquierda) Resultado de co-adicionar 20 imágenes con un tiempo de exposición individual de 70 s tomadas el 30 de Marzo de 2017, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) Diagramas de contornos de intensidad superpuestos sobre la imagen ampliada de 2008 GO₉₈. 80

3.7. (Izquierda) Resultado de co-adicionar 10 imágenes con un tiempo de exposición individual de 360 s tomadas el 24 de Junio de 2017, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) Diagramas de contornos de intensidad superpuestos sobre la imagen ampliada de 2008 GO₉₈. 81

3.8. (Izquierda) Resultado de co-adicionar 10 imágenes con un tiempo de exposición individual de 360 s tomadas el 25 de Junio de 2017, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) Diagramas de contornos de intensidad superpuestos sobre la imagen ampliada de 2008 GO₉₈. 82

- 3.9. Diámetro del núcleo de 2008 GO₉₈ en función del albedo. La curva roja continua corresponde a valores obtenidos con un coeficiente de fase de $\beta = 0,11$ magnitudes por grado, mientras que la curva discontinua corresponde a un valor de $\beta = 0,035$ magnitudes por grado. Las líneas verticales corresponden a valores de albedo de 0,04; 0,069 y 0,13. 84
- 3.10. Evolución del semieje mayor (azul), y de las distancias perihélica (verde) y afélica (rojo) del objeto 2008 GO₉₈ durante 30.000 años de integración hacia atrás más 30.000 años de integración hacia adelante. $T = 0$ corresponde a las 00:00 hs de TU del 23 de mayo de 2014. El semieje mayor de Júpiter se indica con una línea recta en 5,2 ua. 85
- 3.11. Evolución orbital de los elementos orbitales de los 100 clones de 2008 GO₉₈. Arriba a la izquierda el semieje mayor, arriba a la derecha la distancia perihélica, abajo a la izquierda la excentricidad y abajo a la derecha la inclinación. En verde se indica el promedio, y en azul la desviación estándar para cada punto. 86
- 3.12. Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ de 2008 GO₉₈ para los 30.000 años de integraciones hacia adelante. Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades. 88

Índice de Tablas

1.1.	Descripción de las clases taxonómicas de Tholen	12
1.2.	Asteroides activos detectados hasta la fecha. En las columnas se indica: semieje mayor (a); excentricidad (e); seno de la inclinación $sen(i)$; radio estimado del núcleo (r_N) y mecanismo que genera la actividad del objeto (act.). En la última columna (R) indica alta velocidad de rotación, (I) impacto, (S) sublimación, (?) indefinido. Adaptado de Hsieh et al. (2018)	37
2.1.	Objetos seleccionados como candidatos a mostrar actividad cometaria. La tabla lista el nombre del objeto, su semieje mayor (a), excentricidad (e), inclinación (i), y magnitud absoluta (H) (de acuerdo a los datos del <i>Jet Propulsion Laboratory</i>).	50
2.2.	$T(q < 1)$ indica cuanto tiempo, en promedio, el objeto tuvo una órbita con un perihelio menor a 1 ua, mientras que T indica el momento en que el objeto alcanza finalmente una órbita con un semieje mayor menor a 5,2 ua.	70
3.1.	Parámetros orbitales de 2008 GO ₉₈ para la época del 4 de diciembre de 2015 (TDB) tomados de la base de datos del <i>Jet Propulsion Laboratory</i>	71
3.2.	La tabla muestra las fechas de las observaciones, la distancia heliocéntrica del objeto (r), la distancia geocéntrica (Δ), el ángulo de fase (α), la anomalía verdadera (f) y el número de exposiciones (n).	72

Listado de símbolos y abreviaturas

- ua = unidad astronómica ($1,496 \times 10^{13} \text{ cm}$).
- a, e, i = semieje mayor, excentricidad, e inclinación.
- $f, \omega, \tilde{\omega}$ = Anomalía verdadera, argumento del perihelio y longitud del perihelio.
- Ω, na = longitud del nodo y velocidad orbital media.
- q, Q = distancias perihélica y afélica de una órbita.
- T = período orbital.
- α = ángulo de fase.
- JFC = cometa de la familia de Júpiter (*Jupiter family comet*).
- NIC = cometa casi-isotrópico (*Nearly-isotropic comet*).
- MBC = cometa del cinturón principal (*Main-belt comet*).
- QHC = cometa *quasi*-Hilda (*Quasi-Hilda comet*).
- TNO = objeto transneptuniano (*Trans-neptunian object*).
- ECAS = *Eight-Color Asteroid Survey*.
- H = magnitud absoluta.
- F = flujo.
- PSF = función de dispersión de punto (*Point spread function*).

- NEOs = objetos próximos a la Tierra (*Near Earth Objects*).
- SDSS = *Sloan Digital Sky Survey*.
- SMASS = *Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey*.
- H_2O = molécula de agua.
- OH = radical hidroxilo.
- CO_2 = molécula de dióxido de carbono.
- CSD = función acumulativa de tamaños (*cumulative size distribution*).

Capítulo 1

Introducción

De acuerdo a la definición de la Unión Astronómica Internacional (IAU por sus siglas en inglés) debe considerarse como *cuerpo menor del Sistema Solar* a todo objeto que orbita al Sol y que no es ni un planeta, ni un planeta enano, ni un satélite natural. Por lo tanto esta definición incluye a los asteroides, a la mayoría de los objetos trans-neptunianos (TNOs por sus siglas en inglés), a los cometas, y demás cuerpos pequeños. Si bien estos objetos representan una ínfima fracción de la masa del Sistema Solar, contienen información valiosa sobre la formación y evolución de éste. La importancia de los cuerpos menores del Sistema Solar reside en que muchos de ellos son objetos que sobrevivieron al proceso de acreción y evolución de los cuales se formaron los planetas. Al ser remanentes de los procesos que lo moldearon, estos pequeños cuerpos de alguna manera ofrecen pistas sobre las condiciones en las cuales se encontraba el Sistema Solar en las épocas de su formación.

Los asteroides se encuentran en su mayoría ubicados en el cinturón principal entre Marte y Júpiter, lugar donde se habrían formado, moviéndose en órbitas de baja excentricidad y con una composición que sería preferentemente rocosa, lo que los hace objetos inertes. Por otro lado, los cometas se habrían formado en las regiones externas del Sis-

tema Solar y estarían compuestos principalmente por hielos de distintas especies. Esta composición particular caracteriza a estos objetos ya que cuando un núcleo cometario se acerca al Sol estos hielos se subliman, generando un halo de gas y polvo a su alrededor. En este escenario es importante definir la denominada “línea de hielo” que corresponde a la distancia a la estrella central del sistema planetario que indicaría a partir de donde sería posible la condensación de partículas de hielo y, por lo tanto, la posibilidad de que estas especies sean acretadas o no cuando se formen planetesimales. La línea de hielo afecta también la composición y formación de planetesimales en sistemas exoplanetarios ya que en algunos discos protoplanetarios se ha logrado detectar y medir su distancia a la estrella central (Cieza et al., 2016).

Si bien a *grosso modo* los conceptos arriba mencionados son válidos y han sido utilizados para plantear un escenario clásico donde asteroides y cometas forman dos grupos o poblaciones de objetos sin ningún tipo de (o muy poca) interrelación, los avances observacionales y tecnológicos han dado evidencias de que los procesos de formación son bastante más complejos. Por ejemplo, la misión *Stardust* lanzada en 1999 por la *NASA*, que tenía entre uno de sus objetivos recolectar muestras de partículas de polvo de la coma del cometa 81P/Wild 2 (Brownlee et al., 2003), encontró que la abundancia de silicatos era mayor a la esperada y que muchos de estos mostraban minerales con indicios de haber sido formados a altas temperaturas o, lo que es lo mismo, deberían provenir de la regiones internas de la nebulosa solar (Brownlee et al., 2006). Por otro lado, Campins et al. (2010) confirmó espectroscópicamente la presencia de agua en el asteroide (24) Themis utilizando el telescopio infrarrojo IRTF de 3 m de la *NASA*, y luego Licandro et al. (2011) confirmó la presencia de agua y orgánicos en el asteroide (65) Cybele por medio de observaciones infrarrojas del IRTF y del telescopio espacial *Spitzer*.

(24) Themis y (65) Cybele fueron los primeros objetos del cinturón de asteroides en mostrar pruebas directas de la presencia de hielo, pero esta posibilidad ya se infería de

la observación de algunos objetos del cinturón de asteroides que mostraban actividad de tipo cometaria provocada aparentemente por sublimación de hielos (Elst et al., 1996; Read et al., 2005; Hsieh et al., 2006). Estos particulares objetos muestran características dinámicas que corresponden a un asteroide pero sus propiedades físicas observacionales son más parecidas a las de un cometa. A su vez los denominados ACOs (*asteroids in cometary orbits*) (Fernández et al., 2002; Jewitt, 2005; Alvarez-Candal y Licandro, 2006; Fernández y Sosa, 2015) muestran características dinámicas de cometa y observacionales de asteroide. Lo expuesto pone en evidencia que en realidad la diferencia entre cometas y asteroides es bastante más compleja de lo que se pensaba hace un tiempo.

A continuación se dará una breve descripción de estas poblaciones de objetos, incluyendo a aquellos que no pueden catalogarse fácilmente como cometas o asteroides, haciendo una descripción de sus características más relevantes en relación con los objetivos de esta Tesis.

1.1. Asteroides

Los asteroides son cuerpos relativamente pequeños, sólidos y que orbitan al Sol con trayectorias que en su mayoría se encuentran acotadas entre las órbitas de Marte y Júpiter. No poseen atmósfera alguna, ni muestran eyección de gas o polvo hacia el espacio interplanetario, lo que hace que observacionalmente desde la Tierra se muestren como objetos puntuales.

A diferencia de las estrellas, los planetas y los cometas que fueron descubiertos y estudiados por las civilizaciones antiguas, el primer asteroide fue descubiertos recién en 1801. Giuseppe Piazzi descubrió en ese año al asteroide (1) Ceres mientras trabajaba en la confección de un catálogo estelar. Este hallazgo coincidía perfectamente con la ley de Titius-Bode¹ que predecía en aquella época que entre Marte y Júpiter debía haber

¹La ley de Titius-Bode es una hipótesis propuesta por el astrónomo Johann Daniel Titius von

un planeta. Un año después William Olbers descubrió el segundo asteroide: (2) Pallas. Como estos objetos se movían alrededor del Sol pero mostraban apariencia estelar debido a que se los observaba como objetos puntuales, recibieron la denominación de asteroides. Antes del comienzo del siglo XX ya se habían descubierto más de 450 y en la actualidad se conocen varios cientos de miles. Vale aclarar que bajo las definiciones adoptadas por la IAU en el año 2006, Ceres ahora entra en la categoría de planeta enano, junto a Plutón, Eris, Haumea y Make-Make.

Los tamaños de los asteroides cubren un amplio rango de valores, desde algunos cientos de kilómetros hasta objetos muy pequeños. La distribución de tamaños del cinturón de asteroides tiene forma ondulada, con dos “abultamientos” característicos uno en $\sim 3,5$ km y el otro en ~ 100 km. La distribución de tamaños de alguna manera describe la evolución colisional sufrida por la población en cuestión y en el caso del Sistema Solar indicaría que la mayoría de los asteroides con tamaños menores a ~ 50 km son fragmentos de colisiones entre objetos de mayor tamaño que han sucedido a lo largo de la historia del Sistema Solar.

1.1.1. El cinturón de asteroides

Si bien, como se mencionó anteriormente, se observan asteroides en todo el Sistema Solar la gran mayoría de estos se encuentran ubicados en lo que se denomina el cinturón de asteroides, que no es más que la región del Sistema Solar entre Marte y Júpiter. En general los asteroides que habitan el cinturón tienen órbitas prógradas e inclinaciones bajas. Esta zona del Sistema Solar se ve muy perturbada por efectos dinámicos, lo que genera en algunas zonas falta de objetos y en otras, concentraciones. Esto hace que podamos a su vez subdividir el cinturón de asteroides en distintas regiones.

Wittenberg en 1766. Expresaba que las distancias de los planetas al Sol seguían una progresión de la forma $a_n = 0,4 + 3 \times 2^n$, donde a_n es la distancia del planeta al Sol y $n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$ para Mercurio, Venus, Tierra, etc.

Los cuerpos con semiejes $2,0 \text{ ua} < a < 2,5 \text{ ua}$ forman lo que se denomina el cinturón interior, luego entre $\sim 2,5 \text{ ua}$ y $2,82 \text{ ua}$ se encuentra el cinturón medio y la región con $2,82 \text{ ua} > a > 3,3 \text{ ua}$ es el cinturón exterior (DeMeo et al., 2015). Además entre Marte y Júpiter podemos encontrar grupos dinámicos de objetos, como es el caso de los *Hungarias* en $\sim 1,9 \text{ ua}$ (Cañada-Assandri et al., 2015); los *Cybele* entre $\sim 3,3 \text{ ua}$ y $3,51 \text{ ua}$ (Carruba et al., 2015) ; los *Hildas* agrupados en $\sim 4 \text{ ua}$ y los *Troyanos de Júpiter* ubicados en los puntos de equilibrio L4 y L5 de Júpiter (esto es, a $\sim 5,2 \text{ ua}$) (De Prá et al., 2018). En el caso del cinturón interior, los asteroides muestran un valor medio de excentricidad $\langle e \rangle = 0,15$ y de inclinación $\langle i \rangle = 6,0^\circ$, para el cinturón medio estos valores son $\langle e \rangle = 0,14$ e $\langle i \rangle = 10,7^\circ$, mientras que para el cinturón externo $\langle e \rangle = 0,10$ e $\langle i \rangle = 12,1^\circ$ (Gil-Hutton, 2004).

Estos límites en las divisiones del cinturón no son arbitrarios, sino que están delimitadas por resonancias de movimientos medios con Júpiter, de manera tal que el límite entre el cinturón interior y el medio (en $\sim 2,5 \text{ ua}$) corresponde precisamente a la resonancia de movimientos medios 3:1, y el límite entre el cinturón medio y el exterior (en $\sim 2,8 \text{ ua}$) corresponde a la resonancia 5:2. Y por último el límite del cinturón exterior se da en $\sim 3,28 \text{ ua}$ que corresponde a la resonancia 2:1. Las resonancias de movimientos medios entre dos objetos se producen cuando existe una conmensurabilidad entre sus movimientos medios. Existe un gran número de resonancias de movimiento medio tanto con Júpiter como con otros planetas del Sistema Solar que afectan a la población de asteroides. En la figura 1.1 se muestra la distribución de asteroides del cinturón principal en un gráfico de semieje mayor (a) versus excentricidad (e), donde pueden apreciarse los vacíos que generan las resonancias de movimientos medios mencionadas y también otras regiones donde se concentran objetos.

Además de las resonancias de movimientos medios, los objetos del Sistema Solar sufren los efectos de las resonancias seculares. De acuerdo a Froeschle y Scholl (1989) se puede decir que un objeto se encuentra en una resonancia secular cuando la variación

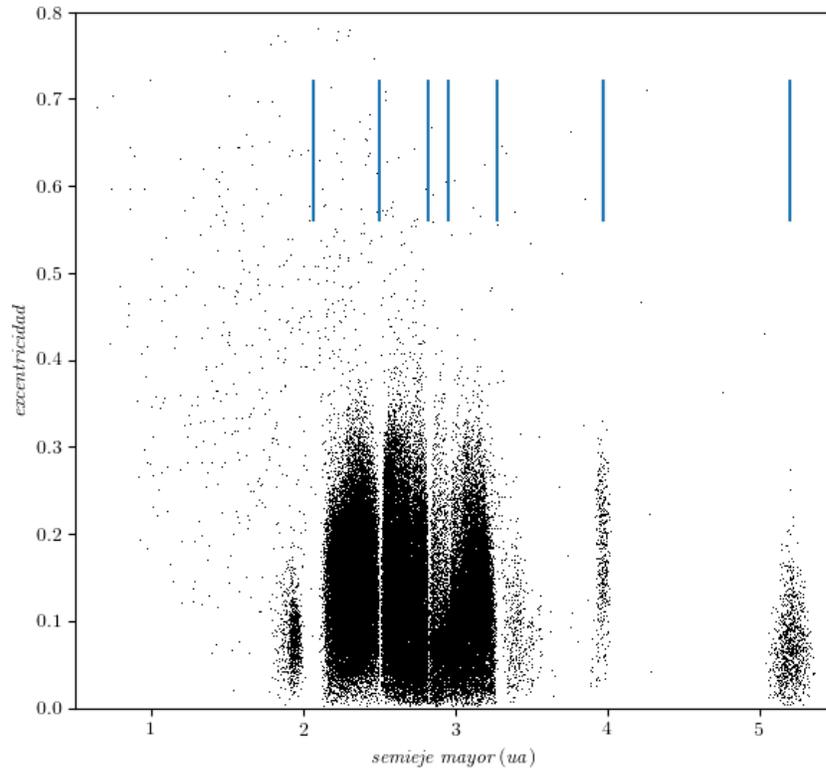


Figura 1.1: Distribución actual de elementos orbitales en el plano a vs e de los primeros 100.000 objetos numerados del cinturón de asteroides. Las líneas verticales indican la posición de las resonancias de movimientos medios más importantes, de izquierda a derecha: 4:1 en 2,06 ua; 3:1 en 2,5 ua; 5:2 en 2,82 ua; 7:3 en 2,95 ua; 2:1 en 3,28 ua; 3:2 en 3,97 ua y 1:1 en 5,2 ua. Datos obtenidos del MPC.

media de su longitud del perihelio $\langle \dot{\omega}_a \rangle$ es igual (o muy cercana) a la variación media de la longitud del perihelio de un planeta masivo $\langle \dot{\omega}_P \rangle$, o si la variación media de la longitud del nodo ascendente del objeto $\langle \dot{\Omega}_a \rangle$ coincide o es muy cercana a la de un planeta masivo $\langle \dot{\Omega}_P \rangle$. Froeschle y Scholl (1989) también destacan que, en el caso del cinturón de asteroides, las resonancias seculares más importantes son las ν_5 , ν_6 y ν_{16} .

Por ejemplo, el corte abrupto de objetos en $a \sim 2$ ua es producto de la resonancia ν_6 ligada a la variación de la longitud del perihelio de los asteroides y de Saturno; esta resonancia produce un aumento en la excentricidad de los objetos en esta región del cinturón hasta que se vuelven cruzadores de las órbitas de Marte y de la Tierra. De acuerdo a Bottke et al. (2002) una gran cantidad de objetos cercanos a la Tierra (NEOs por sus siglas en inglés) son producto de este mecanismo. Precisamente Bottke et al. (2002) encuentra que la población de NEOs tiene tres fuentes principales de objetos que provienen del cinturón principal. Aquellos que se encuentran en la mencionada resonancia ν_6 que aporta el 37% de los NEOs, la población de cruzadores de Marte (25%) y aquellos en la resonancia 3:1 (23%). Por otro lado, los cuerpos en resonancia ν_5 son aquellos cuya variación de la longitud del perihelio $\tilde{\omega}$ es igual o cercana a la variación de la longitud del perihelio de Júpiter $\tilde{\omega}_J$. De acuerdo a Wetherill (1987) la región resonante ν_5 en 2,2 ua puede ser una fuente de asteroides Apolo de alta inclinación e incluso de meteoritos. En cuanto a la resonancia ν_{16} , es aquella que ocurre cuando la variación del nodo ascendente del asteroide Ω es igual o muy cercano al de Jupiter Ω_J , afecta principalmente las inclinaciones. La región de altas inclinaciones del grupo de asteroides Hungarias es posiblemente una fuente de meteoritos debido a esta resonancia (Froeschle y Scholl, 1989).

La dispersión de excentricidades hace al cinturón de asteroides una zona afectada por un proceso colisional que aún se encuentra activo. Como uno de los resultados del proceso colisional surgen las denominadas *familias de asteroides* (Hirayama, 1918). Estos grupos de asteroides son el resultado de una colisión y posterior fractura y dispersión

de los fragmentos. Actualmente Nesvorný et al. (2015) ha encontrado en el cinturón principal 122 familias. Es importante mencionar que no se deben confundir las familias de asteroides con los grupos dinámicos debido a que las primeras provienen del proceso colisional sobre un objeto inicial, mientras que los grupos dinámicos comparten una región del cinturón de asteroides usualmente limitada por resonancias pero no poseen un origen común.

1.1.2. Características superficiales y clases taxonómicas

Una forma de comprender dónde y cómo se formaron los asteroides es la de estudiar su composición y tratar de correlacionarla con su posición en el sistema y su evolución dinámica. Lamentablemente son muy pocos los asteroides para los cuales se ha obtenido información composicional *in-situ* gracias al uso de sondas espaciales, por lo que el grueso de la información que se tiene de estos objetos es gracias a las observaciones realizadas desde Tierra o utilizando telescopios espaciales.

La luz que refleja un asteroide es en definitiva la luz del Sol reflejada y levemente alterada por la absorción de energía producida por los compuestos presentes en la superficie del objeto. El espectro producido no es un espectro de líneas como es el caso estelar sino que es un espectro de bandas debido a que la absorción es producida por compuestos muy complejos. Este tipo de espectros tiene una variación suave y por lo tanto es posible clasificarlos mediante técnicas taxonómicas estudiando los cambios de pendiente y la posición de las bandas de absorción.

Una forma de obtener esta información es mediante técnicas espectrofotométricas donde el objeto es observado fotométricamente en filtros de banda ancha o intermedia y esta información se utiliza para calcular las variaciones en la pendiente espectral. Si bien esta técnica no caracterizaba completamente el espectro del objeto permitía estudiar objetos débiles que no eran aptos para la aplicación de otra técnica.

La otra posibilidad es utilizar técnicas espectroscópicas. La espectroscopía es quizás

la técnica que más información nos puede aportar para estudiar la composición superficial de los asteroides, pero sin embargo es muy costosa en cuanto a tiempo de observación y limitada en cuanto al brillo de los objetos en los que se puede aplicar. Utilizando esta técnica es posible obtener información sobre la composición de la superficie del objeto e incluso es posible inferir datos importantes de la mineralogía mediante analogías con los espectros de meteoritos y otros compuestos, lo que permitiría determinar la presencia en la superficie de diferentes minerales tales como olivinos, piroxenos, espinelas, filosilicatos, algunos minerales hidratados y componentes orgánicos; así como también cuantificar la abundancia de hierro y otros elementos químicos.

Uno de los primeros estudios que resultaron relevantes para el estudio de la composición de los asteroides fue el realizado por Chapman et al. (1975), quien utilizando datos observacionales encuentra que los cuerpos que orbitan en las regiones más internas tienen un albedo mayor al de aquellos que lo hacen en las regiones externas, lo que podría deberse a un cambio en las propiedades del material de sus superficies. A medida que se fue agrupando a los asteroides de acuerdo a sus colores y por ende a características composicionales similares, se empezó a observar un gradiente composicional a través del Sistema Solar que fue considerado como indicador de un gradiente térmico producido en la época en la cual el sistema se formó (Zellner et al., 1985a; Bell et al., 1989). En un principio esto se intentó interpretar por analogía con la muestra de meteoritos existente en los museos de la Tierra utilizando la hipótesis de que los asteroides con colores más enrojecidos y que ocupan las órbitas más cercanas al Sol eran objetos que habrían estado expuestos a altas temperaturas, sufriendo alteraciones térmicas considerables (McCord y Gaffey, 1974). Por el otro lado, los objetos más azules y en órbitas más externas, habrían sufrido poca alteración térmica, conservando una composición similar a la original de la nebulosa solar (Chapman et al., 1975). Debido a que esta hipótesis presentaba cada vez más problemas a medida de que se obtenía más información de diferentes objetos, finalmente fue descartada completamente luego de la visita de la sonda Hayabusa

al asteroide (25143) Itokawa en 2005, un asteroide que mostraba color enrojecido pero material claramente primitivo (Nakamura et al., 2011). Este resultado observacional indicaría que si bien pudo haber existido un gradiente térmico durante la formación del Sistema Solar y de los asteroides, aparentemente este no habría sido tan brusco.

Como se mencionó previamente, las diferencias de color en los asteroides proveen una base natural para desarrollar un sistema de clasificación. Las primeras mediciones de color fueron reportadas por Bobrovnikoff (1929). Si bien estas observaciones no aportaron mucha información sobre las características superficiales de los asteroides, ya que eran pobres tanto en precisión de las mediciones como en número, sentaron las bases para lo que sería más adelante la observación espectroscópica y espectrofotométrica de estos objetos. Recién a mediados del siglo XX se incrementó el número de observaciones y se comenzó a recolectar información valiosa. Las primeras observaciones de este tipo fueron realizadas en el sistema fotométrico UBV de manera sistemática para investigar en ese rango de colores a un gran número de asteroides (Wood y Kuiper, 1963; Chapman et al., 1971). A partir de estos trabajos se empezaron a agrupar los objetos en dos grupos de acuerdo a sus propiedades espectrofotométricas. Más tarde, Zellner (1973) realizó un estudio polarimétrico de un conjunto de asteroides y sugiere clasificarlos en dos grandes grupos discriminados de acuerdo a su albedo: por un lado un grupo de bajo albedo o “carbonáceos” y por otro los brillantes o “rocosos”.

Con los avances tecnológicos y sus aplicaciones a la astronomía observacional fue posible proponer una clasificación mucho más precisa y que considere las propiedades físicas de los asteroides. En este sentido, Chapman et al. (1975) utilizó mediciones polarimétricas, espectrofotométricas (en el visual y en el infrarrojo) y radiométricas de 110 asteroides con mediciones de tamaños precisas. Encuentra que el 90 % cae en alguno de los dos grupos mencionados, denominados de tipo *C* para los carbonáceos y de tipo *S* para los rocosos. Los objetos pertenecientes al 10 % restante, que no encajaba en ninguno de los grupos anteriores, fueron asignados a un tipo adicional denominado tipo

U. Si bien en ese momento ya se podían diferenciar a grandes rasgos las propiedades superficiales de algunos asteroides, el primer relevamiento importante con el objetivo de generar una clasificación taxonómica fue el *Eight-Color Asteroid Survey* (ECAS) (Zellner et al., 1985b). Este fue un estudio espectrofotométrico en ocho bandas del cual se desprendió la taxonomía propuesta por Tholen (1984), la cual también consideraba para la clasificación los albedos de los objetos. Esta clasificación se compone de 14 tipos taxonómicos, de los cuales 12 son nuevos (denominados $A, B, D, E, F, G, M, P, Q, R, T, V$) que se sumaban a los anteriores C y S .

Uno de los resultados más importantes que se obtuvo con la taxonomía de Tholen fue la dependencia del tipo taxonómico en función de la distancia heliocéntrica del objeto. En la parte interna del cinturón se encuentra una mayoría de objetos de tipo S , en el cinturón medio el tipo C es el más abundante; mientras que en el exterior prevalecen los de tipo P ; salvo en la región de troyanos donde se observa que la mayoría de los objetos son tipo D (DeMeo y Carry, 2014). Estas diferencias en los tipos taxonómicos no son terminantes, de hecho existen solapamientos y puede observarse variedad de tipos en una misma región del cinturón (Gradie y Tedesco, 1982). Cabe destacar que (Mothé-Diniz et al., 2003) manifiesta algunas diferencias respecto del trabajo de (Gradie y Tedesco, 1982), la más remarcable es que encuentran que los asteroides tipo S se distribuyen de manera casi homogénea a lo largo de todo el cinturón hasta 2,96 ua. La tabla 1.1 resume las principales características de cada tipo taxonómico de Tholen.

Tabla 1.1: Descripción de las clases taxonómicas de Tholen

Tipo espectral	Descripción	Ejemplo de tipo espectral
<i>Clases de albedo bajo:</i>		
C	Asteroides carbonosos. Dominantes en el cinturón después de 2,7 <i>ua</i> . Presentan una banda de absorción característica cercana a 0,4 μm . Su espectro es plano y levemente enrojecido en longitudes de onda superiores a 0,4 μm . Es el tipo taxonómico que más abunda. Sus albedos oscilan entre 0,03 y 0,1. Subclases: B, F y G.	(10) <i>Hygiea</i> , (24) <i>Themis</i> , (253) <i>Mathilde</i>
D	Espectro rojo sin marcas distintivas, posiblemente debido a material orgánico. Abundan en el borde externo del cinturón de asteroides y Troyanos. Posiblemente con contenido de agua de acuerdo a la banda de absorción en 3 μm detectada en la mayoría de objetos de este tipo.	(279) <i>Thule</i> , (624) <i>Hektor</i> , (2311) <i>El Leoncito</i>
P	Espectro plano o levemente enrojecido cuya forma semeja la de los asteroides tipo M. De los objetos más oscuros del cinturón y ricos en material orgánico. Abundan en la región externa del cinturón, sobre todo en la región de los Cybele e Hilda.	(46) <i>Hestia</i> , (65) <i>Cybele</i> , (153) <i>Hilda</i>

Tabla 1.1 – continuación de la pagina anterior

Tipo	Descripción	Ejemplo de tipo espectral
K	Tipo poco común. Espectro similar a los tipo-S pero sin rasgos característicos. No muestra absorción en $2\ \mu m$.	(42) <i>Isis</i> , (131) <i>Vala</i> , (221) <i>Eos</i>
T	Bandas de absorción moderadas próximas a $0,85\ \mu m$, espectro plano en longitudes de onda largas. Raros, sin análogos meteoríticos, por lo que se desconoce se composición con precisión, posiblemente tipo C muy alterado.	(96) <i>Aegle</i> , (308) <i>Polyxo</i> , (596) <i>Scheila</i>
<i>Clases de albedo medio:</i>		
S	Asteroides rocosos. Clase prevalente en el cinturón interno y medio, raramente se encuentran en la región externa. Banda característica de absorción cercana a $0,7\ \mu m$. Leves bandas de absorción próximas a 1 y $2\ \mu m$. Albedos cercanos a $0,2$	(7) <i>Iris</i> , (15) <i>Eunomia</i> , (17) <i>Thetis</i>
M	Asteroides de roca y hierro o sólo hierro; espectro sin rasgos característicos, plano o levemente enrojecido. Se piensa que pueden ser fragmentos del núcleo metálico de un objeto diferenciado fragmentado por un impacto.	(16) <i>Psyche</i> , (21) <i>Lutetia</i> , (216) <i>Kleopatra</i>

Tabla 1.1 – continuación de la pagina anterior

Tipo espectral	Descripción	Ejemplo de tipo espectral
Q	Presentan bandas de absorción antes y después de $0,7 \mu m$. Son más comunes en la parte interna del cinturón. Espectro intermedio entre tipos V y S	(1862) <i>Apollo</i> , (2102) <i>Tantalus</i> , (3753) <i>Cruithne</i>
A	Son muy pocos los objetos de este tipo. Se encuentran en la parte interna del cinturón. Espectro muy enrojecido antes de $0,7 \mu m$. Fuerte banda de absorción cerca de $1 \mu m$, lo que indica presencia de olivinos.	(246) <i>Asporina</i> , (289) <i>Nenetta</i> , (446) <i>Aeternitas</i>
V	Denominados así por (4) Vesta, de hecho gran cantidad de estos objetos serían fragmentos de este asteroide. Fuerte banda de absorción antes de $0,7 \mu m$ y cerca de $0,1 \mu m$. Similar a las acondritas basálticas. Se han observado algunos NEOs de este tipo taxonómico.	(4) <i>Vesta</i> , (809) <i>Lundia</i> , (956) <i>Elisa</i>
R	Espectro intermedio entre las clases A y V. Similar al de las acondritas ricas en olivinos y piroxenos. Se encuentran en el cinturón interno	(246) <i>Asporina</i> , (349) <i>Dembowska</i> , (571) <i>Dulcinea</i>

Clase de albedo alto:

Tabla 1.1 – continuación de la pagina anterior

Tipo	Descripción	Ejemplo de
espectral		tipo espectral
E	Asteroides de enstatita. Concentrados en el borde interno del cinturón, sobre todo en la región de los Hugaria. Espectro sin rasgos distintivos, plano y levemente enrojecido. Albedos mayores a 0,3	(44) <i>Nysa</i> , (434) <i>Hungaria</i> , (2867) <i>Steins</i>

La clasificación taxonómica de Tholen fue ampliamente aceptada y la más utilizada por la comunidad científica hasta la llegada del *Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey* (SMASS por sus siglas en inglés). Este relevamiento empezó en 1991 (Xu et al., 1995) y tuvo una segunda fase (SMASS II) finalizada en 2002 (Bus y Binzel, 2002b). Generó una muestra con observaciones espectroscópicas de 1447 asteroides. La magnitud de la muestra y el nivel de precisión e información que ofrecían los datos espectroscópicos obligó al desarrollo de un nuevo sistema de clasificación taxonómica ya que la anterior clasificación de Tholen se había desarrollado a partir de observaciones fotométricas en ocho bandas. La clasificación que derivó de SMASS II fue desarrollada por Schelte Bus y Richard Binzel (Bus y Binzel, 2002a). En un primer momento se intentó combinar los datos del SMASS II con los de la clasificación de Tholen para obtener un sistema taxonómico en común pero esto resultó bastante inconveniente ya que los rangos espectrales eran distintos, y por supuesto porque la espectroscopía ofrece información de la cual la clasificación de Tholen carece. Por ejemplo, el SMASS II detectó en el asteroide (64) Angelina una banda de absorción en $0,49 \mu m$ que se encuentra justo entre dos bandas del ECAS, la banda *b* ($0,44 \mu m$) y la banda *v* ($0,55 \mu m$) lo que la hace indetectable para este último relevamiento.

La taxonomía de Bus y Binzel conservó algunos tipos taxonómicos pero agregó muchos otros. Está basada en tres grandes grupos (los complejos S, C y X) que adhieren a la clasificación clásica pero agrega muchos otros de tal manera que la clasificación queda compuesta por 26 tipos en total: A, B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch, D, K, L, Ld, O, Q, R, S, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr, T, V, X, Xc, Xe, Xk. Aquellos con más de una letra hacen referencia a alguna característica espectral en particular. Por ejemplo, los miembros de las clases Cgh y Ch tienen espectros con bandas en $0,7 \mu m$, característica atribuida a la hidratación de minerales.

Más recientemente, aprovechando la creciente colección de información espectral en la región infrarroja, DeMeo et al. (2009) extiende la clasificación de Bus y Binzel considerando el rango espectral entre $0,45$ y $2,45 \mu m$. Agregar el rango infrarrojo aporta mucha información al análisis taxonómico de los objetos del Sistema Solar debido a que muchas bandas de absorción de minerales se encuentran en este rango de longitudes de onda. De hecho, muchas bandas en la región entre 1 y $2 \mu m$ se deben a la presencia de olivinos y piroxenos (DeMeo et al., 2009). Esta nueva taxonomía consta de 24 tipos taxonómicos, que son los mismos de la taxonomía de Bus y Binzel, salvo tres clases eliminadas (Sl, Sk, Ld) y una creada (Sv).

A lo largo del tiempo hubo otros sistemas de clasificación propuestos pero no han tenido mayor relevancia. Por ejemplo, Barucci et al. (1987) en un intento de extender la taxonomía de Tholen combina los datos del ECAS con albedos del *Infrared Astronomical Satellite* (IRAS por sus siglas en inglés). Por otro lado, Howell (1995) combina información del *52-color asteroid survey* (Bell et al., 1988) con los datos del ECAS y usa una red neuronal para identificar los límites naturales entre grupos espectrales. Todos estos intentos de reclasificación resultaron coincidir con la estructura general de la clasificación de Tholen, lo que confirmaba la robustez de ese sistema.

1.2. Cometas

Cuando hablamos de cometas, nos referimos a una heterogénea población de objetos que provienen de distintas regiones del Sistema Solar y presentan órbitas con una gran dispersión en sus elementos orbitales osculadores, con objetos en órbitas de alta excentricidad e incluso casos con órbitas retrógradas. Lo que tienen en común todos los cometas es el alto contenido de hielos en su composición y la aparición de procesos de sublimación cuando se acercan al Sistema Solar interior.

Los núcleos cometarios tienen dimensiones típicas entre 1 km y 10 km (Lamy et al., 2004). Los materiales que componen los núcleos cometarios son posiblemente primordiales y no habrían sufrido alteraciones significativas desde su formación. Es esta característica la que ha motivado a los investigadores a estudiar a estos objetos con la convicción de que pueden proveer información sobre las condiciones físicas y químicas de los procesos de formación y evolución del Sistema Solar (Fernandez, 1980; Bailey, 1983; Duncan et al., 1987; Weaver, 1988; Yamamoto y Kozasa, 1988; Marochnik et al., 1988).

Lo que siempre caracterizó a los cometas y que marca una clara diferencia respecto a los asteroides (ya que ambos grupos de objetos son catalogados como *cuerpos menores del Sistema Solar*) es la coma y/o cola que estos desarrollan como consecuencia del proceso de sublimación que sufren a medida que se acercan al Sistema Solar interior. A pesar de los estudios “in-situ” realizados por sondas espaciales, los mecanismos físicos involucrados en el desarrollo de la actividad en los cometas (sublimación de hielos, flujos de gases y eyecciones de material desde el núcleo, los procesos de disociación e ionización en el gas y la interacción con el viento solar, por mencionar algunos) siguen sin ser del todo comprendidos.

1.2.1. Clases dinámicas

Históricamente, y a grandes rasgos, los cometas han sido clasificados en dos grupos de acuerdo a sus periodos orbitales. Los cometas de *largo periodo*, son aquellos con periodos mayores a 200 años y los cometas de *corto periodo* los que poseen periodos menores a 200 años, abreviados LPC y SPC respectivamente por sus siglas en inglés. El periodo de 200 años como delimitador de ambos grupos surge del hecho de que los observadores al detectar un cometa podían verificar si era un cometa nuevo o si ya había sido observado con anterioridad, ya que la determinación de órbitas de manera relativamente precisa se lleva a cabo desde hace algo más de dos siglos. De esto se desprende que esta clasificación no responde a cuestiones físicas o dinámicas, si no más bien históricas.

Cometas de largo periodo

Los LPC pueden ser a su vez *cometas dinámicamente nuevos* si los objetos están ingresando a la región planetaria por primera vez, o *cometas que regresan* (“returnings comets” en inglés) si en algún momento de su vida dinámica ya han ingresado a la región planetaria. Esta división está basada en la distribución de la energía orbital de las órbitas de los LPC. La figura 1.2 muestra un histograma de $1/a$, que es proporcional a la energía orbital y que representa la energía con la que el cometa está ligado al Sol. Allí puede observarse un claro pico en $1/a \sim 0,00005 \text{ ua}^{-1}$, que corresponde a $\sim 20.000 \text{ ua}$. Fue esto lo que llevó a Oort (1950) a proponer la existencia de una “nube” esférica y simétrica de cometas a unas 20.000 ua del Sol que rodea al Sistema Solar, hoy conocida como *Nube de Oort*. Como se ve en la figura 1.2, además de los cometas que se encuentran en el pico de $1/a = 0,00005 \text{ ua}^{-1}$ hay muchos otros cometas con semiejes mayores de menor valor, es decir que están ligados con mayor fuerza al Sistema Solar. Muy probablemente estos cometas han tenido al menos un pasaje por la región planetaria y allí fueron capturados.

Los cometas con $a \ll 20.000 \text{ ua}$ que penetran la región planetaria probablemente

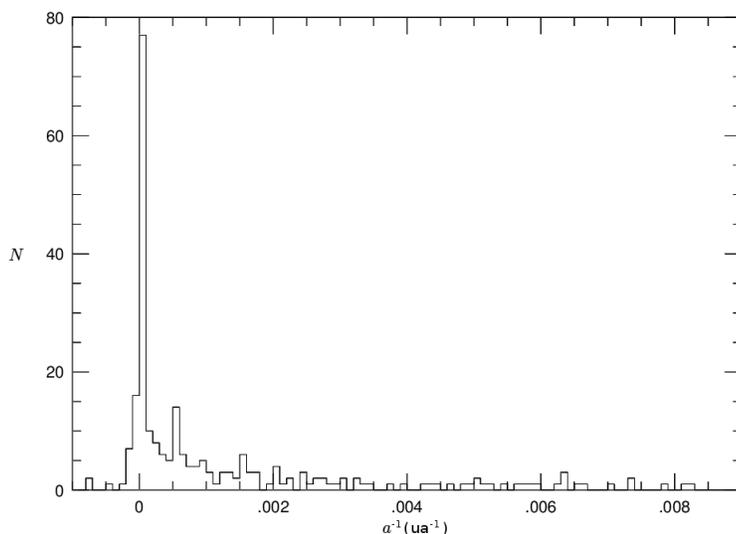


Figura 1.2: Distribución de la inversa del semieje mayor ($1/a$) para cometas quasi-isotrópicos. Adaptado de Marsden y Williams (1992).

sean expulsados del Sistema Solar a una tasa mayor de la que podrían ser repuestos desde la Nube de Oort (Weissman, 1979; Duncan et al., 1987; Hills, 1981a), por lo tanto sería improbable ver un cometa *dinámicamente nuevo* con semieje mayor menor a este valor. Es por eso que se deduce que los cometas que no se encuentran en el pico de la distribución son cometas que probablemente estuvieron en el pico y redujeron el valor de su semieje a en sus pasajes por la region planetaria y de ahí la denominación de *cometas que regresan*.

Cometas de corto periodo

Los cometas de corto periodo ($P < 200$ años) pueden a su vez dividirse en dos grupos: los cometas de la familia de Júpiter (JFC por sus siglas en inglés) con periodos menores a 20 años, y los cometas tipo Halley con periodos mayores a 20 años (HTC por sus siglas en inglés). La dinámica de los primeros está fuertemente dominada por Júpiter

(de allí su denominación) y poseen órbitas que en general tienen semiejes mayores entre 3 ua y 4 ua, y afelios cercanos a la órbita de Júpiter con una inclinación media de 10° (Levison, 1996), lo que indica que el plano de sus órbitas no se aleja mucho del plano de la eclíptica. Por otro lado, los cometas tipo Halley tienen una distribución de inclinaciones más heterogénea, con una media de 41° , e incluso algunos tienen órbitas retrógradas (Levison, 1996).

Si bien los JFC y los HTC se encuentran ambos agrupados en el grupo de los SPC, lo cierto es que tienen poco en común y muy probablemente tengan orígenes distintos. Esto llevó a algunos investigadores a buscar una clasificación basada en propiedades dinámicas más rigurosas; por ejemplo los sistemas propuestos por Levison (1996) y Tancredi (2014) consideran entre otros indicadores dinámicos, el *parámetro de Tisserand respecto de Júpiter*, T_J .

El parámetro de Tisserand

El *parámetro de Tisserand* respecto de Júpiter, T_J , es un parámetro derivado del problema restringido de los tres cuerpos (en este caso el Sol, Júpiter y el cuerpo menor en cuestión) que está definido de la siguiente manera:

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[(1 - e^2) \frac{a}{a_J} \right]^{1/2} \cos(i) \quad (1.1)$$

donde a_J es el semieje mayor de la órbita de Júpiter y a , e e i son el semieje mayor, excentricidad e inclinación de la órbita del cuerpo menor, respectivamente. T_J es un valor que expresa de alguna manera la velocidad relativa de un objeto respecto a Júpiter durante un encuentro cercano ya que $v_{rel} \sim v_J(3 - T_J)^{1/2}$, donde v_{rel} y v_J son la velocidad relativa y la velocidad de Júpiter, respectivamente. Por lo tanto un objeto con $T_J > 3$ no podrá cruzar la órbita de Júpiter y su órbita estará confinada interior o exteriormente a la de Júpiter (ejemplos de esto son los asteroides del cinturón principal y los Centauros respectivamente). Cabe destacar que T_J permanece constante para el

problema restringido de los tres cuerpos; pero, en el caso del Sistema Solar esto no es así debido a que la órbita de Júpiter no es circular ni se encuentra en el plano eclíptico, y a que la influencia gravitatoria de los demás planetas no es para nada despreciable. De cualquier manera T_J sigue siendo un indicador útil para clasificar dinámicamente a los cuerpos menores en el Sistema Solar.

Como se mencionó previamente, Levison (1996) propone un sistema de clasificación teniendo en cuenta en primer lugar el parámetro T_J y luego los valores de semieje mayor a . Usando estos parámetros, en este esquema de clasificación los cometas de un mismo grupo dinámico deberían tener un origen común. A continuación se describen brevemente los grupos dinámicos propuestos en esta clasificación.

Cometas quasi-isotrópicos

En esta clasificación los cometas con $T_J < 2$, es decir, los que en su mayoría provienen de la Nube de Oort se denominan quasi-isotrópicos en referencia a la distribución de sus inclinaciones. Estos a su vez se dividen al igual que los LPC en *nuevos* ($a > 10.000$ ua) y *returning* ($a < 10.000$ ua). Los primeros tienen la misma definición que en el esquema anterior, mientras que los *returning* se dividen en *externos* ($a > 40$ ua) y en *tipo-Halley* ($a < 40$ ua). Esta clasificación agrupa a todos los cometas con un posible origen común, asumiendo que los HTC provienen también de la Nube de Oort. Sin embargo esto último ha sido estudiado por varios autores (Fernández et al., 2016; Nesvorný et al., 2017) y el origen de los HTC no se conoce con precisión.

Cometas eclípticos

Por otro lado, aquellos cometas con $T_J > 2$ se denominan *eclípticos* en referencia a que sus órbitas tienen en general bajas inclinaciones. Estos cometas están a su vez dividido en tres grupos de acuerdo a sus valores de T_J y semieje mayor. Los JFC, con $2 < T_J < 3$, son aquellos cuerpos cuyas órbitas cruzan la de Júpiter y cuya dinámica es dominada

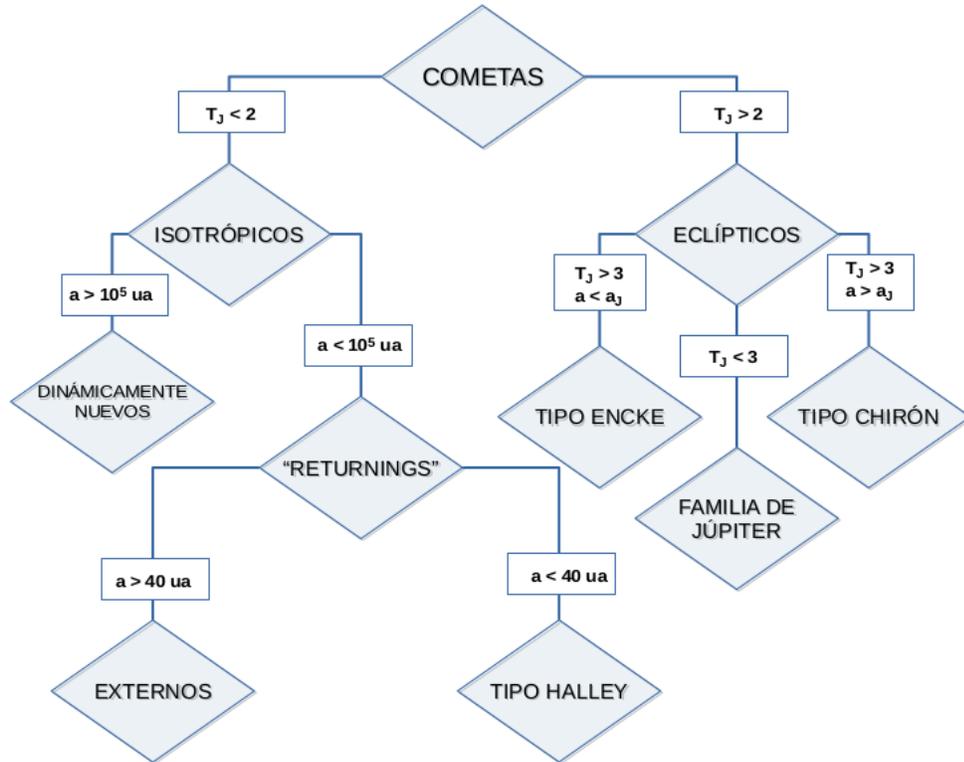


Figura 1.3: Clasificación dinámica de cometas de acuerdo a Levison (1996). Adaptado de Levison (1996).

por este planeta. Los cometas tipo Encke, con $T_J > 3$ y $a < a_J$, tienen órbitas interiores a Júpiter (no cruzan su órbita). Y aquellos con $T_J > 3$ y $a > a_J$ se denominan cometas tipo-Chiron y tienen órbitas externas a la de Júpiter y son comúnmente denominados como Centauros. Nuevamente, esta definición supone un origen común, en este caso la región transneptuniana, para los cometas eclípticos. En la figura 1.3 se muestra un esquema con la descripción completa de la clasificación.

1.2.2. Reservorios de cometas

Siendo tan diversas las características de las órbitas de los cometas observados tanto en su forma (a, e) como en posición y ubicación (i, Ω, ω) se hace natural la suposición de que no todos ellos provengan de la misma región. De acuerdo a Weissman (1979) los LPC tienen un tiempo de vida dinámico de 6×10^5 años, mientras que para los SPC, Levison y Duncan (1994) calcula un valor de 5×10^5 años. Esto implica que los cometas que observamos hoy han permanecido en reservorios lejos de la región planetaria por mucho tiempo antes de ingresar a ella.

La nube de Oort

Como se indicó previamente, la Nube de Oort fue propuesta en 1950 por Jan Oort (Oort, 1950). Hoy se piensa como una nube centrada en el Sol, de forma aproximadamente esférica con radio de $\approx 1 - 2 \times 10^5$ ua (Smoluchowski y Torbett, 1984), con un núcleo denso de objetos con semiejes mayores $\sim 1 \times 10^3$ ua (si se asume que el Sistema Solar se formó en un cúmulo denso de estrellas) y con una densidad de objetos cayendo a medida que aumenta la distancia heliocéntrica (Fernández y Brunini, 2000).

De acuerdo a Fernández (2005) en la nube de Oort podemos definir tres regiones principales (ver figura 1.4). Un núcleo interno donde los objetos no son perturbados por fuentes externas, una nube interna, y una nube externa con un límite entre estas últimas en $a \sim 10^4$ ua y cuya principal diferencia es que un cometa de la nube interna difícilmente logre alcanzar directamente la región interna del Sistema Solar, mientras que uno de la nube externa posee energía suficiente para hacerlo. Si bien no hay un límite marcado para definir donde termina la nube de Oort, se puede considerar una distancia heliocéntrica de $a \sim 10^5$ ua como valor donde termina la nube externa.

El número de cometas en la Nube de Oort ha sido calculado en 10^{12} objetos por Weissman (1996), pero más recientemente Francis (2005) recalcula el número de objetos

utilizando datos del survey *LINEAR* para estimar el flujo de cometas que ingresa a la región planetaria y obtiene un valor de 2×10^{11} , mientras que Emel'Yanenko et al. (2007) llega a un valor de $1,4 \times 10^{11}$ objetos.

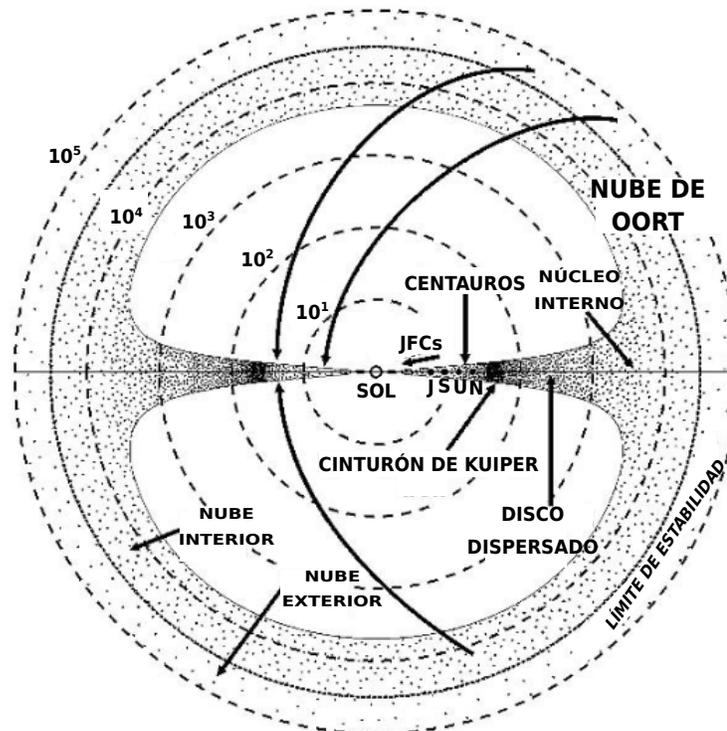


Figura 1.4: Estructura de la nube de Oort y sus diferentes regiones. En la imagen también está representado el cinturón transneptuniano y los planetas gigantes (J, S, U, N). Las flechas indican las rutas principales por las que los objetos de la nube de Oort llegan a la región planetaria. Los números representan distancias heliocéntricas en ua. Adaptado de Fernández (2005)

Para que los objetos de la Nube de Oort ingresen a la región interna del Sistema Solar es necesaria algún tipo de perturbación siendo los posibles perturbadores el disco

galáctico (Bailey, 1986), las estrellas que pasan cerca del Sol (Hills, 1981b), o incluso nubes moleculares (Weissman, 1990).

El cinturón trans-neptuniano

Como ya se mencionó con anterioridad, a diferencia de los cometas quasi-isotrópicos, el grupo de cometas eclípticos tienen una distribución de inclinaciones baja. Esto resultaba un fuerte indicio de que la fuente de estos objetos debía ser distinta a la nube de Oort y residir próxima al plano eclíptico. Si bien Edgeworth (1949) y Kuiper (1951) postularon la existencia de un disco más allá de la órbita de Neptuno, fue Fernandez (1980) quien demostró su existencia estudiando el flujo de cometas. Duncan et al. (1988) fueron los primeros en integrar las órbitas de objetos más allá de la región planetaria hasta que estos fueran eyectados del Sistema Solar o hasta que se volvieran visibles. Este trabajo incluía objetos tanto del cinturón trans-neptuniano como de la nube de Oort, observándose claramente que la fuente de los cometas eclípticos no podía ser la nube de Oort. Más adelante, Quinn et al. (1990) realizan más simulaciones y demuestran que la distribución de inclinaciones de los JFC no puede ser explicada si se asume un origen de esa población en la nube de Oort. De manera que la existencia de una estructura en forma de disco más allá de Neptuno se hacía cada vez más evidente. La confirmación observacional de la existencia del cinturón trans-neptuniano fue la detección de 1992 QB_1 (Jewitt y Luu, 1993), que fue el primer objeto observado más allá de la órbita de Neptuno, además de Plutón y Caronte.

A medida que se fueron encontrando más y más objetos en la región transneptuniana, se fueron identificando distintos comportamientos dinámicos. Esto permitió caracterizar distintas poblaciones en la región. Si bien algunos criterios y límites pueden variar, en general hoy en la región transneptuniana se pueden identificar las siguientes clases dinámicas:

- Objetos del cinturón clásico, aquellos con $42 \text{ ua} < a < 48 \text{ ua}$ y $e < 0,2$. Y no se

encuentran en resonancia de movimientos medios con Neptuno.

- Objetos del disco dispersado, aquellos con $30 \text{ ua} < q < 39 \text{ ua}$ y $e > 0,2$.
- Objetos del disco dispersado extendido, aquellos con $q > 39 \text{ ua}$ y $a > 50 \text{ ua}$.
- Objetos resonantes, aquellos que se encuentran en resonancia de movimientos medios con Neptuno. Donde la resonancia 3:2 es la más poblada, los objetos que ocupan esta resonancia son denominados plutinos.

De estas poblaciones de objetos, la del disco dispersado representa la mayor fuente de JFCs (Di Sisto y Brunini, 2007). Esto no quiere decir que objetos de otras poblaciones de la región transneptuniana pueden evolucionar también a JFCs, de hecho di Sisto et al. (2010) demuestran que los plutinos representan una fuente secundaria de JFCs.

Los valores inicialmente estimados para el número de objetos en el cinturón eran de $\sim 4,7 \times 10^4$ objetos con diámetros mayores a 100 km (Trujillo et al., 2001), pero más recientemente se estimó que habría $\sim 10^5$ objetos con diámetros mayores a 100 km (Brunini, 2002) y $\sim 10^5$ objetos con diámetros mayores a 50 km (Morbidelli et al., 2003).

Centauros

Si bien los Centauros son una población de objetos más que una región del Sistema Solar se incluyen en esta sección ya que ocupan la zona intermedia entre la región transneptuniana y la de los JFCs. Más allá de que existen varias definiciones para esta población, a grandes rasgos podemos decir que los Centauros son objetos que se mueven entre las órbitas de Júpiter y de Neptuno y componen una población dinámica transitoria entre los objetos de la región transneptuniana y los JFCs (Levison y Duncan, 1997). Las causas por las cuales los objetos se ven eyectados de la región transneptuniana para convertirse en Centauros son múltiples, pero las principales podrían ser inestabilidades

dinámicas (Morbidelli, 1997) o colisiones mutuas (Ip y Fernandez, 1997). Una de las definiciones más utilizadas es la de Jewitt (2009), que define a un objeto Centauro como aquellos objetos con distancia perihélica q y semieje mayor a que satisfacen $a_J < q < a_N$ y $a_J < a < a_N$, donde a_J y a_N son los semiejes mayores de Júpiter y de Neptuno, respectivamente. El tiempo de vida dinámico de los Centauros con semiejes mayores en el rango de $a_J < a < a_N$ es de 72 millones de años (Di Sisto y Brunini, 2007), aunque una vez que se aproximan a Saturno su evolución dinámica se acelera. Para una muestra de objetos con valores de q entre Júpiter y Urano, Tiscareno y Malhotra (2003) encuentra una vida dinámica media de 9 millones de años.

Gran cantidad de Centauros han sido detectados activos (Mazzotta Epifani et al., 2014b; Wierzechos et al., 2017; Fernández et al., 2018). De acuerdo a Jewitt (2009) alrededor del 13% de los Centauros han sido observados activos y también destaca que los Centauros activos tienen estadísticamente distancias perihélicas menores que aquellos inactivos. Este resultado sugiere que todos los Centauros podrían contener volátiles en su composición, pero sólo logran energía suficiente para sublimarlos los que más se acercan al Sol.

1.2.3. Física de cometas

Núcleo

Los núcleos cometarios recién han podido ser estudiados en detalle con la llegada de sondas espaciales a algunos cometas, desde las visitas de las sondas *Giotto* (Reinhard, 1986) y *Vega* (Sagdeev et al., 1986) al cometa 1P/Halley, hasta *Rosetta* y su encuentro con el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (Schulz, 2009). También se han conseguido importantes datos acerca de los núcleos cometarios con el uso de grandes telescopios capaces de observarlos cuando estos se alejan del Sol y tienen baja o nula actividad (Kokotanekova et al., 2017). De esta manera se evita que el polvo de la coma impida

observar el núcleo.

Los núcleos cometarios están compuestos tanto por materiales refractarios (Joswiak et al., 2017), como por hielos (Gicquel et al., 2016; Fornasier et al., 2016). Si bien el hielo de H_2O es el componente más abundante, se han observado también otros tipos de hielos como CO , CO_2 , CH_4 . En el caso del hielo de agua, el proceso de sublimación se vuelve importante dentro de las ~ 3 ua (Biver et al., 2002), pero se han observado cometas activos a distancia mucho mayores (Mazzotta Epifani et al., 2014a; Jewitt et al., 2017), lo cual es un indicador de que algunos núcleos contienen efectivamente hielos mucho más volátiles en su composición. De todos modos, la actividad a grandes distancias heliocéntricas a las cuales es imposible que el hielo de H_2O se sublime podría ser también un indicador de la existencia de hielo amorfo² en los núcleos de cometas, lo que resulta muy probable ya que se han formado en un entorno de muy bajas temperaturas y por ende sin la energía suficiente como para formar una estructura cristalina (Smoluchowski, 1981; Marboeuf et al., 2012).

Para entender como funciona el proceso de sublimación de manera simple podemos asumir al núcleo como un cuerpo esférico cubierto en su superficie por material volátil y plantear la ecuación de equilibrio radiativo:

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi r^2}(1 - A) = \chi[\epsilon\sigma T^4 + L(T)f_s(T)], \quad (1.2)$$

donde L_{\odot} es la luminosidad solar en W , r es la distancia heliocéntrica en metros, A es el albedo de Bond, ϵ es la emisividad del núcleo, σ es la constante de Stefan - Boltzmann en unidades de $Wm^{-2}K^{-4}$ y $L(T)$ es calor latente de sublimación del hielo en unidades de Jkg^{-1} a una temperatura T en grados Kelvin y f_s es la tasa de sublimación en unidades de $kgm^{-2}s^{-1}$. El parámetro adimensional χ representa la manera en que la energía

²El hielo amorfo hace referencia al estado sólido en el que las moléculas carecen de una estructura ordenada, a diferencia del sólido cristalino en el que las partículas que lo conforman están dispuestas de manera regular y ordenada formando redes cristalinas.

térmica se deposita sobre la superficie. Para analizar la ecuación podemos considerar dos casos límites: $\chi = 1$ que corresponde al punto subsolar y representa el valor más alto de temperatura en un núcleo que no rota, y $\chi = 4$ para un una esfera isoterma. De esta manera $\epsilon\sigma T^4$ representa la energía re-emitida por el núcleo y $L(T)f_s(T)$ la energía utilizada para sublimar los volátiles, mientras que la energía transmitida hacia el interior del núcleo es despreciada. Para resolver esta ecuación podemos asumir valores típicos para cometas (como por ejemplo $A = 0,04$) y parámetros termodinámicos de los volátiles más comunes observados en núcleos cometarios, como H_2O , CO_2 , CO (Brown y Ziegler, 1980). La figura 1.5 muestra un gráfico de tasa de sublimación en función de la distancia heliocéntrica para estos tres hielos anteriormente mencionados para los casos “caliente”, donde $\chi = 1$ marcado con una C en la figura, y “frío” (F) donde $\chi = 4$. Es evidente que la actividad observada a grandes distancias heliocéntricas no puede explicarse por la sublimación de H_2O .

Si bien los núcleos están compuestos en gran parte por hielos, no es fácil su detección ya que en muchos casos su superficie está cubierta por un manto de polvo (Rickman et al., 1990). Cuando el hielo se sublima y escapa del núcleo en forma de gas arrastra una gran cantidad de polvo, parte del cual al poco tiempo se deposita nuevamente en el núcleo formando este manto que lo cubre (Jewitt, 2015). Incluso la actividad por sublimación no se produce uniformemente sobre toda la superficie del núcleo sino que generalmente lo que se observa son zonas activas aisladas que expulsan gas formando estructuras en forma de *jets* (García-Migani y Gil-Hutton, 2015).

Con respecto al color de los núcleos cometarios, la cantidad de datos existentes no permite sacar conclusiones categóricas. De hecho sólo hay mediciones de color que pueden ser consideradas como estadísticamente significativas para JFCs. Los núcleos de los JFCs son en promedio levemente más rojos que el Sol, y menos rojos que los objetos de la región transneptuniana. De hecho el núcleo más rojo medido, el del cometa 143P/Kowal-Mrkos tiene un valor de $(V - R) = 0,58$ (Jewitt et al., 2003), menos rojo que

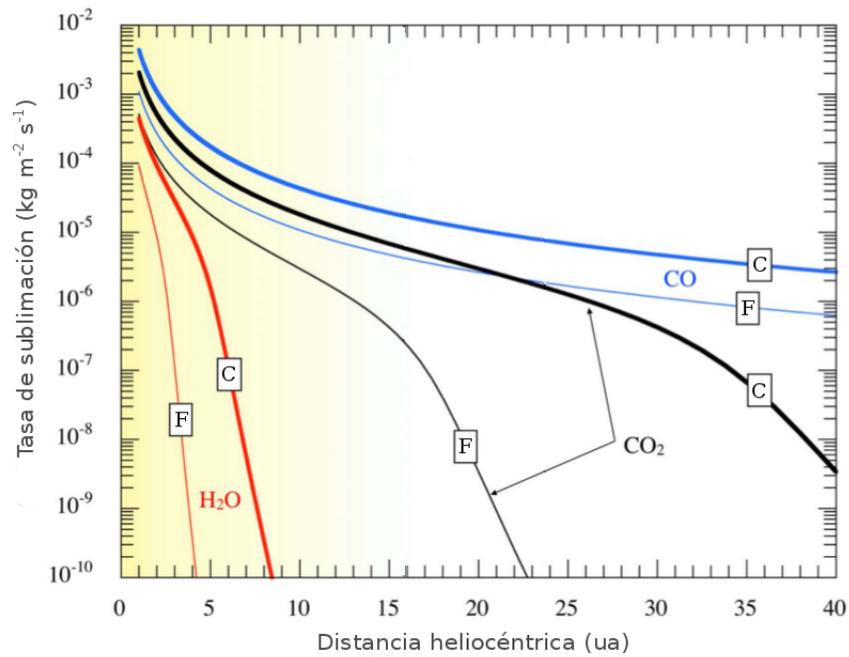


Figura 1.5: Tasa de sublimación en función de la distancia heliocéntrica para hielos de H_2O , CO_2 y CO . Estos valores se desprenden de resolver la ecuación de equilibrio radiativo. Las curvas con la marca F hacen referencia al caso “frio” mientras que la marca C al caso “caliente” (ver ecuación 1.2). Adaptado de Jewitt et al. (2017)

el promedio de los KBOs ($(V - R) = 0,61$) (Jewitt, 2002). Los colores de los Centauros poseen una característica muy notoria, ya es que las observaciones muestran un grupo con colores altamente enrojecidos y otro grupo más bien neutro. Esta bimodalidad en los colores de los Centauros (Peixinho et al., 2004) no se observa tan claramente en otras poblaciones. Una explicación a esto es propuesta por Melita y Licandro (2012), que encuentra que el grupo de objetos más rojos tiende a penetrar más en la región interna del Sistema Solar y viceversa, indicando que la evolución dinámica de estos cuerpos puede estar afectando sus características superficiales.

Para la gran mayoría de los cometas los albedos de sus núcleos no han sido determinados pero en general se los asume como bajos, con valores típicos cercanos a $p_v \sim 0,04$. Fitzsimmons et al. (1994); Dahlgren et al. (1997, 1999); Jewitt (2002) y Gil-Hutton y Brunini (2008) destacan las similitudes entre las características superficiales de estos objetos y las de los asteroides de bajo albedo, esto es, los clasificados taxonómicamente como de *tipo-P* y *D* (ver tabla 1.1) que son característicos de las zonas externas del cinturón de asteroides.

Coma y cola

La coma de un cometa está formada por el gas y el polvo que son expulsados desde el núcleo. El proceso por el cual se crea la coma se debe a que la sublimación de los hielos produce eyecciones de gas el cual es expulsado del núcleo a gran velocidad arrastrando al polvo depositado en la superficie. Al alejarse del núcleo el polvo comienza a desacoplarse del gas y su movimiento alrededor del núcleo dependerá de una variedad de factores como el tamaño de las partículas, su densidad, forma y estado de rotación (Fulle, 2004). Las partículas que se alejan más comienzan a interactuar fuertemente con el viento solar y sus trayectorias pueden ser modificadas por un efecto de presión de radiación que le da forma a las denominadas colas cometarias.

La mayoría de las veces que observamos un cometa activo desde Tierra lo que en

realidad estamos viendo es su coma y no su núcleo. Este último queda oculto detrás del halo de polvo que se genera a su alrededor. Por lo tanto los estudios sobre la composición de los cometas usualmente están referidos a mediciones realizadas sobre la coma y no sobre el núcleo. Para un gas que se expande radialmente a velocidad constante, la densidad cae como d^{-2} , siendo d en este caso la distancia al centro de la expansión. Considerando un núcleo cometario como centro a partir del cual se expande el gas y si no aparecen eyecciones abruptas de material, el resultado sería una coma esférica y en estado estable (Combi et al., 2004). El brillo de esta coma es proporcional a una integral a lo largo de la línea de la visual a través de ella, de manera que caería como d^{-1} .

Las moléculas de gas que forman parte del material eyectado desde el núcleo del cometa pueden sufrir cambios una vez que comienza su interacción con el viento solar, por lo que las moléculas que efectivamente se observan en la coma son el producto de procesos de creación y de destrucción de diversas especies moleculares. De todas maneras, a partir de las moléculas “hijas” observadas se pueden inferir de qué especies moleculares fueron creadas. Un ejemplo muy común es el del *radical OH*, que se ha observado en gran cantidad de comas cometarias (Bockelée-Morvan et al., 2000; Wang et al., 2017) y es producto de la disociación de la molécula de H_2O por la interacción con fotones solares (A’Hearn et al., 2015).

Las observaciones en las longitudes de onda infrarrojas y de radio han dado mucha información sobre la composición de volátiles en las comas cometarias. A diferencia del polvo, los hielos son más sensitivos a cambios inducidos por procesos térmicos y por radiación, por lo que el estudio de sus propiedades y abundancias es realmente clave para entender los procesos de formación y evolución. En la figura 1.6 se puede observar un listado de los volátiles principales que se han detectado en cometas en relación a la abundancia del H_2O (Mumma y Charnley, 2011).

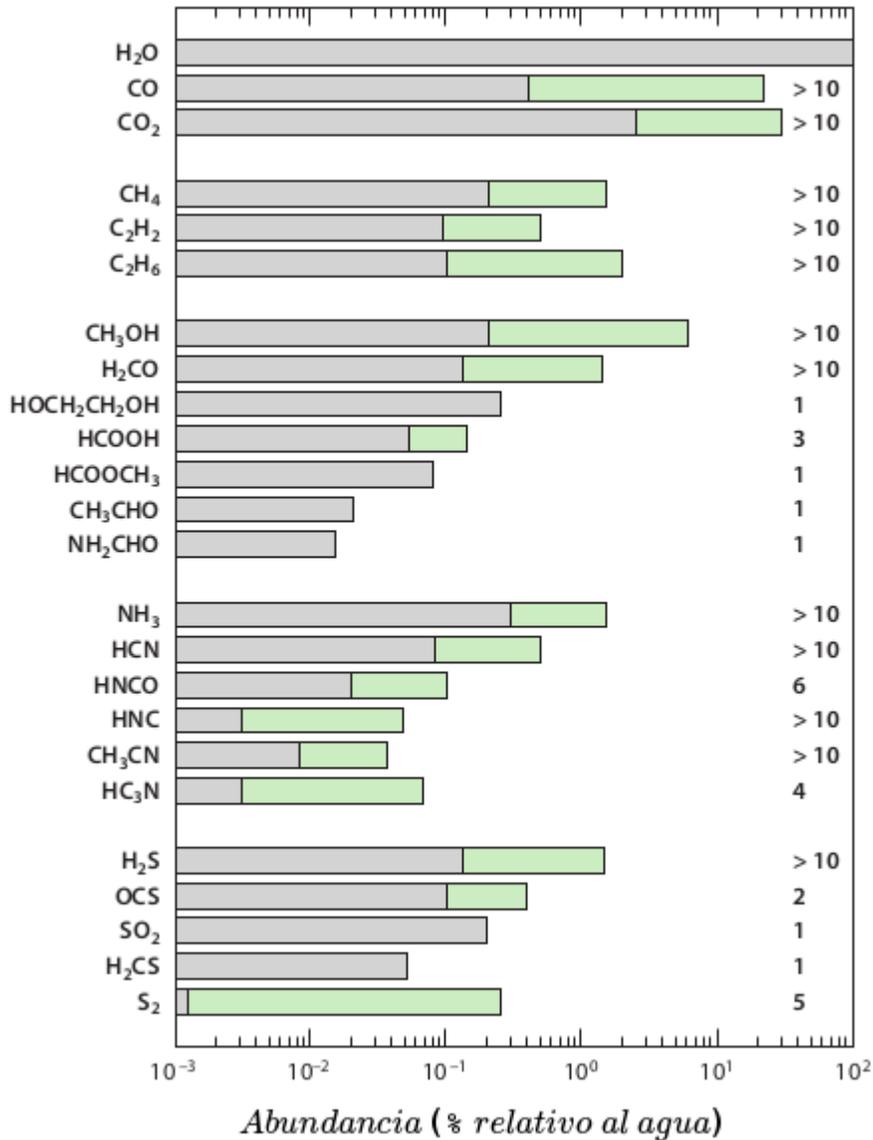


Figura 1.6: Volátiles detectados en cometas mediante estudios espectroscópicos. Lo que se muestra es la abundancia de cada especie molecular en relación a la molécula de H_2O . El número a la derecha indica la cantidad de cometas en los que se observó dicha especie molecular, y el rango de valores encontrado entre esas detecciones se muestra en verde. Todas las moléculas observadas sólo una vez fueron observadas en el cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp). Tomado de Mumma y Charnley (2011).

1.3. Objetos de transición

Desde el punto de vista observacional, la clara distinción entre cometas y asteroides reside en la presencia o no de actividad producida por la sublimación de hielos, lo cual se manifiesta como la presencia de algún tipo de halo/coma y/o cola en la imagen del objeto. Esto a su vez está ligado a la región de formación de estos cuerpos por la disponibilidad o no de volátiles para acretar al momento de su formación, de tal manera que este es un criterio observacional que nos provee información sobre la zona donde se formó el objeto. Desde el punto de vista puramente dinámico ya se mencionó que para distinguir entre cometas y asteroides se utiliza históricamente el parámetro de Tisserand respecto de Júpiter T_J (ver ecuación 1.1), asumiendo que los objetos con $a < a_J$ y $T_J > 3$ fueron clasificados como asteroides, mientras que aquellos con $T_J < 3$ se identificaban como cometas (Vaghi, 1973; Kresak, 1980, 1982; Kosai, 1992).

En 1996 se descubrió que el objeto (7968) Elst-Pizarro mostraba actividad a pesar de tener una órbita típica de un asteroide del cinturón principal ($T_J = 3,18$) (Elst et al., 1996), por lo que fue necesario darle una denominación adicional como cometa: 133P/Elst-Pizarro. Se debió esperar hasta el año 2005 para descubrir dos nuevos objetos del cinturón de asteroides que mostraran actividad cometaria: 238P/Read (Read et al., 2005) y 176P/LINEAR (Hsieh et al., 2006). Estos descubrimientos llevaron a definir una nueva clase de objetos: los cometas del cinturón principal (Hsieh y Jewitt, 2006).

Estos objetos no son los únicos que muestran algún tipo de ambigüedad entre sus características orbitales y apariencia observacional ya que se ha detectado una gran cantidad de objetos con órbitas típicas de cometas pero sin ningún tipo de señal que manifieste alguna actividad o eyección de masa. Entre estos objetos, también denominados asteroides en órbitas cometarias (ACOs por sus siglas en inglés) (Licandro et al., 2008), podemos encontrar tanto núcleos cometarios que han agotado sus volátiles o que sus zonas activas han sido bloqueadas por gruesas capas de polvo y muestran una apa-

riencia inerte o asteroidal (Rickman et al., 1990), como también objetos del cinturón de asteroides que han sido capturados en órbitas cometarias (Fernández et al., 2002, 2014). A continuación se enumeran y describen estos grupos de objetos “de transición”.

1.3.1. Asteroides activos

Como se mencionó anteriormente, los asteroides activos forman una población de objetos del Sistema Solar que exhiben actividad cometaria pero dinámicamente son indistinguibles de los asteroides del cinturón principal (Hsieh y Jewitt, 2006; Jewitt, 2012).

El mecanismo que produce en estos objetos una pérdida de masa suficiente para que se detecte actividad fue un tema de discusión cuando los primeros asteroides activos empezaron a observarse. La clave era si estos objetos presentaban material volátil como para sublimar o si esta actividad era desencadenada por otros motivos como impactos, alta velocidad de rotación, etc. (Licandro y Campins, 2010; Tancredi, 2012). Debido a que con los modelos actuales de formación planetaria resultaba difícil demostrar la existencia de objetos del cinturón de asteroides con volátiles en su composición o cómo esos objetos pudieron conservar estos volátiles en una región del Sistema Solar con energía térmica tan alta, se generó un debate sobre si realmente la actividad se debía a sublimación de volátiles o si la misma era producida por una colisión y la actividad observada era en realidad polvo remanente producto del impacto. Este debate duró algunos años pero hoy en día se sabe que dentro de lo que se denomina asteroides activos hay tanto objetos colisionados, como rotadores rápidos, que pueden mostrar pérdida de masa sin contener material volátil, como también objetos que presentan sublimación de hielos. Por ejemplo, la particular coma de polvo del asteroide (596) Scheila fue modelada y explicada a partir de un impacto por Ishiguro et al. (2011b). Por otro lado Sheppard y Trujillo (2015) detecta una cola de polvo en el asteroide (62412) 2000 SY₁₇₈ y estima un periodo de rotación para el objeto de $\sim 3,33 \pm 0,01$ horas, lo que indica que esta

alta velocidad de rotación probablemente tiene que ver con la pérdida de masa.

En cuanto a aquellos asteroides cuya actividad está dominada por la sublimación de volátiles, han sido inicialmente denominados *Cometas del cinturón principal* o *Main Belt Comets* (MBCs) en inglés. Si bien la presencia de volátiles no ha sido detectada espectroscópicamente en estos objetos, si ha sido detectada en los asteroides (65) Cybele (Licandro et al., 2011) y (24) Themis (Campins et al., 2010; Rivkin y Emery, 2010). En particular, (24) Themis es un objeto que posee una familia dinámica asociada y entre los miembros de esta familia se han descubierto dos objetos que presentan actividad, lo que necesariamente liga dinámica y físicamente la actividad con la presencia de volátiles en los objetos que integran la familia (Hsieh et al., 2018).

La detección de hielo de agua en el cinturón de asteroides fue un hecho sorprendente debido a que la pérdida por sublimación del hielo expuesto en esta zona del cinturón de asteroides es tan rápida que resulta imposible mantenerla durante algo más de 10^9 años y, por lo tanto, si algún objeto poseía hielos expuestos los habría perdido hace bastante tiempo. La única posibilidad para poder conservar el hielo de agua en objetos del cinturón de asteroides es que el hielo se encuentre protegido en capas algunos metros por debajo de la superficie y así lograr sobrevivir un tiempo comparable a la edad del Sistema Solar (Fanale y Salvail, 1984, 1989). Por ejemplo, Schorghofer (2008) encuentra que el hielo puede mantenerse algunos metros por debajo de la superficie si ésta tiene baja conductividad térmica y su temperatura media es menor que 145 K. Si esta explicación es verdadera presenta el problema de que debería existir algún mecanismo que permita en algún momento exponer el hielo para poder observar actualmente actividad debido a la sublimación. Una posibilidad es postular que el objeto con hielos bajo la superficie se puede volver activo si recibe alguna colisión lo suficientemente energética para romper la capa superior y dejar el hielo expuesto. En la tabla 1.2 se listan los asteroides a los que se les ha detectado actividad, junto a algunos elementos orbitales, tamaño y el mecanismo más plausible de generación de actividad en el objeto.

Objeto	a (ua)	e	$sen(i)$	r_N	act.
311P/PANSTARRS	2,189	0,141	0,094	< 0,2	R?
354P/LINEAR	2,290	0,151	0,097	0,06	I/R
P/2016 G1 (PANSTARRS)	2,583	0,169	0,205	< 0,05	I
259P/Garrad	2,729	0,280	0,288	0,3	S
P/2015 X6	2,754	0,163	0,059	< 1,4	S/R
(596) Scheila	2,929	0,197	0,226	79,9	I
233P/La Sagra	2,985	0,479	0,164	?	?
331P/Gibbs	3,003	0,022	0,179	0,9	I/R
P/2013 R3-B	3,029	0,236	0,032	\sim 0,2	S/R
P/2013 R3-A	3,030	0,259	0,033	\sim 0,2	S/R
288P	3,053	0,160	0,037	1,3	S
324P/La Sagra	3,099	0,114	0,382	0,6	S
(439) Griseldis	3,120	0,144	0,267	20,8	I?
348P/PANSTARRS	3,146	0,311	0,312	?	?
(62412) 2000 SY ₁₇₈	3,147	0,111	0,096	5,2	I/R
313P/Gibbs	3,152	0,205	0,178	0,5	S
358P/PANSTARRS	3,160	0,196	0,175	< 1,3	S?
P/2016 J1-B	3,160	0,259	0,247	< 0,4	S/R
133P/Elst-Pizarro	3,163	0,153	0,024	1,9	S/R
P/2016 J1-A	3,165	0,259	0,249	< 0,9	S/R
238P/Read	3,179	0,209	0,017	0,4	S
176P/LINEAR	3,217	0,145	0,024	2,0	S?

Tabla 1.2: Asteroides activos detectados hasta la fecha. En las columnas se indica: semieje mayor (a); excentricidad (e); seno de la inclinación $sen(i)$; radio estimado del núcleo (r_N) y mecanismo que genera la actividad del objeto (act.). En la última columna (R) indica alta velocidad de rotación, (I) impacto, (S) sublimación, (?) indefinido. Adaptado de Hsieh et al. (2018)

1.3.2. Asteroides en órbitas cometarias

Los denominados ACOs son objetos que no muestran indicios de actividad pero tienen órbitas típicas de cometas, es decir, tienen valores de $T_J < 3$. Al igual que con los cometas en actividad, los ACOs muestran una importante variedad de órbitas.

A diferencia de los objetos del cinturón de asteroides, generalmente este tipo de órbitas no son estables, lo que evidencia el problema de usar T_J como criterio de clasificación en estos casos. Teniendo en cuenta esto último, Tancredi (2014) define un criterio de clasificación más estricto, donde además de T_J tiene en cuenta otros parámetros como el *MOID* que es la distancia mínima de intersección entre la órbita del objeto y aquellas de los planetas gigantes, y encuentra con este método una muestra de 331 ACOs, de los cuales 203 tienen órbitas de tipo JFCs (JF-ACOs), 72 de tipo Centauro y 56 de tipo Halley; estos últimos también denominados *Damocloides* por Jewitt (2005).

La naturaleza de estos objetos no es fácil de determinar, ya que se puede tratar de asteroides que han escapado del cinturón principal o de cometas extintos o dormidos. Para comprender mejor su naturaleza se necesitan estudios para caracterizar las propiedades superficiales de estos objetos. En este sentido se han realizado varios trabajos tanto en longitudes de onda del visible, como en el infrarrojo cercano (Alvarez-Candal y Licandro, 2006; Licandro et al., 2006, 2008; Alvarez-Candal, 2013) y en el infrarrojo medio (Fernández et al., 2005; Licandro et al., 2009a). Los resultados de estos estudios no son concluyentes debido a la similitud entre los espectros de núcleos cometarios y la de los asteroides más representativos del cinturón externo que son los clasificados taxonómicamente como de tipos *P* y *D* (Hicks et al., 2000; DeMeo y Binzel, 2008). Identificar si estos objetos pudieron estar activos en el pasado indagando su historia dinámica tampoco es fácil ya que sus órbitas no son precisamente estables, sumado a que el valor del parámetro T_J de los objetos de las regiones más externas del cinturón de asteroides está muy cerca de los valores límite entre cometas y asteroides. Por estas razones es posible que la población de ACOs pueda contener una fracción importante

de objetos que provienen originalmente del cinturón de asteroides y que no tendrían un pasado cometario (Ziffer et al., 2005; Kim et al., 2014).

Algunos estudios han dado resultados positivos en la búsqueda de actividad residual en este tipo de objetos pero otros muchos ACOs pueden en realidad tener un nivel imperceptible de actividad. Por ejemplo, el NEO (3552) Don Quixote ($T_J = 2,31$) es un objeto con una órbita típica de JFC (Hahn y Rickman, 1985) con un albedo bajo y de tipo taxonómico *D* (Binzel et al., 2004) lo cual también coincide con las características de un núcleo cometario, pero que no había sido observado activo. En el año 2014 Mommert et al. (2014) detectan actividad residual después de observarlo con el telescopio infrarrojo *Spitzer*. Por otro lado (Jewitt, 2006) encuentra un muy bajo nivel de actividad en el asteroide 2003 WY₂₅, asteroide que tiene elementos orbitales muy similares a los del cometa extinto D/1819 W1 (BLANPAIN), lo que indicaría que se trata del mismo objeto o que, al menos, 2003 WY₂₅ es un fragmento del cometa. Estos trabajos muestran que la búsqueda de actividad residual es un buen método para definir la naturaleza cometaria o no de este tipo de objetos.

Otro caso interesante es el del cometa 107P/Wilson-Harrington (también denominado (4015) Wilson-Harrington): este objeto fue descubierto en observaciones de 1949 mostrando actividad cometaria (Cunningham, 1950; Fernández et al., 1997) y en 1979 fue descubierto el asteroide (4015) 1979VA, que luego de estudios dinámicos se demostró que se trataba del mismo objeto. Más tarde se realizaron varios estudios para detectar actividad cometaria en él pero siempre sin éxito (Chamberlin et al., 1996; Lowry y Weissman, 2003; Ishiguro et al., 2011a; Licandro et al., 2009b), así que este objeto sólo mostro actividad en las observaciones de 1949. De acuerdo a Bottke et al. (2002) hay un 4 % de probabilidades de que venga de la región de los JFC, mientras que hay un 65 % de probabilidades de un origen en la región externa del cinturón de asteroides.

Recientemente, Licandro et al. (2016) obtiene valores de diámetros efectivos y albedos para 49 ACOs y 16 Damocloides, encontrando que el 95 % de los ACOs de su muestra

presenta albedos bajos compatibles con un origen cometario y una distribución de albedos muy similar entre ambos grupos con valores de $\bar{p}_v = 0,05 \pm 0,01$ y $\bar{p}_v = 0,05 \pm 0,02$, respectivamente. Otro resultado de este trabajo es que la función acumulativa de tamaños (CSD por sus siglas en inglés) de los ACOs es menos profunda y desplazada hacia diámetros mayores en comparación con la CSD de los JFCs. Este es un resultado interesante ya que sugiere que si los ACOs son cometas “dormidos” esto podría ser el resultado de un proceso en el cual el polvo que es eyectado vuelve a depositarse sobre el núcleo hasta formar un manto en la superficie que impide la actividad (Rickman et al., 1990), pero este proceso es probablemente dependiente del tamaño de los objetos de manera que los JFCs que permanecen activos son en general más pequeños y pueden mostrar actividad durante más tiempo. Esto último también es sugerido por Gundlach y Blum (2016).

1.3.3. Hildas y quasi-Hildas

Una de las zonas más estables del cinturón de asteroides es la región de los Hildas, en ella se encuentra una gran cantidad de asteroides atrapados en la resonancia de movimientos medios 3:2 con Júpiter (Schubart, 1968, 1982, 1991). Estos objetos tienen semiejes mayores en el rango $3,7 \text{ ua} < a < 4,2 \text{ ua}$; excentricidades $e < 0,3$ e inclinaciones $i < 20^\circ$ (Zellner et al., 1985a).

Como se mencionó anteriormente, en esta región encontramos mayoría de asteroides de tipo *P* y *D* y en menor medida *C* (Dahlgren y Lagerkvist, 1995). Si bien caracterizar los objetos tipos *P* y *D* no es fácil ya que no hay análogos meteoríticos como en el caso de otros tipos taxonómicos, Takir y Emery (2012) detecta la presencia de la banda correspondiente al agua en $3 \mu\text{m}$ en todos los asteroides de tipo *P* y *D* que observa entre 3 ua y 4 ua, lo cual indicaría la presencia de hielo de agua en estos objetos.

Los objetos que habitan esta región del cinturón de asteroides tienen una particularidad que los diferencia del resto de los objetos del cinturón. Algunas teoría de evolución

del Sistema Solar, describen un escenario en el cual Júpiter y Saturno cruzan una resonancia de movimientos medios generando un periodo de alta inestabilidad en la región media y externa del Sistema Solar (Morbidelli et al., 2005). Las simulaciones muestran que la población primordial de cuerpos menores en resonancia con Júpiter (Hildas y Troyanos de Júpiter) fue eyectada durante este periodo de turbulencia mencionado. Luego, esta región fue repoblada por cuerpos de la región externa del Sistema Solar dispersados hacia las regiones más internas (Roig y Nesvorný, 2015). De acuerdo a este modelo los Hildas y los Troyanos se formaron de la misma población primordial que los TNOs.

La región donde se encuentra este grupo de asteroides es altamente estable, a tal punto que los objetos pueden sobrevivir allí por un tiempo del orden de la edad del Sistema Solar (Nesvorný y Ferraz-Mello, 1997). Sin embargo esta región se encuentra rodeada por zonas de alta inestabilidad con tiempos de permanencia mucho más cortos (Di Sisto et al., 2005), de manera que un asteroide que entre en esta región inestable probablemente será eyectado rápidamente de la resonancia.

Durante el último siglo varios JFCs han permanecido en la resonancia 3:2 con Júpiter pero en una configuración inestable. Estos cuerpos fueron denominados *cometas quasi-Hilda* (QHCs por sus siglas en inglés) por Kresak (1979) y actualmente hay varios objetos en esta región (Toth, 2006). Estos han migrado de órbitas externas a la de Júpiter a órbitas internas en la región de los Hildas, pero en una configuración de alta inestabilidad. Algunos de ellos han sido capturados temporariamente como satélites de este planeta (Ohtsuka et al., 2008), e incluso la órbita de pre-captura del cometa D/Shoemaker-Levy 9 (Chodas y Yeomans, 1996) era de este tipo. Lamentablemente no es suficiente verificar la permanencia de un objeto en la región inestable para determinar la naturaleza cometaria del mismo ya que es posible que algunos asteroides del grupo de los Hildas que escapan por diversos mecanismos de la región estable ingresen a la zona inestable para mezclarse con la población de cometas, de acuerdo a (Di Sisto et al., 2005) los Hildas escapan a una tasa de $5,7 \times 10^{-4}$ por año. Si además de esta similitud en los

parámetros orbitales consideramos que tanto la población de JFCs como los asteroides de esta región tienen características superficiales muy similares que los agrupa en los tipos taxonómicos *P* y *D* (Fitzsimmons et al., 1994; Jewitt, 2002; Dahlgren y Lagerkvist, 1995; Gil-Hutton y Brunini, 2008), se hace realmente muy difícil poder distinguir entre unos y otros.

1.4. Objetivos del trabajo

En este trabajo de Tesis se presenta un estudio de los cuerpos que habitan la región de los Hildas donde se encuentran los cometas quasi-Hilda. El objetivo es detectar objetos activos o que puedan ser candidatos a mostrar actividad en el futuro, analizando tanto sus órbitas a partir de simulaciones numéricas como de los resultados de observaciones realizadas desde el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO). En el siguiente capítulo se detalla el proceso de selección de candidatos para lo cual se realizaron integraciones numéricas con el objetivo de estudiar la historia dinámica de los objetos de esta región y seleccionar posibles candidatos a tener actividad en el futuro. En el capítulo 3 se muestran los resultados observacionales correspondientes a uno de los objetos que se consideraron candidatos a presentar actividad. En el último capítulo se resumen las conclusiones del trabajo y las posibilidades que los resultados obtenidos ofrecen para seguir investigando.

Capítulo 2

Selección de candidatos

Como se mencionó previamente, en la región ocupada por los cometas quasi-Hildas (QHCs) se encuentran también asteroides Hildas que han escapado de la zona estable y que se comportan dinámicamente como cometas (Di Sisto et al., 2005). Por otra parte, no resulta posible distinguir ambos grupos analizando sus características superficiales debido a que son similares (Fitzsimmons et al., 1994; Jewitt, 2002; Dahlgren y Lagerkvist, 1995; Gil-Hutton y Brunini, 2008).

Considerando esta situación, Toth (2006) realizó un estudio exhaustivo de la zona quasi-Hilda y encontró nuevos objetos que pueden ser catalogados como QHCs, entre los cuales identificó 23 asteroides que en realidad podrían ser núcleos de cometas dormidos o extintos. Más recientemente, Cheng y Ip (2013) detectaron la presencia de una coma en el objeto 2000 YN₃₀ que hasta ese entonces había sido catalogado como asteroide y actualmente es conocido como el cometa 212P/NEAT. Estos autores mostraron que ese objeto ingresó a la región quasi-Hilda como resultado de la interacción de un objeto Centauro con Júpiter hace unos 47.000 años.

Como los Centauros provienen del cinturón transneptuniano (Levison y Duncan, 1997; Di Sisto y Brunini, 2007), es muy probable que contengan una importante cantidad

de volátiles en su composición. De hecho se ha observado gran cantidad de Centauros activos (Jewitt, 2009; Mazzotta Epifani et al., 2014b; Wierzos et al., 2017). De esta manera, el escenario por el cual se explica la llegada de objetos de naturaleza cometaria a la región quasi-Hilda provenientes de esa zona intermedia es muy razonable. Por tal motivo, se decidió seleccionar posibles candidatos a QHCs entre los objetos que han llegado recientemente a la región quasi-Hilda provenientes de la zona de los Centauros.

2.1. Selección inicial

Para realizar la búsqueda se obtuvieron de la base de datos de ASTORB¹ los elementos orbitales osculadores de todos los objetos con semiejes mayores en el rango $3,7 \text{ ua} \leq a \leq 4,2 \text{ ua}$ y que tengan un arco orbital que abarque no menos de 180 días. Esta primera muestra tiene 2439 objetos a enero de 2016.

Para extraer de esta primera muestra los objetos que se encuentran en la región quasi-Hilda se aplicó el procedimiento propuesto por Toth (2006) que sugiere definir la región inestable utilizando elementos lagrangianos. Los componentes de la excentricidad en elementos lagrangianos son:

$$k = e \cos(\tilde{\omega} - \tilde{\omega}_J), \quad h = e \sin(\tilde{\omega} - \tilde{\omega}_J), \quad (2.1)$$

donde e es la excentricidad del objeto, y $\tilde{\omega}$ y $\tilde{\omega}_J$ son las longitudes del perihelio del objeto y Júpiter, respectivamente. Utilizando estos elementos, Toth (2006) propone que los objetos en la región inestable quasi-Hilda son aquellos que se encuentran fuera de un círculo centrado en $(k_0; h_0) \simeq (0,0075; 0)$ y de radio $\sim 0,24$. Este criterio de selección arrojó una segunda muestra de 277 objetos, los cuales están representados en negro en el plano $(k; h)$ que se muestra en la figura 2.1. En esa figura el círculo negro indica el límite propuesto por Toth (2006) y en cyan se muestran los asteroides Hildas seleccionados

¹<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>

en la primera muestra. Vale mencionar que todos estos objetos estaban inicialmente catalogados como asteroides.

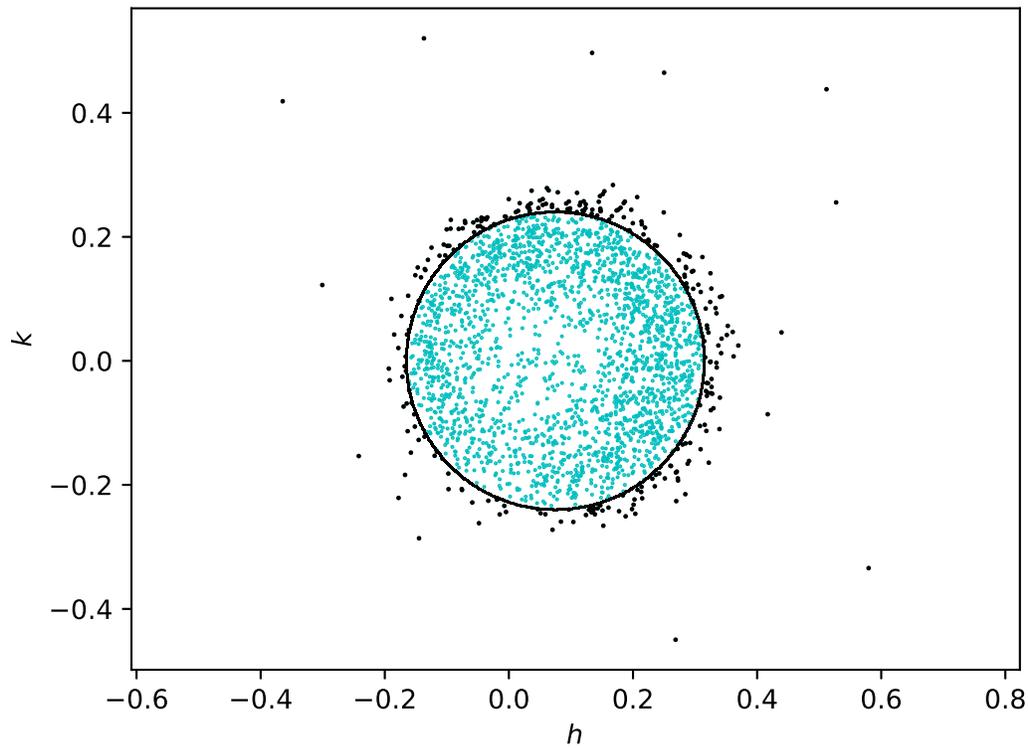


Figura 2.1: Distribución de los 2439 objetos seleccionados en la región de los Hildas ($3.7 \text{ ua} \leq a \leq 4.2 \text{ ua}$) en el plano de los elementos lagrangianos $(k; h)$ (ver ecuación 2.1). El círculo negro representa el límite de estabilidad que se eligió para elegir los candidatos a QHCs, los cuales están representados en negro.

Si en lugar de usar las componentes $(k; h)$ como sugiere Toth (2006) se utilizan las

componentes $(q; p)$:

$$q = \tan(i) \cos(\Omega - \Omega_J), \quad p = \tan(i) \sin(\Omega - \Omega_J), \quad (2.2)$$

donde i es la inclinación del objeto, y Ω y Ω_J son la longitud del nodo del objeto y Júpiter, respectivamente, y como sugiere Murray y Dermott (1998) se utiliza $\tan(i)$ en lugar de i , los 277 objetos seleccionados no muestran un comportamiento muy distinto al del resto de los Hildas ni tienen una distribución uniforme como la observada en el plano $(k; h)$ en coincidencia con lo concluido originalmente por Toth (2006)(figura 2.2). Lo mismo sucede si utilizamos las componentes $(a_x; a_y)$ (figura 2.3):

$$a_x = a \cos(l - l_J), \quad a_y = a \sin(l - l_J), \quad (2.3)$$

donde a es el semieje mayor del objeto, y l y l_J las longitudes medias del objeto y Júpiter respectivamente.

Independientemente del análisis anterior, es importante mencionar que en el plano $(q; p)$ (figura 2.2) se destacan dos zonas con forma anular que muestran una sobredensidad de asteroides. Se trata de las dos familias de asteroides que se encuentran en esta región del cinturón externo (Nesvorný et al., 2015): los objetos del anillo interno son los integrantes de la familia Schubart que consta de 352 miembros y cuyo miembro principal es el asteroide (1911) Schubart, mientras que los objetos del anillo externo forman parte de la familia Hilda que tiene 409 miembros y cuyo componente principal es el asteroide (153) Hilda².

²No hay que confundir esta familia de asteroides cuyo componente principal es el asteroide (153) Hilda, con el grupo dinámico de los Hildas, que de acuerdo a la definición del *Minor Planet Center* son todos los asteroides que cumplen: $3,7 \text{ ua} \leq a \leq 4,1 \text{ ua}$; $e \leq 0,3$ y $i \leq 20^\circ$.

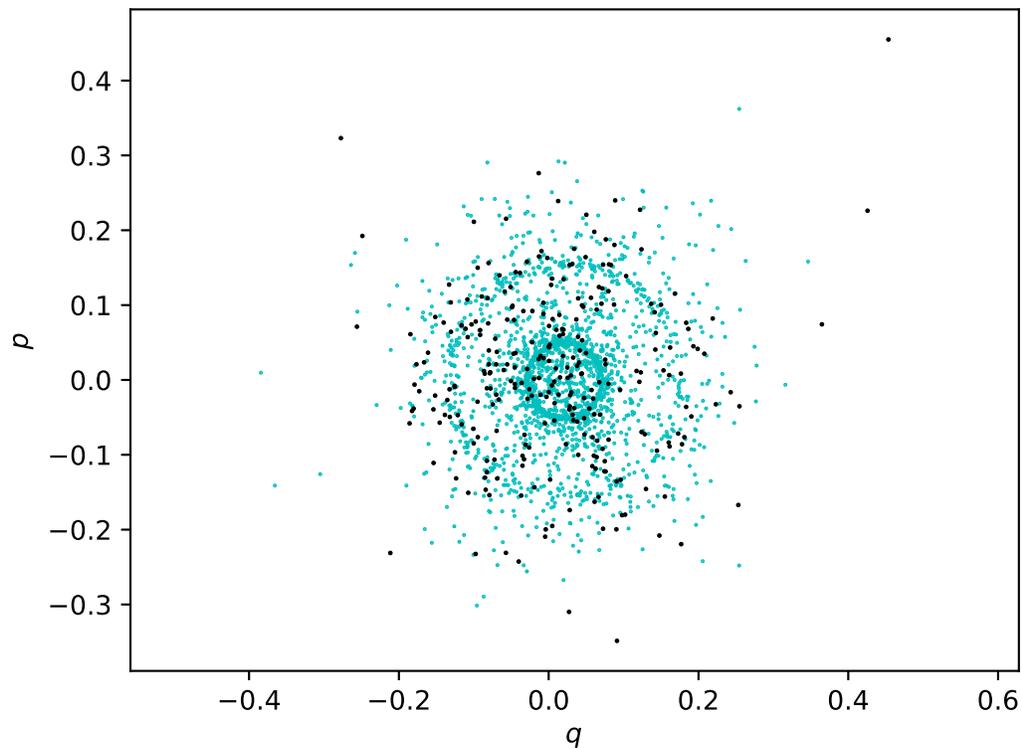


Figura 2.2: Distribución de los 2439 objetos seleccionados en la región de los Hildas ($3.7 \text{ ua} \leq a \leq 4.2 \text{ ua}$) en el plano de los elementos lagrangianos $(q; p)$ (ver ecuación 2.2). En cian se observan todos los Hildas y en negro los objetos que pudieron haber ingresado recientemente a esta región del cinturón de asteroides desde la región de los Centauros. Las dos estructuras anulares que se observan corresponden a las dos familias que habitan esta región. El anillo interior corresponde a la familia Schubart, mientras que el exterior corresponde a la familia Hilda.

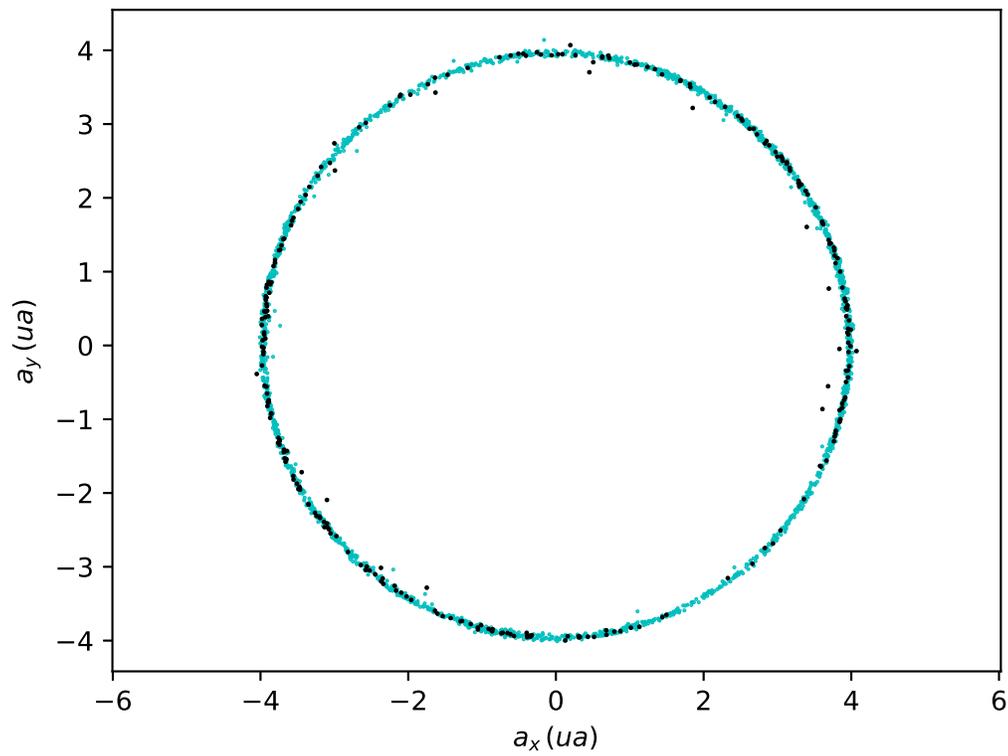


Figura 2.3: Distribución de los 2439 objetos seleccionados en la región de los Hildas ($3.7 \text{ ua} \leq a \leq 4.2 \text{ ua}$) en el plano $(a_x; a_y)$ (ver ecuación 2.3). En cyan se observan todos los Hildas y en negro los objetos que pudieron haber ingresado recientemente a esta región del cinturón de asteroides desde la región de los Centauros.

2.2. Evolución dinámica

El proceso descrito en la sección anterior permitió seleccionar objetos que se encuentran en la zona inestable de la región de los Hildas pero no nos permite concluir nada sobre su pasado dinámico y mucho menos sobre la posibilidad de que contengan material volátil en su composición. Para poder seleccionar objetos que tengan buenas probabilidades de ser activados en el futuro cercano es necesario detectar aquellos que recientemente ingresaron a la región quasi-Hilda provenientes de la zona de los Centauros. Su origen en esta región nos permitiría esperar que estos objetos tendrán una composición con una buena proporción de volátiles y la condición temporal nos asegura que esa proporción de volátiles no se ha visto considerablemente reducida por numerosos pasajes por el perihelio de sus órbitas.

Para realizar una selección en base a estos criterios los 277 objetos fueron integrados numéricamente hacia atrás en el tiempo durante un período de 50.000 años con el objeto de detectar en qué casos sus actuales órbitas son el resultado de una interacción con Júpiter que haya transferido algún objeto en órbita de tipo Centauro a la región más externa del cinturón de asteroides. Para ello se utilizó un integrador de Bulirsch-Stoer con un paso inicial de 1 día, precisión de 10^{-12} . Las integraciones fueron heliocéntricas y se incluyeron como perturbadores los planetas de Mercurio a Neptuno. El instante inicial en todos los casos corresponde a las 00:00 horas de TU del 23 de mayo de 2014.

Los resultados de la integración numérica permitieron seleccionar 11 candidatos que recientemente habrían ingresado a la región de los QHCs en los últimos 50.000 años provenientes de la zona externa a la órbita de Júpiter. En la tabla 2.1 se listan estos 11 objetos y se muestran algunos de sus parámetros orbitales y físicos. Los resultados de las integraciones numéricas se muestran en las figuras 2.4 a 2.14. Estas figuras muestran la evolución del semieje mayor y las distancias perihélica y afélica durante los 50.000 años de integración.

Objeto	a (ua)	e	i (°)	H
(18916) 2000 OG ₄₄	3,847	0,586	7,42	14,5
(371837) 2007 VM ₃₁₈	3,975	0,199	17,45	14,2
2001 QG ₂₈₈	4,074	0,426	3,99	16,2
2002 UP ₃₆	3,946	0,442	1,35	16,5
2003 UR ₂₆₇	3,795	0,528	6,14	16,9
2006 XL ₅	3,727	0,514	4,52	16,8
2007 UC ₉	3,833	0,314	19,81	15,2
2008 GO ₉₈	3,978	0,284	15,46	15,1
2009 KF ₃₇	4,071	0,321	11,49	15,9
2009 SR ₁₄₃	3,872	0,524	5,90	16,4
2013 QR ₉₀	3,720	0,220	7,04	16,3

Tabla 2.1: Objetos seleccionados como candidatos a mostrar actividad cometaria. La tabla lista el nombre del objeto, su semieje mayor (a), excentricidad (e), inclinación (i), y magnitud absoluta (H) (de acuerdo a los datos del *Jet Propulsion Laboratory*).

La figura 2.4 muestra como el objeto (18916) 2000 OG₄₄ se ve perturbado hacia una órbita externa a la de Júpiter en $T \sim -12.200$ años, a partir de ahí el valor de su perihelio prácticamente se fija en $\sim 5,2$ ua (que antes era el valor de la distancia afélica), mientras que la distancia afélica y el semieje empiezan a aumentar mediante saltos (posiblemente debido a encuentros con planetas), esto continúa hasta que en $T \sim -40.000$ años el semieje alcanza ~ 100 ua.

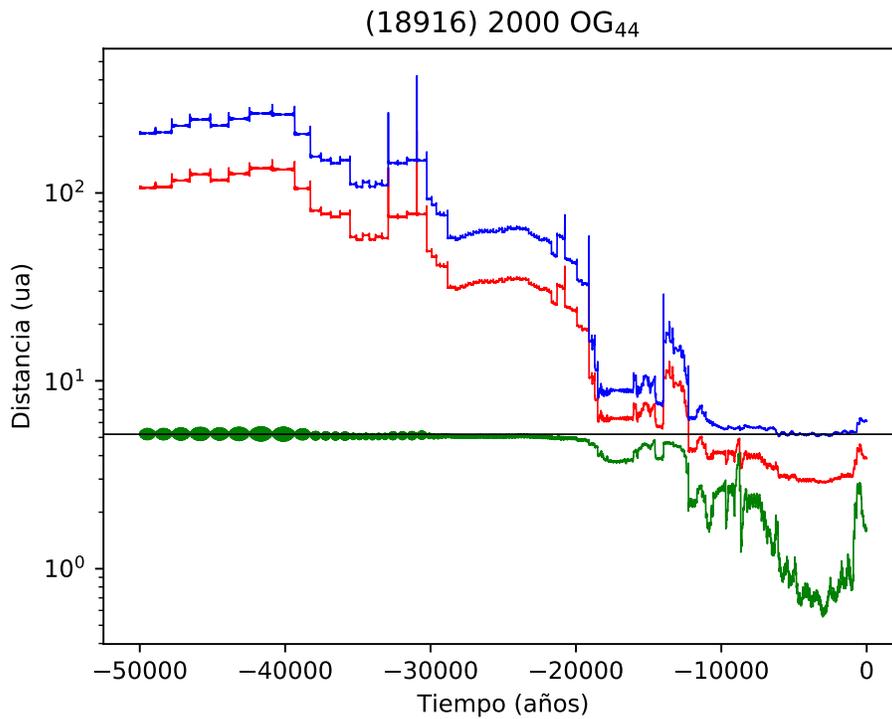


Figura 2.4: Evolución del semieje mayor (rojo), y de las distancias perihélica (verde) y afélica (azul) del objeto (18916) 2000 OG₄₄ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. $T = 0$ corresponde a las 00:00 hs de TU del 23 de mayo de 2014. El semieje mayor de Júpiter se indica en negro.

La figura 2.5 muestra la evolución dinámica del objeto (371837) 2007 VM₃₁₈. Allí se observa como el semieje mayor de este objeto cruza el valor de 5,2 ua en $T \sim -10.600$ años, donde intercambia el valor de su perihelio por el del afelio. A partir de allí el objeto tiene una órbita típica de un Centauro donde su semieje mayor siempre se encuentra dentro de las 30 ua y su perihelio se encuentra cerca del valor del semieje mayor de Júpiter. Hace unos ~ 4.000 años este objeto entra en la resonancia 3:2 con Júpiter ($a = 3,97$ ua) y su órbita reduce sistemáticamente el valor de su excentricidad.

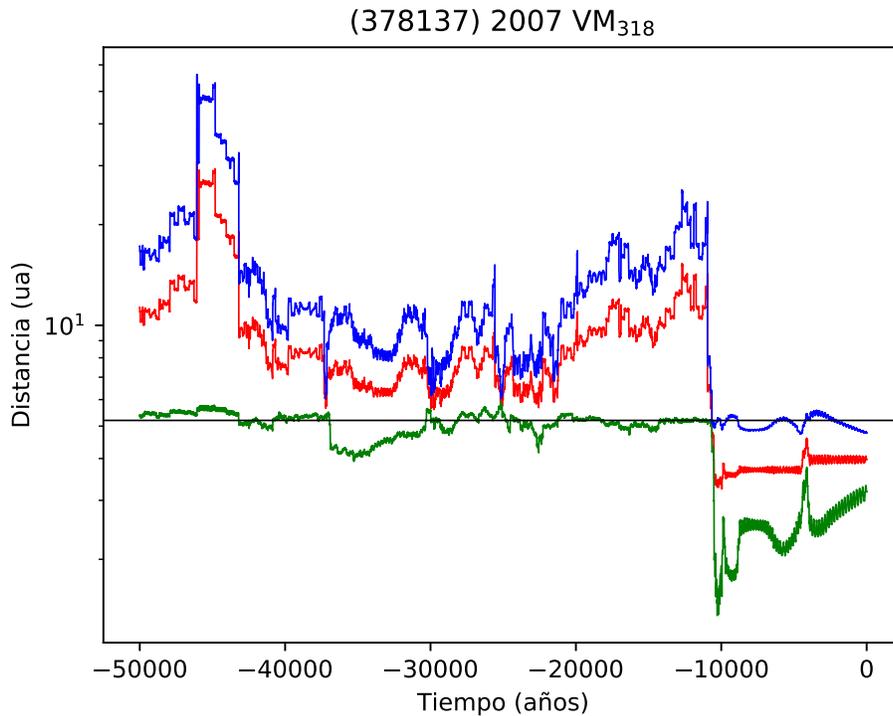


Figura 2.5: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto (371837) 2007 VM₃₁₈ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que las descritas en la figura 2.4.

La evolución dinámica del objeto 2001 QG₂₈₈ se muestra en la figura 2.6. El ingreso de este objeto a la región interior a la órbita de Júpiter es más reciente que para los anteriores ($T = -4.150$ años). Desde ese momento hasta $T = 0$ el objeto muestra un comportamiento dinámico bastante inestable. Antes de eso se observa un comportamiento bastante similar al del objeto (18916) 2000 OG₄₄, donde el semieje y la distancia afélica quedan fijas hasta dar un salto y volver a fijarse en otro valor. En $T \sim -27.200$ años el semieje mayor crece de tal modo que supera el valor del semieje mayor de Neptuno ($a = 30,1$ ua) llegando al final de la integración a alcanzar valores de $a > 300$ ua.

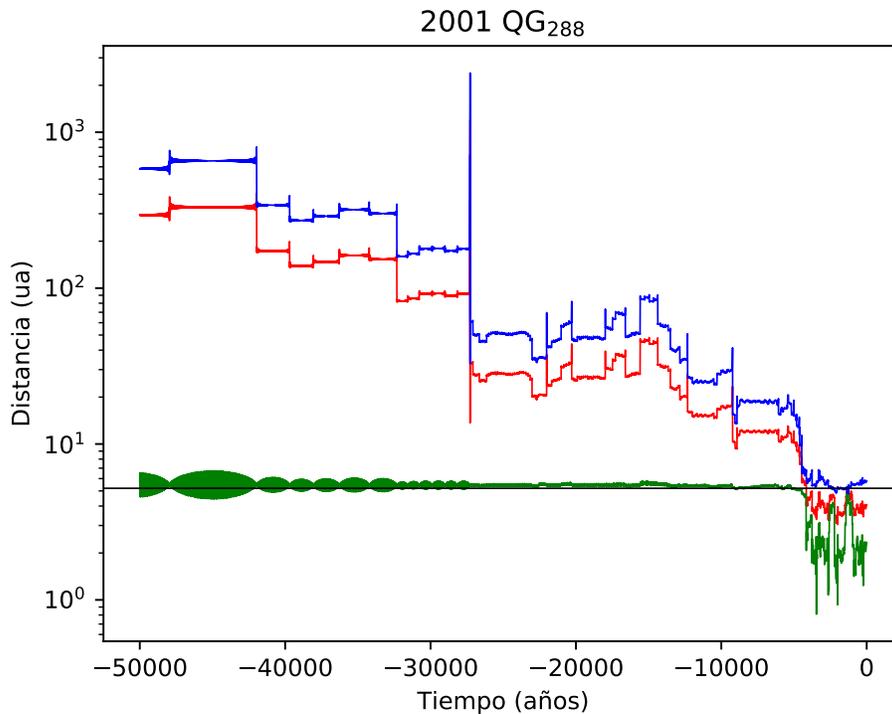


Figura 2.6: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2001 QG₂₈₈. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

El resultado de la integración para el objeto 2002 UP₃₆ se muestra en la figura 2.7. Este objeto alcanza un semieje mayor al de Júpiter en $T = -11.900$ años, aunque vuelve a ingresar a la región interna en $T = -12.800$ años para volver a la región de los Centauros de manera definitiva en $T = -15.200$ años. Durante toda la integración su semieje mayor no alcanza valores altos en comparación con los otros objetos, siendo el valor máximo $a = 21,4$ ua. A partir de los ~ -35.000 años el valor del semieje comienza a oscilar alrededor del valor del semieje mayor de Saturno ($a \sim 9,58$ ua).

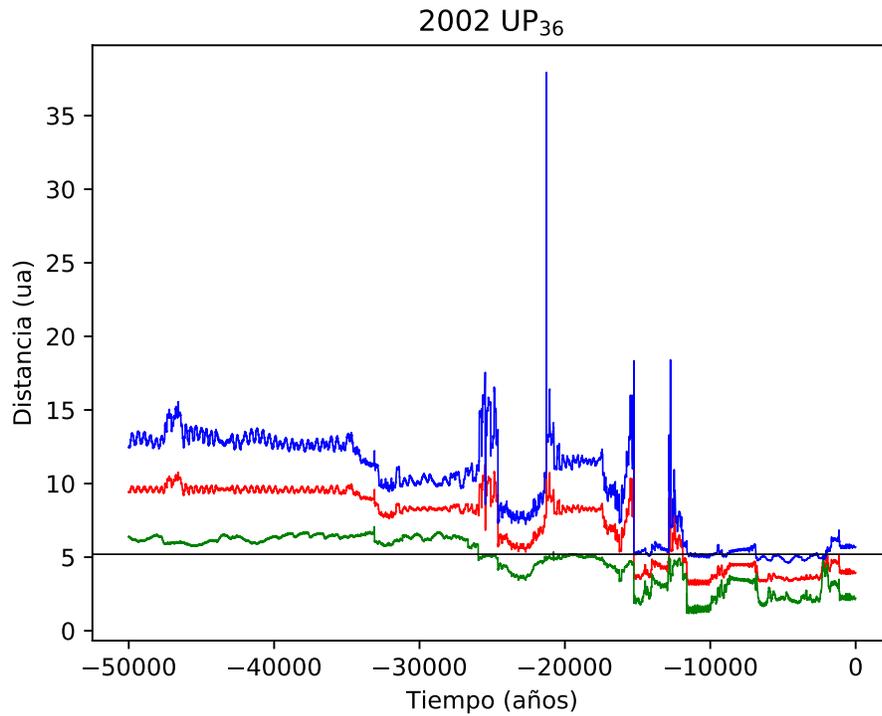


Figura 2.7: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2002 UP₃₆ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

La figura 2.8 muestra la evolución dinámica del objeto 2003 UR₂₆₇. Este objeto alcanza un valor de $a > 5,2$ ua por primera vez en $T = -1.200$ años. De todos modos hay que destacar que este objeto tiene un comportamiento dinámico bastante inestable, de hecho el valor de su semieje mayor cruza el valor de $5,2$ ua unas 10 veces en un lapso de ≈ 10.000 años hasta que en $T = -14.000$ años el semieje supera definitivamente este valor. Otro rasgo de este objeto es que en $T \sim -22.000$ años la distancia perihélica del objeto supera significativamente las $5,2$ ua de manera que la órbita se vuelve completamente externa a la de Júpiter. Por último, durante el tiempo de integración el semieje alcanza un valor máximo $a = 13,4$ ua.

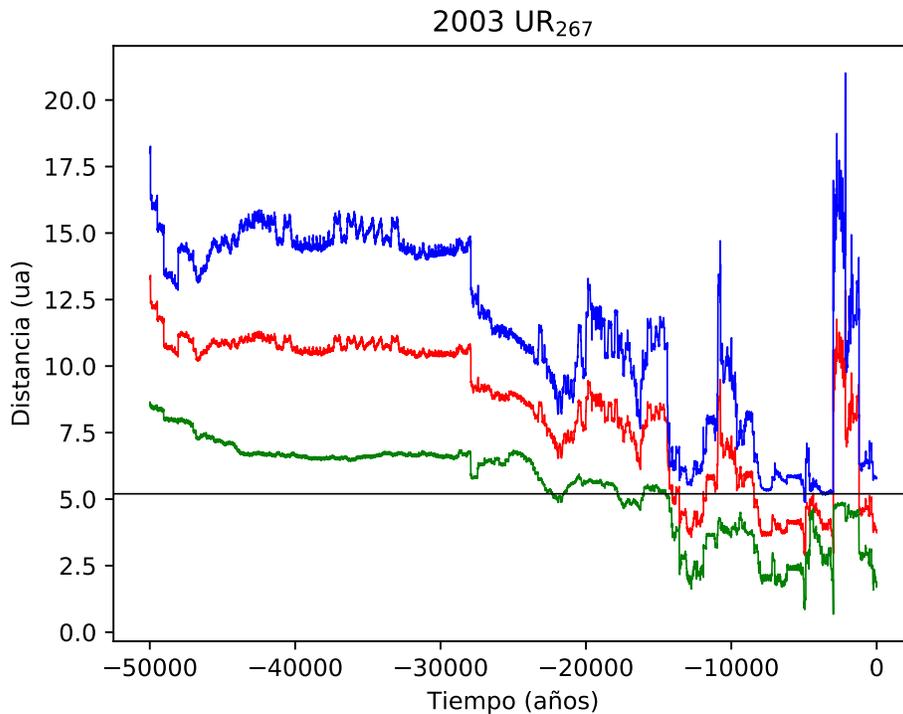


Figura 2.8: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2003 UR₂₆₇. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

En la figura 2.9 se puede ver la evolución dinámica del objeto 2006 XL₅. A partir de $T = -50.000$ años en adelante el objeto tiene una órbita típica de Centauro con sus valores de semieje mayor y distancia afélica entre los semiejes de Júpiter y Neptuno. En $T = -22.800$ años el valor del semieje mayor cruza hacia la región interna a la órbita de Júpiter hasta que en $T = -18.600$ años se reduce hasta alcanzar un valor prácticamente fijo de 3,7 ua en $T = -16.000$ años, mostrando de ahí en más na variación suave en los valores de q y Q . En los últimos años de la intergración el valor del perihelio alcanza valores menores a 2 ua.

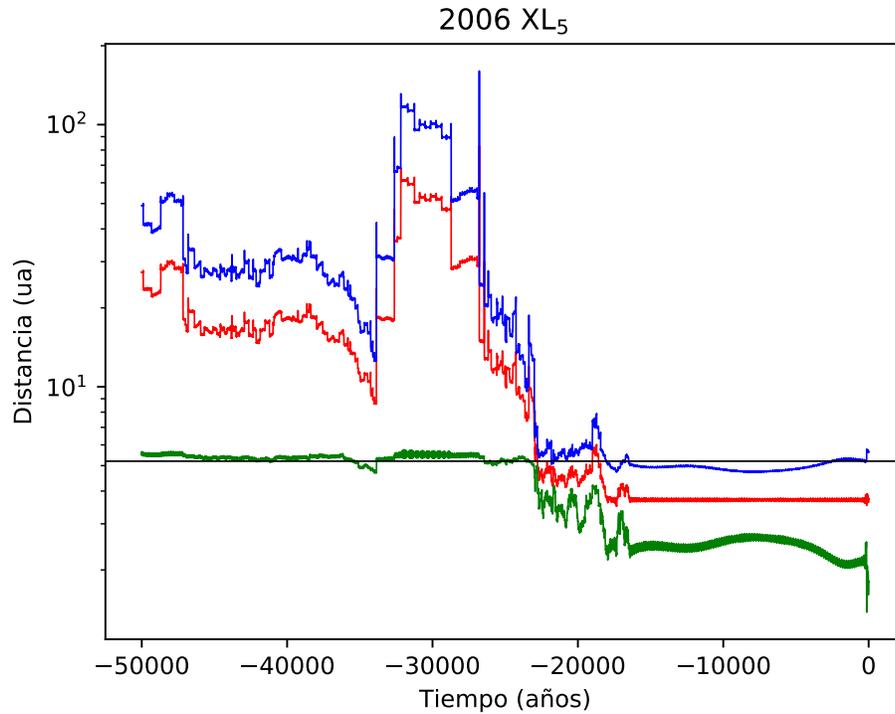


Figura 2.9: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2006 XL₅. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

La figura 2.10 muestra la evolución dinámica del objeto 2007 UC₉. Hasta el instante $T = -18.760$ años el objeto tiene el comportamiento dinámico típico de un Centauro, con valores de a y q entre los valores de los semiejes mayores de Júpiter y Neptuno. Luego cruza por primera el valor de 5,2 ua y entre $T \sim -9.000$ años y ~ -5.000 años la órbita se vuelve altamente inestable y se produce un pico abrupto en los valores de a y Q , probablemente debido a un encuentro cercano con Júpiter. Más recientemente, la órbita finalmente se estabiliza y fija su semieje mayor en un valor correspondiente a la resonancia 3:2 con Júpiter ($a = 3,97$ ua).

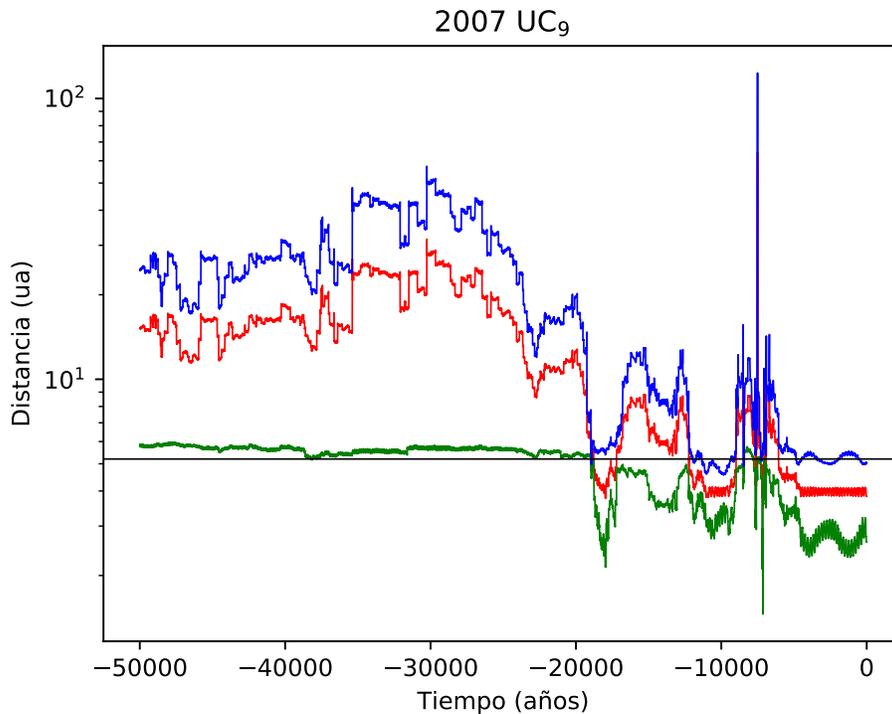


Figura 2.10: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2007 UC₉. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

En la figura 2.11 puede apreciarse la evolución orbital del objeto 2008 GO₉₈. Entre $T = -50.000$ años y $T = -26.000$ años este objeto alcanza valores de semieje mayor de más de 100 ua mientras que el valor del perihelio se mantiene muy cercano a 5,2 ua. Luego en $T = -26.000$ y $T = -24.000$ años se producen dos picos en los valores de a y Q probablemente producto de algún encuentro con un planeta y a partir de ese momento adopta una órbita de tipo Centauro hasta que en $T = -3.100$ años cruza nuevamente la órbita de Júpiter para permanecer en esa región hasta la actualidad.

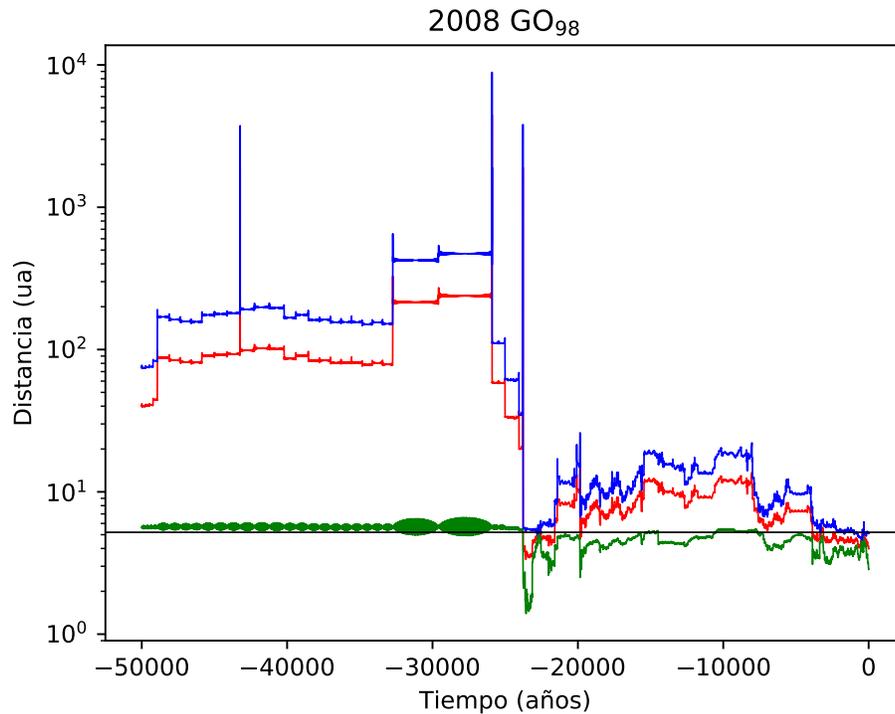


Figura 2.11: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2008 GO₉₈ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

En la figura 2.12 se muestra los resultados de las integraciones para el objeto 2009 KF₃₇ el cual muestra una órbita de Centauro casi a lo largo de toda la simulación. Con un valor para q apenas por encima del valor del semieje de Júpiter. En $T \sim -32.000$ años los valores de a y Q comienzan a disminuir hasta $T \sim -12.000$ años, donde el valor de a se estabiliza en $\sim 8,3$ ua. Luego en $T = -870$ años cruza la órbita de Júpiter abruptamente hasta su actual valor de $\sim 3,9$ ua. De los 11 objetos seleccionados 2009 KF₃₇ es el que más recientemente ha arribado a la región de los QHCs.

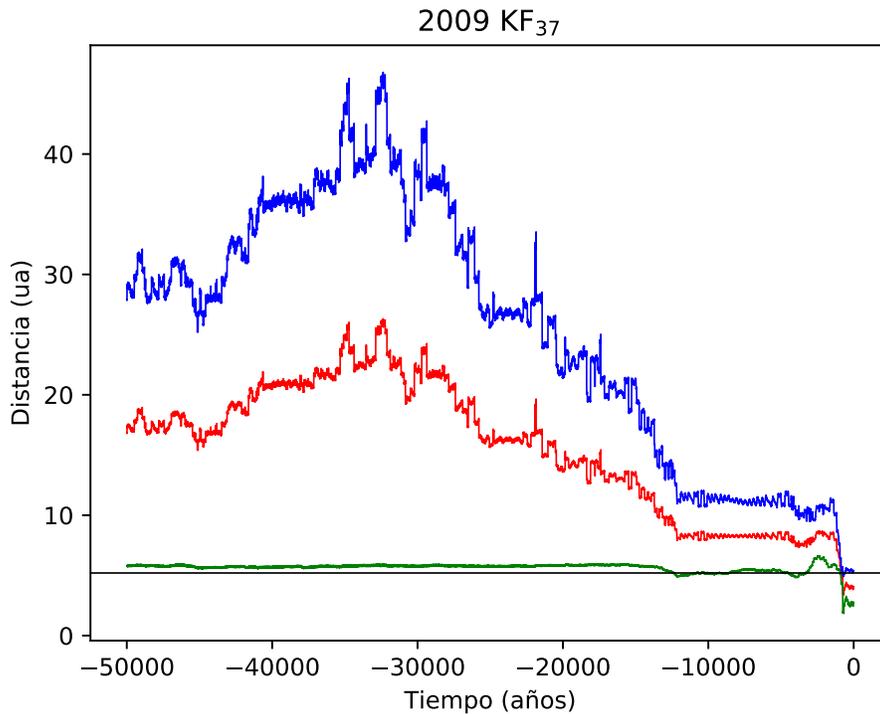


Figura 2.12: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2009 SR₁₄₃ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

La evolución dinámica de 2009 SR₁₄₃ puede apreciarse en la figura 2.13. Puede observarse que desde $T = -50.000$ años el objeto varía el valor de su semieje mayor entre ~ 10 ua y ~ 20 ua, mientras que el valor del perihelio se mueve apenas por debajo de 5,2 ua. En $T \sim -24.500$ años (posiblemente por el encuentro con algún planeta) valores de a y Q de 2009 SR₁₄₃ tienen un salto abrupto. A partir de ese momento los valores de a y Q comienzan a disminuir hasta que tienen un salto abrupto en $T \sim -5.500$ años pero recién en $T \sim -2.250$ años cruza el valor de 5,2 ua.

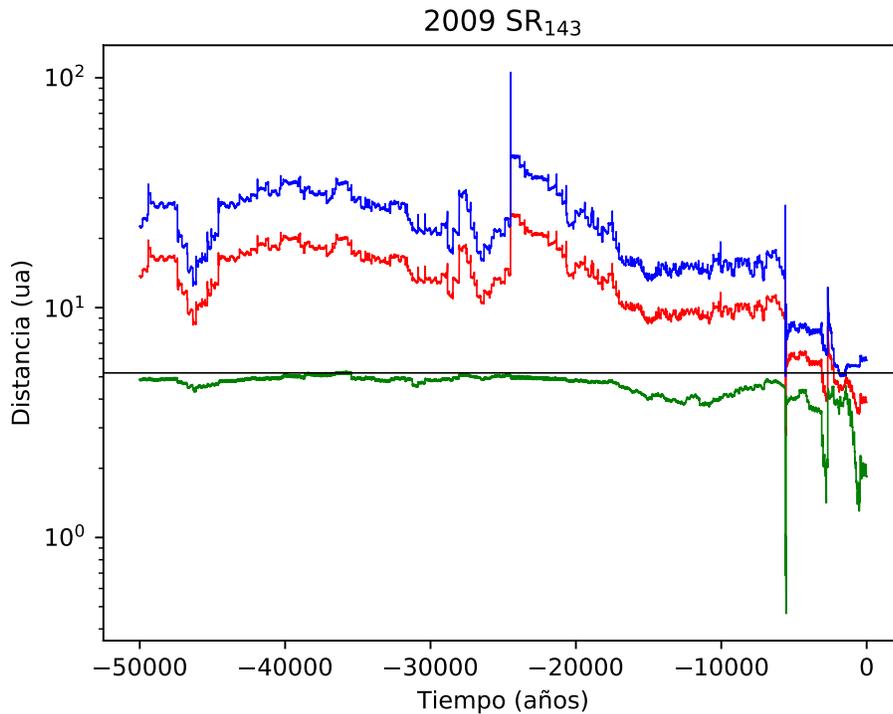


Figura 2.13: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2009 SR₁₄₃ durante los 50.000 años de integración hacia atrás. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

La figura 2.14 muestra que el objeto 2013 QR₉₀ tiene una órbita bastante inestable a lo largo de los 50.000 años de integración. En $T \sim -31.500$ años los valores de Q , a y q caen abruptamente, posiblemente por un encuentro con alguno de los planetas. El semieje a cruza el valor de 5,2 ua durante un cierto tiempo y q alcanza un valor mínimo de 0,35 ua. A partir de ese momento y hasta $T \sim -25.500$ años la órbita se muestra bastante inestable para luego volverse interior a la de Júpiter con un valor de Q menor a 5,2 ua.

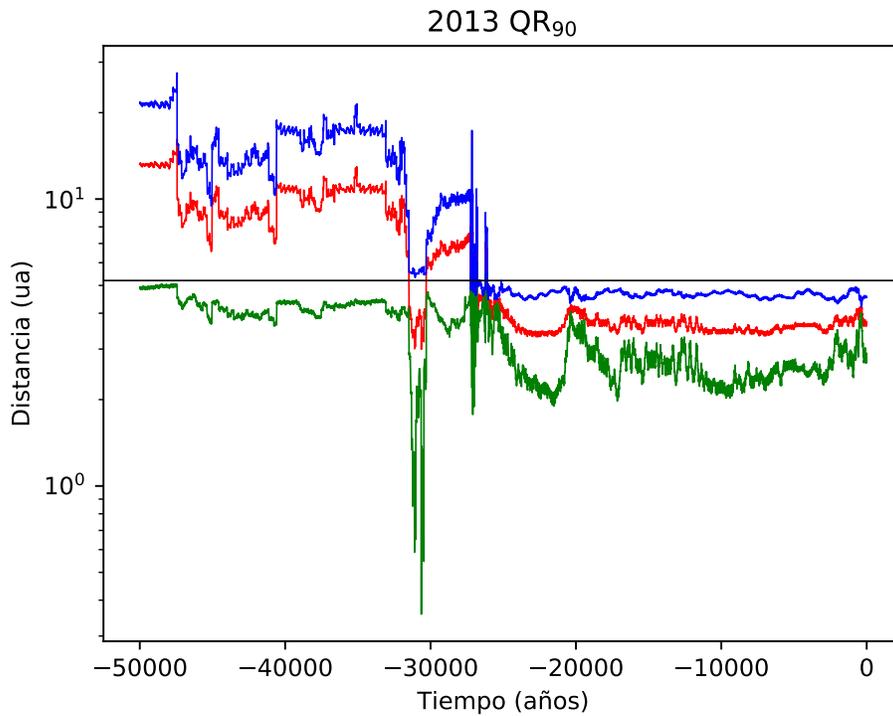


Figura 2.14: Evolución del semieje mayor, y de las distancias perihélica y afélica del objeto 2013 QR₉₀. Las referencias son las mismas que en la figura 2.4.

2.2.1. Clones

Las integraciones realizadas muestran que estos objetos han tenido en general características orbitales similares a las de los Centauros en períodos no muy alejados en el tiempo y en varios casos se ha podido detectar evoluciones dinámicas que claramente responden al mecanismo de transferencia de objetos desde el cinturón transneptuniano a la zona de los JFCs, atravesando la región de los Centauros tal como lo propuso Levison y Duncan (1997), pero también resulta claro que la evolución dinámica de estos cuerpos es bastante inestable y cualquier incerteza en las condiciones iniciales puede arrojar resultados muy distintos a los observados, por lo que es necesario estudiar la evolución dinámica de estos objetos desde un punto de vista estadístico.

Una forma de evaluar los resultados es integrar a los objetos junto a un conjunto de clones y analizar el tiempo que permanecen en cada configuración particular de elementos orbitales. Una posibilidad es utilizar la metodología propuesta por Tiscareno y Malhotra (2003) donde se obtiene para cada objeto la distribución del tiempo promedio de permanencia de sus clones en una configuración de distancias afélica y perihélica dadas. Para ello se repitió la integración numérica realizada para cada objeto pero ahora incluyendo 100 clones para cada uno de los 11 candidatos. Los elementos orbitales de los clones se extrajeron de manera aleatoria de una distribución normal con valor medio igual al valor del elemento orbital del objeto original y una desviación estándar del 1 % de ese valor.

Los resultados se pueden representar en un plano de coordenadas $(Q; q)$ el cual se divide en una grilla de $0,5 \text{ ua} \times 0,5 \text{ ua}$, donde el valor en cada punto se puede interpretar como la probabilidad de encontrar a un clon en ese punto de la grilla en un período de 50.000 años.

En las figuras de la 2.15 a la 2.20 se muestran los resultados para cada objeto. En todos los casos las integraciones de los clones muestran la fuerte influencia de Júpiter y Saturno en la evolución dinámica de estos objetos. Esta influencia puede percibirse

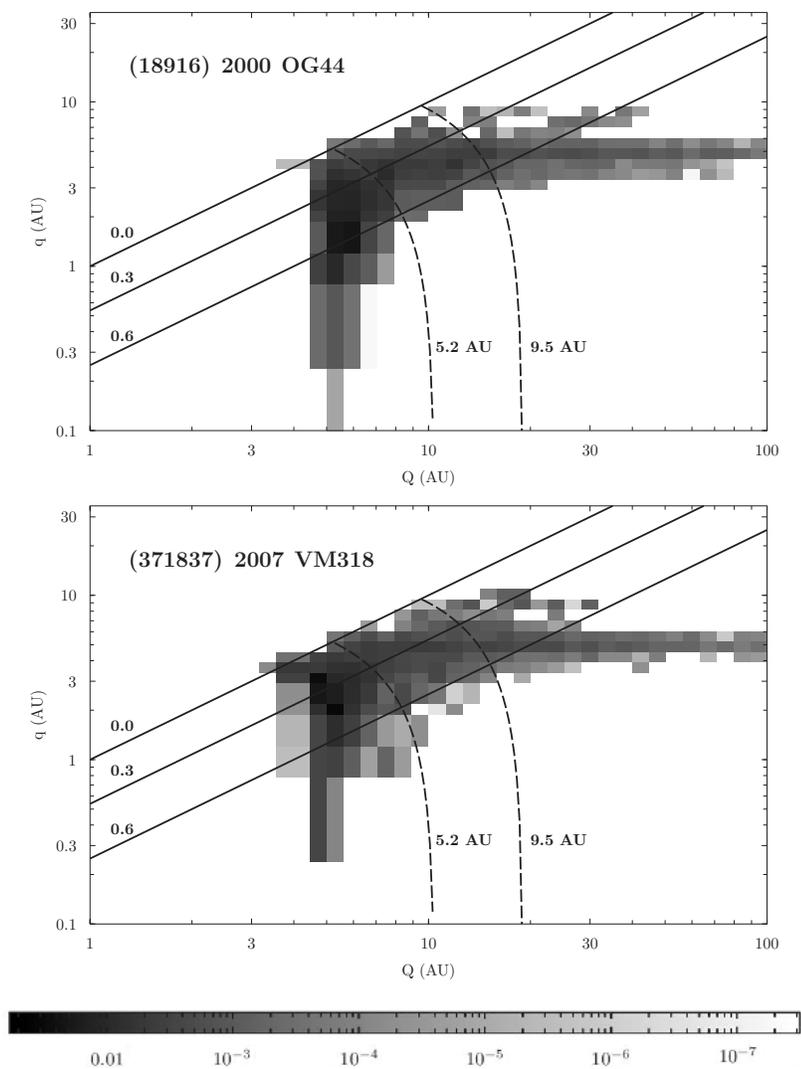


Figura 2.15: Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos (18916) 2000 OG₄₄ (arriba) y (371837) 2007 VM₃₁₈ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0, 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades.

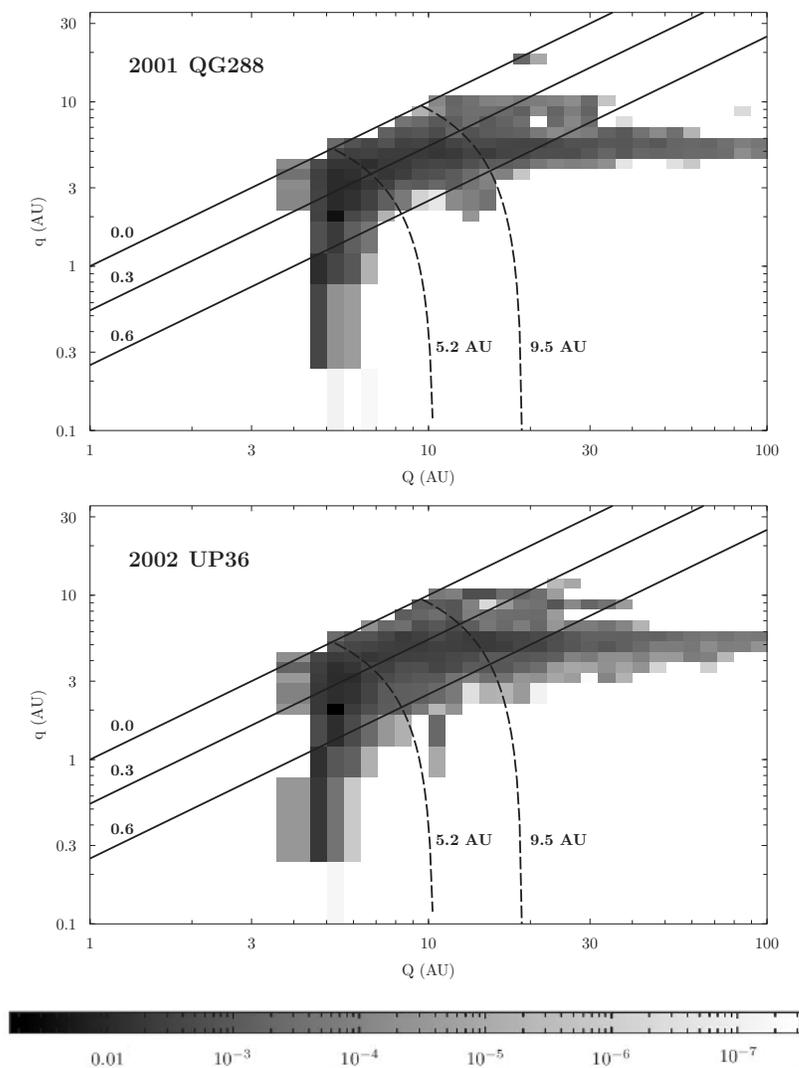


Figura 2.16: Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos 2001 QG₂₈₈ (arriba) y 2002 UP₃₆ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0, 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades.

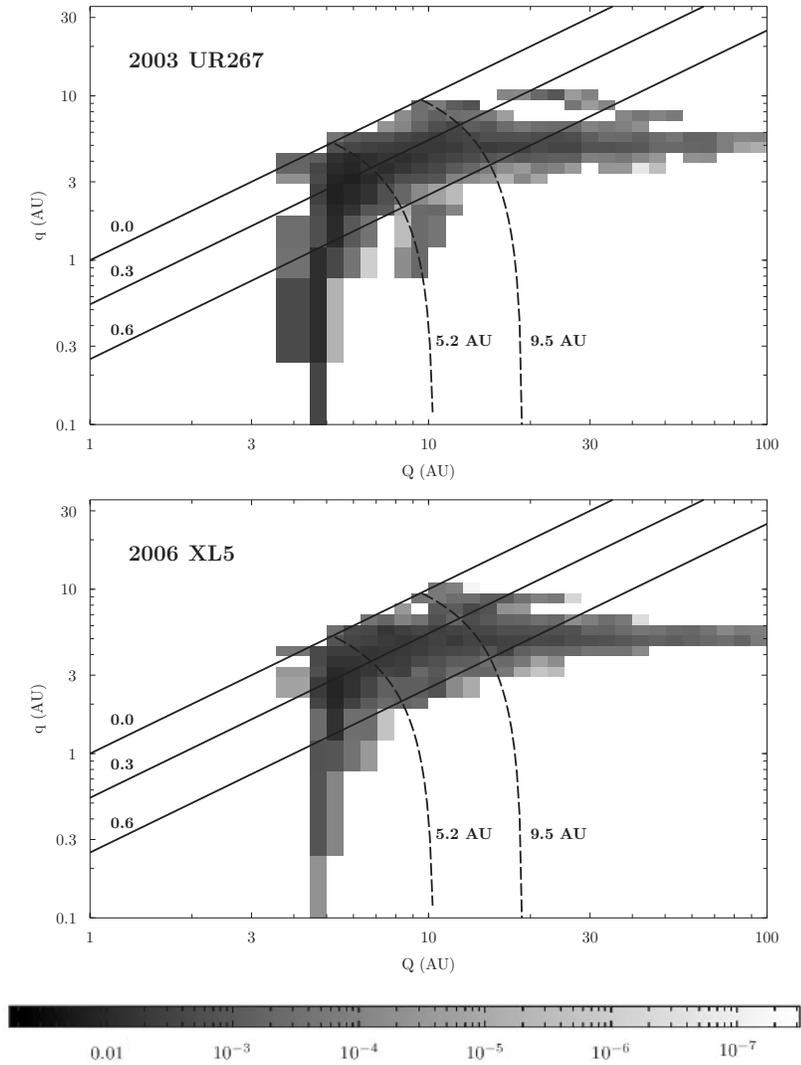


Figura 2.17: Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos 2003 UR₂₆₇ (arriba) y 2006 XL₅ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0, 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades.

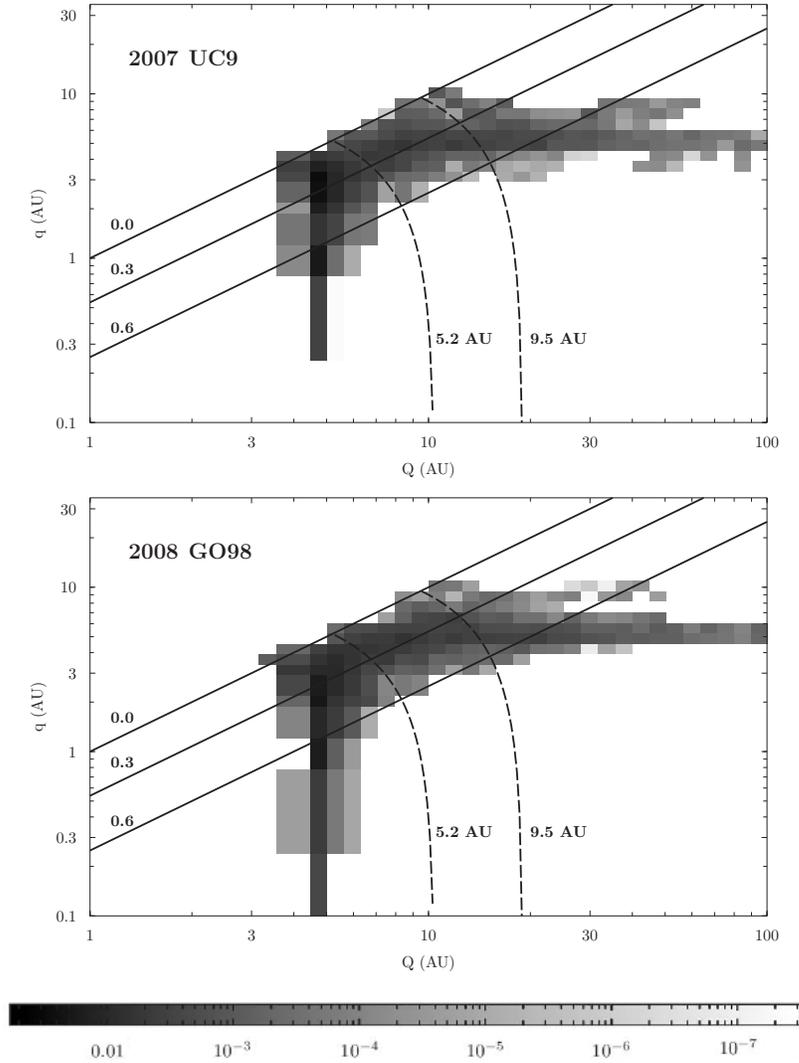


Figura 2.18: Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos 2007 UC₉ (arriba) y 2008 GO₉₈ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0, 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades.

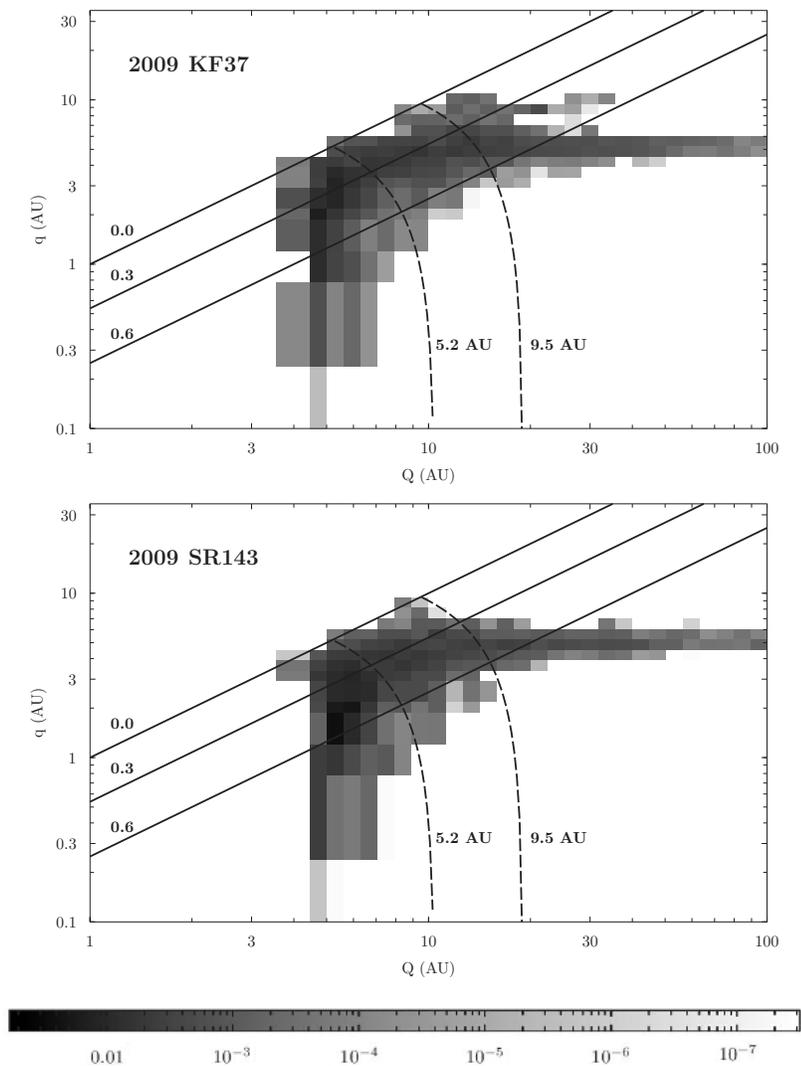


Figura 2.19: Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para los objetos 2009 KF₃₇ (arriba) y 2009 SR₁₄₃ (abajo). Las líneas continuas indican excentricidades de 0, 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades.

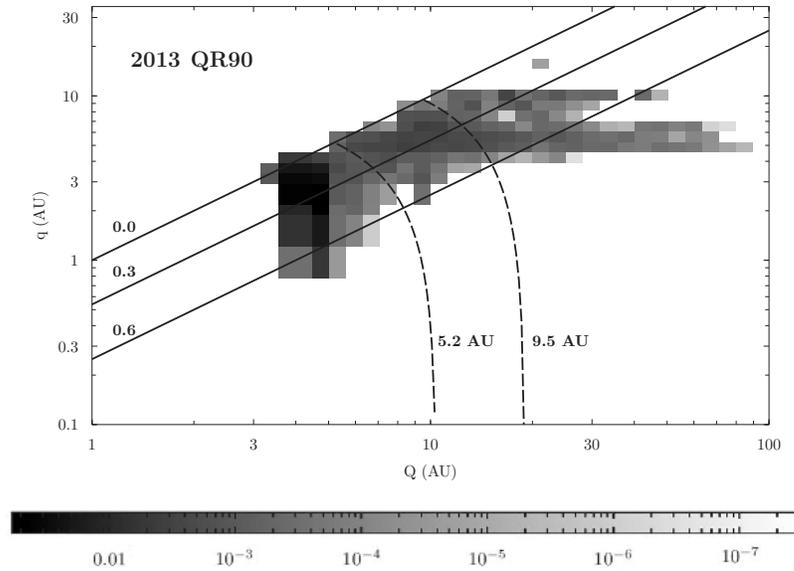


Figura 2.20: Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ para el objeto 2013 QR₉₀. Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades.

en las franjas horizontales que aparecen en cada gráfico con valores de $q \sim 5,2 ua$ y, en menor medida en $q \sim 9,5 ua$. En el caso de 2001 QG₂₈₈ se observa incluso que hay clones que han ocupado órbitas con $q \sim 20 ua$ durante cierto tiempo, lo que indica una cierta influencia de Urano en su evolución dinámica, aunque de mucho menor magnitud que las de Júpiter y Saturno. Este tipo de comportamientos es lo que se espera para JFCs inyectados en la región interior del Sistema Solar desde la región de los Centauros ya que Tiscareno y Malhotra (2003) muestran que en ese caso aparecen comportamientos similares pero las franjas se observan para valores de $q \sim 10 ua$, $\sim 20 ua$ y $\sim 30 ua$ que corresponden a interacciones con Saturno, Urano y Neptuno, respectivamente. Estos es esperable ya que ese trabajo integra las órbitas de los Centauros y sus clones por

tiempos de 100×10^6 años, de manera que durante su vida dinámica los Centauros están mayormente influenciados por estos planetas. A diferencia de Tiscareno y Malhotra (2003), aquí estamos analizando los últimos años como Centauros de los objetos donde se ven mayormente influenciados por Júpiter y en menor medida por Saturno.

Si bien las integraciones se realizaron con el fin de encontrar objetos que recientemente hayan arribado a la región donde se encuentran los QHCs provenientes de las regiones externas del Sistema Solar, los resultados muestran también que varios de estos objetos seleccionados tienen una buena posibilidad de haber visitado regiones próximas al Sol lo que representa un problema: si suponemos que el objeto contiene hielos en su composición y ha tenido varios pasos por un perihelio muy próximo al Sol es posible que el objeto haya sufrido períodos repetidos de alta actividad y que en estos momentos se encuentre inactivo como un cometa durmiente o extinto.

Fernandez (1984) encuentra que la vida física promedio para SPCs con $q \sim 1 \text{ ua}$ es aproximadamente entre 500 y 1.000 periodos orbitales; para un objeto de un semieje mayor $a \sim 4 \text{ ua}$ esto es $\sim 4-8 \times 10^3$ años. Como este periodo de tiempo no es muy largo, de hecho es un orden de magnitud menor al tiempo de las integraciones, es importante verificar si alguno de los objetos ha permanecido en órbitas con $q < 1 \text{ ua}$ por al menos 10^3 años. Esto puede dar indicios de si el objeto pudo volverse inactivo durante su evolución orbital o no. La tabla 2.2 muestra para los 11 candidatos a QHCs el tiempo promedio en que los clones de cada objeto permanecieron en órbitas con $q < 1$ y el instante en el cual los objetos ingresaron finalmente al Sistema Solar interior.

Por lo que puede observarse en la tabla 2.2, los candidatos que han pasado menos tiempo en órbitas con $q < 1 \text{ ua}$ y tienen mayor probabilidad de mostrar actividad por sublimación de volátiles son (371837) 2007 VM₃₁₈, 2013 QR₉₀, 2006 XL₅, 2009 KF₃₇, 2007 UC₉, 2001 QG₂₈₈, 2002 UP₃₆ y 2008 GO₉₈.

La mejor manera de comprobar si estos objetos son efectivamente QHCs es observándolos en busca de señales de actividad cometaria cuando se encuentren en las

	Objeto	$T(q < 1)$ (años)	T (años)
(18916)	2000 OG ₄₄	429 ± 21	-12.200
(371837)	2007 VM ₃₁₈	162 ± 13	-10.600
	2001 QG ₂₈₈	189 ± 14	-4.150
	2002 UP ₃₆	349 ± 19	-11.900
	2003 UR ₂₆₇	733 ± 27	-1.200
	2006 XL ₅	93 ± 10	-22.800
	2007 UC ₉	174 ± 13	-18.760
	2008 GO ₉₈	387 ± 20	-23.800
	2009 KF ₃₇	104 ± 10	-870
	2009 SR ₁₄₃	494 ± 22	-2.250
	2013 QR ₉₀	$1 \pm 0,05$	-31.500

Tabla 2.2: $T(q < 1)$ indica cuanto tiempo, en promedio, el objeto tuvo una órbita con un perihelio menor a 1 ua, mientras que T indica el momento en que el objeto alcanza finalmente una órbita con un semieje mayor menor a 5,2 ua.

proximidades del perihelio de su órbita, pero como un objeto con semieje mayor $a \sim 4$ ua tiene un período orbital de ~ 8 años se requiere una planificación muy cuidadosa de las observaciones para poder cubrir los períodos en los que pueden encontrarse activos.

Capítulo 3

El caso de 2008 GO₉₈

La primera oportunidad de contrastar los resultados obtenidos en las integraciones presentadas en el capítulo anterior con observaciones de los objetos seleccionados se presentó en 2016 cuando el objeto 2008 GO₉₈ tuvo su paso por el perihelio de su órbita el 21 de agosto de ese año.

2008 GO₉₈ está catalogado en la base de datos del JPL como un asteroide del cinturón

Elemento orbital	Valor	Incerteza (1σ)
Semieje mayor (ua)	3,9646070	$3,698 \times 10^{-7}$
Excentricidad	0,2809973	$3,9189 \times 10^{-7}$
Inclinación ($^\circ$)	15,56866	$2,9514 \times 10^{-5}$
Long. del nodo ascendente ($^\circ$)	192,60859	$4,6882 \times 10^{-5}$
Argumento del perihelio ($^\circ$)	53,28665	$1,2159 \times 10^{-4}$
Anomalía media ($^\circ$)	327,17517	$8,5168 \times 10^{-5}$

Tabla 3.1: Parámetros orbitales de 2008 GO₉₈ para la época del 4 de diciembre de 2015 (TDB) tomados de la base de datos del *Jet Propulsion Laboratory*

externo y fue descubierto por el equipo *Spacewatch* del observatorio de *Kitt Peak*. Tiene un periodo orbital de 7,98 años y un parámetro de Tisserand con respecto a Júpiter $T_J = 2,927$. Sus elementos orbitales osculadores fueron tomados de la base de datos del JPL y se muestran en la tabla 3.1.

Este objeto fue observado en tres turnos de observación durante 2016 y 2017, siendo el primero cuando se encontraba muy cerca de su perihelio para luego alejarse de este punto en los meses subsiguientes al moverse por el arco de salida de la órbita. En la figura 3.1 se muestra la órbita de 2008 GO₉₈ y se indican también los puntos donde se encontraba cuando fue observado, mientras que en la tabla 3.2 se muestran las circunstancias de observación, como la distancia heliocéntrica del objeto (r), la distancia geocéntrica (Δ), el ángulo de fase (α), la anomalía verdadera (f) y el número de imágenes individuales tomadas (n) con los tiempos de exposición empleados.

Fecha (0hs TU)	r (ua)	Δ (ua)	α (°)	f (°)	n
2016-Sep-05	2,851	3,111	18,8	3,2	16 × 60 s
2016-Sep-06	2,851	3,112	18,7	3,4	30 × 60 s
2017-Mar-29	3,072	3,475	16,1	47,9	6 × 70 s
2017-Mar-30	3,074	3,465	16,2	48,1	20 × 75 s
2017-Jun-24	3,254	2,572	15,0	64,3	10 × 360 s
2017-Jun-25	3,257	2,563	14,8	64,5	10 × 360 s

Tabla 3.2: La tabla muestra las fechas de las observaciones, la distancia heliocéntrica del objeto (r), la distancia geocéntrica (Δ), el ángulo de fase (α), la anomalía verdadera (f) y el número de exposiciones (n).

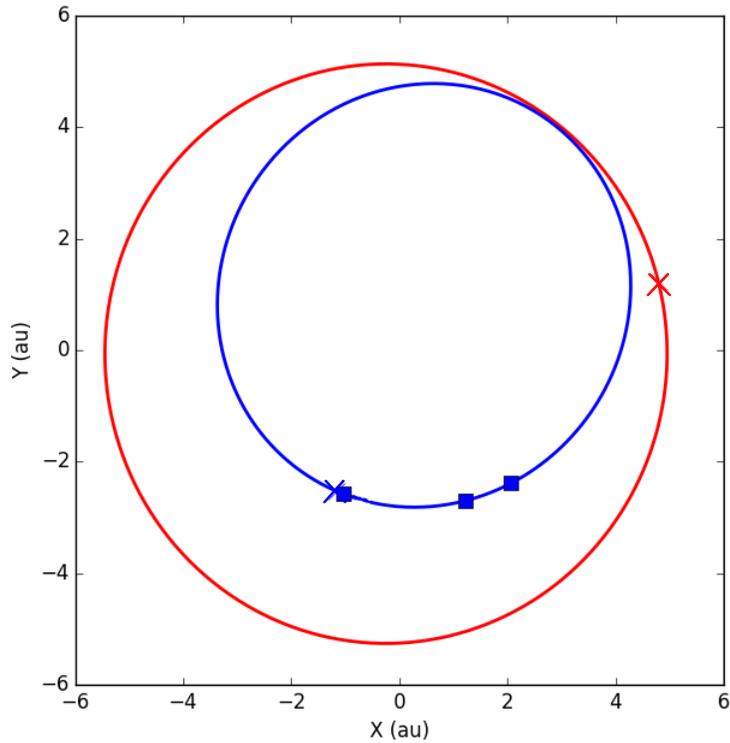


Figura 3.1: En azul la órbita de 2008 G₀₉₈, los cuadrados azules indican las posiciones del objeto cuando este fue observado, correspondiendo el primer turno a la posición más cercana al perihelio. En rojo esta indicada la órbita de Júpiter. Las posiciones de los perihelios de ambas órbitas están indicadas con una cruz.

3.1. Observaciones

Todas las observaciones se realizaron en el Complejo Astronómico el Leoncito, entre septiembre de 2016 y junio de 2017. En total se utilizaron tres turnos de observación de dos noches cada uno, siendo el primero las noches del 5 y 6 de septiembre de 2016, el segundo entre el 29 y 30 de marzo de 2017 y el tercero el 24 y 25 de Junio de 2017.

Para realizar las observaciones se utilizó el telescopio Jorge Sahade de 2,153 m (ver figura 3.2). El diseño óptico del mismo es de tipo Ritchey-Chrétien con una montura ecuatorial tipo horquilla. Los tamaños de los espejos primario y secundario son de 2153 mm y 635 mm, respectivamente. El telescopio se utilizó con un reductor focal, combinación con la que se logra una escala de placa de 33,9 arcsec/mm y un campo útil circular de unos 9 arcmin de diámetro. Todas las observaciones se realizaron con el filtro R de banda ancha del sistema UBVR_I del sistema fotométrico de Johnson & Morgan (Bessell, 1990). Este filtro resulta el más efectivo para este tipo de trabajo porque lo que se intentaba detectar es luz solar reflejada por los granos de polvo de la coma de estos objetos.

El detector utilizado fue un CCD Roper de 2048×2048 píxeles de $13,5 \mu\text{m} \times 13,5 \mu\text{m}$ lo que da un tamaño para el chip CCD de $27,6 \text{ mm} \times 27,6 \text{ mm}$. A su vez, el dispositivo es un chip adelgazado con recubrimiento *Unichrome* UV e iluminado por detrás y está instalado en un dewar enfriado con nitrógeno líquido. Puede trabajar con ganancias de 1, 12; 2, 24 y 4, 10 e^-/ADU . El ruido de lectura es de menos de $3,5 e^-$ a 100 KHz y de $7,77 e^-$ a 1 KHz , mientras que la corriente de oscuridad es de menos $1 e^-/\text{pixel}/\text{hora}$ trabajando a -110°C . El tiempo de lectura es de $4,5 \text{ s}$ a 1 MHz . Para este trabajo se utilizaron una ganancia de 2, 24 y una frecuencia de 100 KHz , además se utilizó un *binning* de 2×2 , lo que deja un tamaño de pixel de $27 \mu\text{m} \times 27 \mu\text{m}$ que, si bien con esta configuración se pierde resolución espacial para muestrear una hipotética coma en los objetos, se gana en relación señal-ruido y esto resulta muy útil pensando en la detección de actividad en este tipo de objetos ya que los mismos son de muy bajo brillo para nuestro telescopio.

En cuanto a los procesos de reducción de las imágenes, se utilizaron los métodos estándar aplicando para ello tareas de IRAF¹. Todas las imágenes fueron corregidas

¹IRAF es el acrónimo de *Image Reduction and Analysis Facility* ó en español: Utilidad de Análisis y Reducción de Datos. Se trata de una colección de software diseñado por astrónomos y programadores

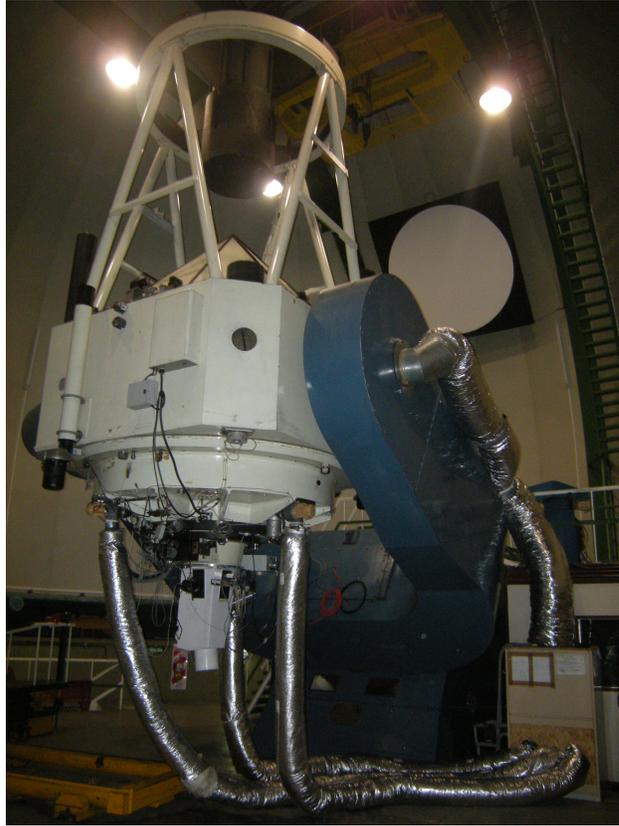


Figura 3.2: Imagen del telescopio de 2,15 m Jorge Sahade emplazado en la estación de altura del Complejo Astronómico el Leoncito. Foto: Esteban García Migani.

por *bias* y *flats*, para lo cual en cada noche se obtuvieron 10 imágenes *bias* (tiempo de exposición cero a obturador cerrado) y 10 imágenes *flat* tomadas con el spot de cúpula. Los *flats* fueron lo suficientemente largos para evitar efectos de sombras por el obturador de la cámara. Tanto los *bias* como los *flats* fueron combinados entre sí para obtener imágenes de corrección finales de alta precisión. No se aplicó una corrección por

para realizar tareas de procesamiento relacionadas con la astronomía observacional. Su mantenimiento es llevado a cabo por el Observatorio Nacional de Astronomía Óptica (NOAO por sus siglas en inglés).

dark a las imágenes debido a que la corriente de oscuridad para este detector es muy baja para las temperaturas de trabajo usuales. Para todas las otras tareas realizadas sobre las imágenes, tales como trasladar el centro de las mismas, co-adicionarlas, generar filtros para sustraer gradientes, medir la PSF de algunas fuentes y compararlas, determinar el centro de alguna fuente particular, etc., se utilizaron tareas propias desarrolladas en Python 3.

Es importante destacar que para este tipo de objetos que poseen un movimiento propio apreciable en el cielo la co-adición de imágenes se hace muy necesaria para evitar una imagen final elongada logrando al mismo tiempo una significativa mejora en la relación señal-ruido, pero este tipo de procesamiento debe realizarse con imágenes individuales cuyos tiempos máximos de exposición están limitados por la velocidad angular del objeto debido a que el telescopio del CASLEO cuenta sólo con un *tracking* de movimiento sidéreo. Por lo tanto, la co-adición se realizó en todos los casos sobre un número significativo de imágenes individuales las cuales se centraron sobre el fotocentro del objeto de interés.

En cuanto a la calidad de las noches a las que se tuvo acceso, fueron en general buenas con algunas excepciones. La segunda mitad de la noche del 29 de Marzo de 2017 se vio afectada por la presencia de cirrus por lo que las imágenes tomadas esa noche fueron descartadas. Por otro lado, en las noches del 5 y 6 de Septiembre hubo algunos problemas con la presencia de la Luna cerca de los objetos, lo que produjo gradientes de iluminación indeseados. En la primera noche la Luna estuvo iluminada a un 20 % y se encontraba a una distancia angular de 16° de uno de los objetos, mientras que en la segunda estos valores fueron de 16 % y 8°, respectivamente. Para lidiar con este efecto sobre las imágenes se ajustó el gradiente de iluminación producido por la Luna mediante un filtro de mediana para luego restar este gradiente a las imágenes.

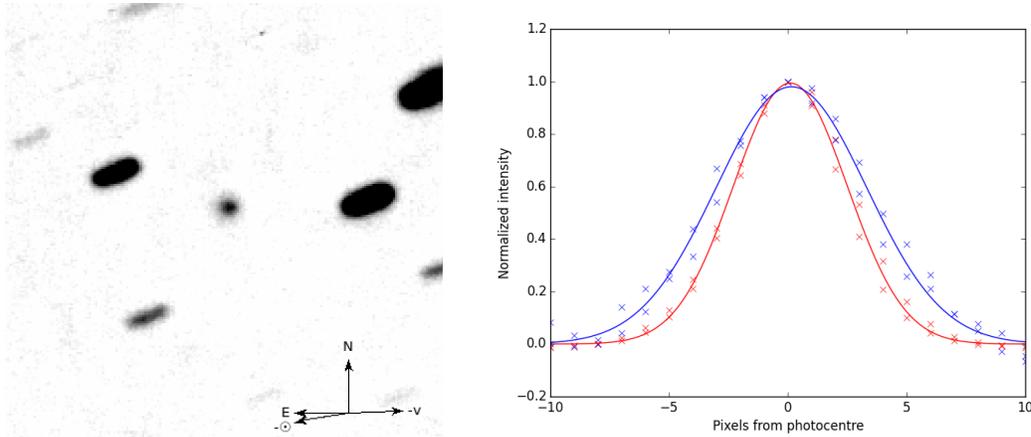


Figura 3.3: (Izquierda) Resultado de co-adicionar 16 imágenes con un tiempo de exposición individual de 30 s tomadas el 5 de Septiembre de 2016. El objeto en el centro es 2008 GO₉₈. Las flechas indican el Norte (N), Este (E), dirección antisolar ($-\odot$) y la dirección opuesta al vector de velocidad heliocéntrica del objeto ($-v$). La imagen tiene un tamaño de 180×180 arcsec. (Derecha) En azul el perfil de intensidad de 2008 GO₉₈ y en rojo el de estrellas del campo (PSF).

3.2. En busca de actividad

En un análisis rápido y a primera vista, las observaciones de 2008 G0₉₈ realizadas en Septiembre de 2016 no dieron resultados positivos en cuanto a mostrar actividad cometaria, pero había que considerar la posibilidad de que una coma compacta e irresuelta domine la totalidad del brillo del núcleo activo ocultando su actividad (Jewitt, 1991). Teniendo en cuenta esto último y con el objetivo de comprobar si existía alguna señal de actividad que no se detectaba a simple vista, se decidió comparar el perfil de brillo del objeto con perfiles de brillo de estrellas del mismo campo. Como las estrellas son todas fuentes puntuales, la distribución de su brillo y sus perfiles se caracterizan por lo que se denomina una *función de dispersión de punto* (PSF por sus siglas en inglés) y a pesar de que en la imagen se encuentran estrellas de distintos brillos todas tienen un perfil

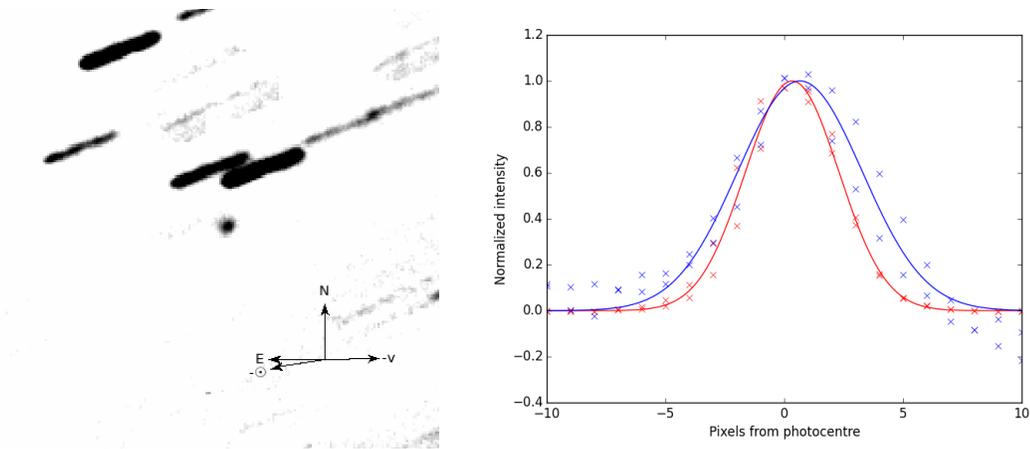


Figura 3.4: (Izquierda) Resultado de co-adicionar 30 imágenes con un tiempo de exposición individual de 60 s tomadas el 6 de Septiembre de 2016, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) En azul el perfil de intensidad de 2008 GO₉₈ y en rojo el de estrellas del campo (PSF).

similar que corresponde al perfil que genera en el CCD la luz de una fuente puntual al atravesar el sistema óptico del telescopio.

Por otro lado, si el objeto es una fuente extendida (como es el caso de una coma cometaria) el perfil va a ser mucho más extendido y claramente distinto al de una PSF. Esta técnica de comparar los perfiles de intensidad es ampliamente utilizada para detectar signos de pérdida de masa en objetos del Sistema Solar. Por ejemplo Luu y Jewitt (1992) aplican este método para detectar actividad cometaria en NEOs, mientras que varios autores hacen lo mismo para JFCs (Licandro et al., 2000; Mazzotta Epifani et al., 2008; Fitzsimmons et al., 2005). Incluso hay algunos ejemplos de la aplicación de este método en TNOs y Centauros (Perna et al., 2013; Mazzotta Epifani et al., 2014b, 2017).

El perfil de 2008 G₀₉₈ fue obtenido ajustando una gaussiana a los valores de su imagen en dos direcciones ortogonales y normalizando el flujo al valor de 1 en el fotocentro,

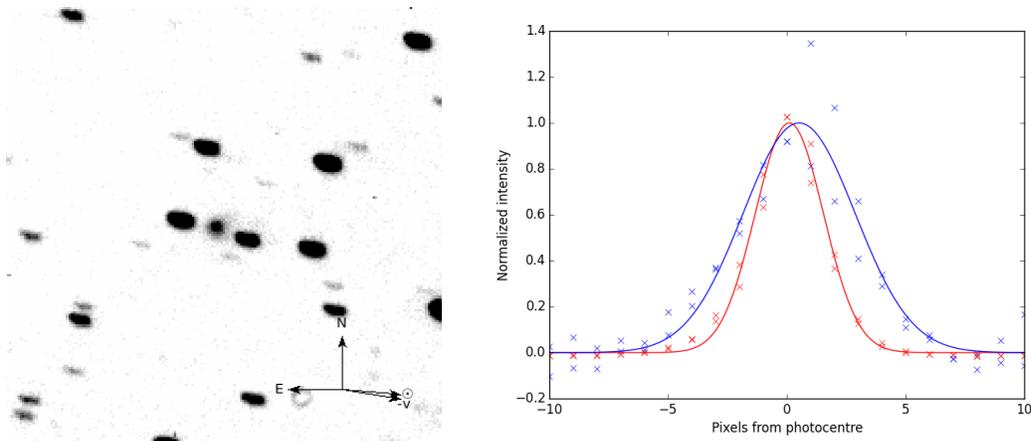


Figura 3.5: (Izquierda) Resultado de co-adicionar 6 imágenes con un tiempo de exposición individual de 70 s tomadas el 29 de Marzo de 2017, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) En azul el perfil de intensidad de 2008 GO₉₈ y en rojo el de estrellas del campo (PSF).

tomando como punto cero el valor del fondo de cielo en las inmediaciones. Para obtener un perfil estelar de comparación se seleccionaron algunas estrellas del mismo campo y cercanas al objeto, y se realizó el mismo procedimiento.

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran para el 5 y el 6 de Septiembre de 2016, respectivamente, las imágenes co-adicionadas obtenidas para 2008 G0₉₈ (a la izquierda) y el perfil de intensidad del objeto comparado con la PSFs estelar del mismo campo (a la derecha). En ambas fechas los perfiles del objeto se muestran ensanchados en comparación con una PSF típica de una estrella, indicando la posibilidad de que el objeto se encuentre efectivamente activo y posea una pequeña coma. En esas fechas el objeto estaba saliendo de su perihelio, con un valor de anomalía verdadera de unos $\sim 3^\circ$.

En la figura 3.5 se muestra la imagen co-adicionada y la comparación de los perfiles de intensidad para el 28 de Marzo de 2017. Esa noche el número de imágenes útiles se vio limitado debido a que 2008 GO₉₈ pasó muy cerca de dos estrellas del campo y

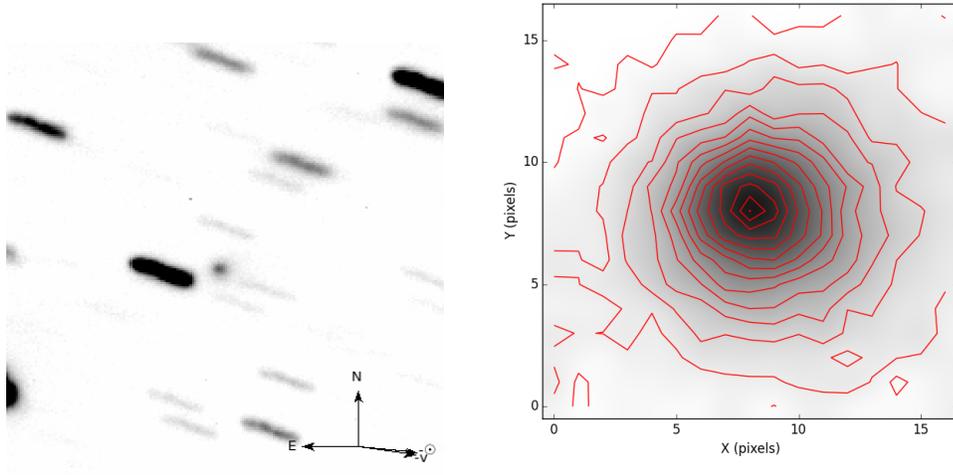


Figura 3.6: (Izquierda) Resultado de co-adicionar 20 imágenes con un tiempo de exposición individual de 70 s tomadas el 30 de Marzo de 2017, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) Diagramas de contornos de intensidad superpuestos sobre la imagen ampliada de 2008 GO₉₈.

algunas imágenes debieron ser desechadas. Nuevamente puede verse que el perfil del objeto es bastante más ancho que la PSF. Mirando cuidadosamente la imagen se puede observar una sutil coma en la dirección antisolar que se refleja como una clara asimetría en el perfil del objeto. Lo mismo sucede con las observaciones del 29 de Marzo. Debido a que a partir del 29 de Marzo la actividad cometaria ya puede apreciarse sin la menor duda en las imágenes, para las siguientes fechas de observación los perfiles de intensidad se reemplazaron por diagramas de contornos de intensidad, donde se aprecia con más claridad la morfología de la coma del objeto.

Los resultados del último turno de observación (24 y 25 de Junio de 2017) se muestran en las figuras 3.6 y 3.7. Sorpresivamente 10 meses después de su paso por el perihelio y con una anomalía verdadera de 60° el objeto muestra una clara e inequívoca naturaleza cometaria. La última noche incluso se puede ver una pequeña cola de polvo. Esta

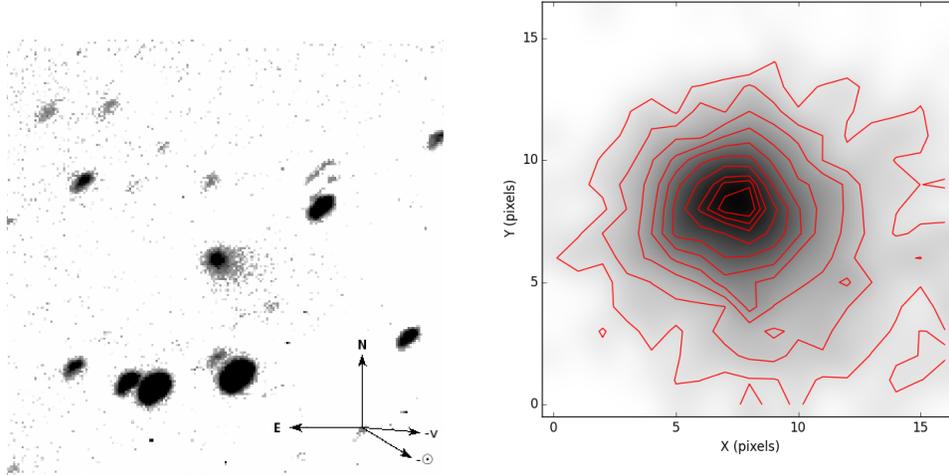


Figura 3.7: (Izquierda) Resultado de co-adicionar 10 imágenes con un tiempo de exposición individual de 360 s tomadas el 24 de Junio de 2017, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) Diagramas de contornos de intensidad superpuestos sobre la imagen ampliada de 2008 GO₉₈.

persistente actividad, varios meses después de su paso por el perihelio, puede estar relacionada con un proceso de inercia térmica que varios autores sugieren como posible explicación para el hecho observacional de que el pico de actividad de muchas cometas se detecta algún tiempo después del paso por el perihelio (Kelley et al., 2013; Schleicher et al., 1998; Knight y Schleicher, 2013).

3.3. Núcleo

Con el objetivo de obtener una estimación para el tamaño del núcleo de 2008 GO₉₈ se utilizó el método desarrollado por Jewitt y Danielson (1984) para encontrar la contribución de la coma, descontar esa contribución del brillo total, inferir entonces la contribución del núcleo y así estimar su tamaño. Esos autores aplicaron este método en

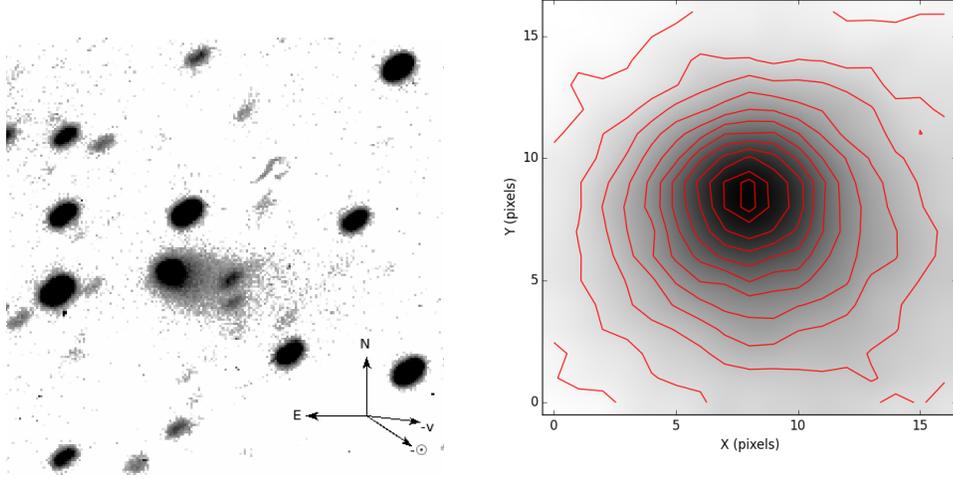


Figura 3.8: (Izquierda) Resultado de co-adicionar 10 imágenes con un tiempo de exposición individual de 360 s tomadas el 25 de Junio de 2017, las referencias son las mismas que para la figura 3.4. (Derecha) Diagramas de contornos de intensidad superpuestos sobre la imagen ampliada de 2008 GO₉₈.

el cometa 1P/Halley cuando se encontraba a largas distancias heliocéntricas, y también fue usado por Mazzotta Epifani et al. (2007) para caracterizar JFCs con bajos niveles de actividad. Para analizar el caso de 2008 GO₉₈ se emplearon las imágenes del 5 de Septiembre de 2016 porque en principio mostraban una coma menos desarrollada.

Si se asume una coma en estado estable, su magnitud m_{coma} dentro de un círculo de radio proyectado ρ en *arcsec* puede ser expresada como:

$$m_{coma} = \Sigma_R(\rho) - 2,5 \log(2\pi\rho^2), \quad (3.1)$$

donde $\Sigma_R(\rho)$ es el brillo superficial (en magnitudes por *arcsec*) a una distancia proyectada ρ del centro del objeto. De esta manera, una vez que se estima la magnitud de la coma podemos calcular a que proporción del brillo total corresponde con:

$$\frac{F_{coma}}{F} = 10^{-0,4(m_{coma}-m)}, \quad (3.2)$$

donde F_{coma} , F , m_{coma} , y m son el flujo de la coma, el flujo total, la magnitud de la coma y la magnitud total, respectivamente. El valor de ρ fue elegido de manera que incluya el 90% del brillo del objeto y se determinó usando la tarea *psfmeasure* de IRAF. Con las ecuaciones 3.1 y 3.2 se obtiene que $\frac{F_{coma}}{F} = 0,67$, lo que indica que la contribución de la coma al brillo total es considerable. Una vez obtenida esta estimación, la magnitud del núcleo es:

$$m_{núcleo} = m - 2,5 \log\left(1 - \frac{F_{coma}}{F}\right). \quad (3.3)$$

En el caso de 2008 GO₉₈ encontramos una estimación para la magnitud estándar total de $m = 16,7 \pm 0,1$, y para el núcleo obtuvimos $m_{núcleo} = 17,9$ que resulta en un valor de $H = 13,15$ para la magnitud absoluta, lo que está en concordancia con el valor publicado en la base de datos de JPL ($H = 13,3$). Este valor de la magnitud del núcleo puede ser usada para derivar su tamaño usando la técnica introducida por Russell (1916) y reformulada para un objeto esférico por Jewitt (1991). La relación entre la magnitud de un objeto esférico y su radio es:

$$p_R \Phi(\alpha) a^2 = 2,238 \times 10^{22} r^2 \Delta^2 10^{0,4(m_{\odot} - m_{nucleus})}, \quad (3.4)$$

donde p_R es el albedo geométrico, $\Phi(\alpha)$ la función de fase ($\Phi(\alpha) = 10^{\alpha\beta}$, α es el ángulo de fase y β es el coeficiente de fase), a es el radio del objeto en metros, r y Δ son las distancias heliocéntrica y geocéntrica respectivamente en unidades astronómicas, y m_{\odot} y $m_{núcleo}$ son las magnitudes del Sol y del núcleo del objeto respectivamente, ambas en el filtro R.

Si bien a partir de la ecuación 3.4 podemos calcular el tamaño del objeto, debemos asumir algunos valores, como el del coeficiente de fase (β) y el albedo (p_R). Si bien, es razonable asumir que 2008 GO₉₈ podría tener propiedades físicas similares a las de

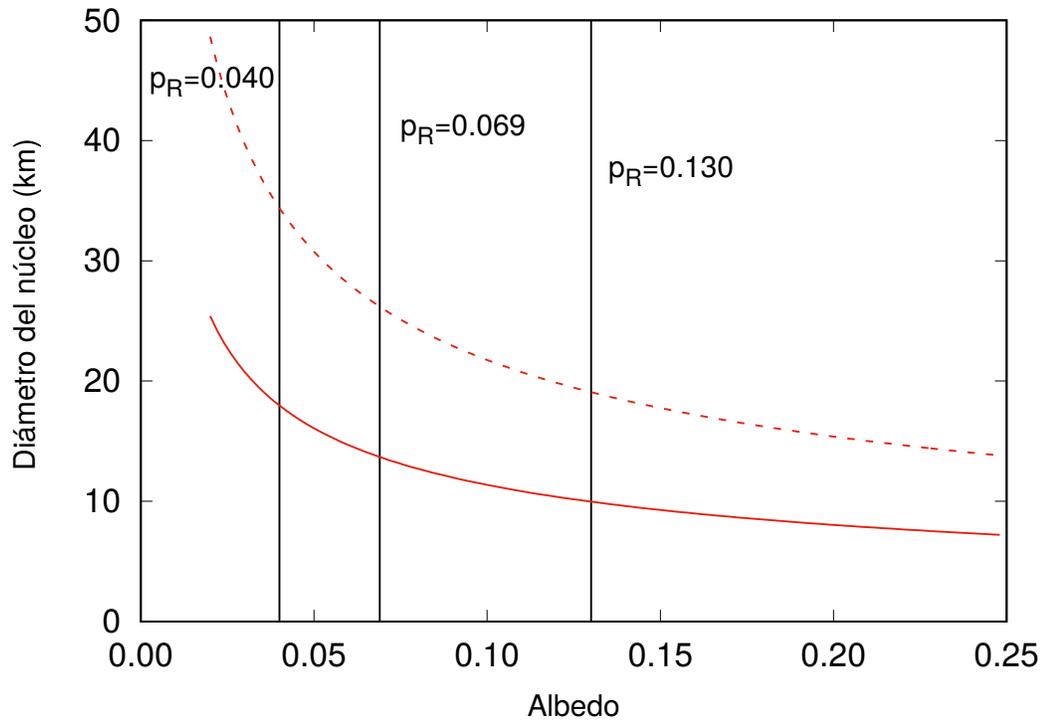


Figura 3.9: Diámetro del núcleo de 2008 GO₉₈ en función del albedo. La curva roja continua corresponde a valores obtenidos con un coeficiente de fase de $\beta = 0,11$ magnitudes por grado, mientras que la curva discontinua corresponde a un valor de $\beta = 0,035$ magnitudes por grado. Las líneas verticales corresponden a valores de albedo de 0,04; 0,069 y 0,13.

la población de JFCs, las integraciones realizadas muestran que este objeto ha arribado recientemente de la zona de Centauros por lo cual no se puede descartar que sus propiedades físicas sean más parecidas a las de esta población. Por lo tanto, se consideraron los valores típicos de β y p_R tanto para las poblaciones de JFCs como para la de Centauros. En el caso de los JFCs el valor de β cae generalmente en el intervalo $0,04 > \beta > 0,03$ magnitudes por grado (Jewitt y Danielson, 1984; Lamy et al., 2004), para los Centauros los valores estimados son algo mayores: Jewitt (2009) usa un valor

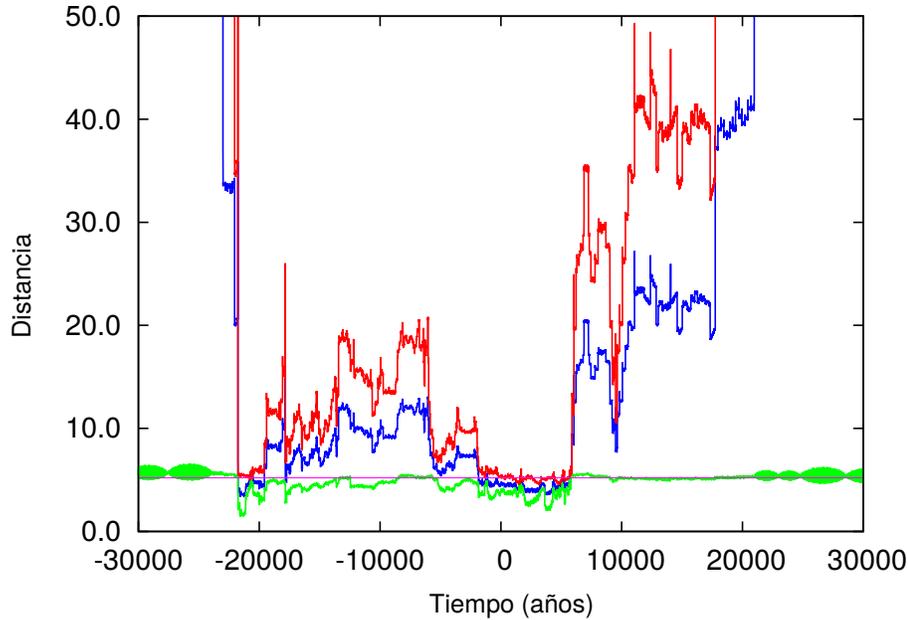


Figura 3.10: Evolución del semieje mayor (azul), y de las distancias perihélica (verde) y afélica (rojo) del objeto 2008 GO₉₈ durante 30.000 años de integración hacia atrás más 30.000 años de integración hacia adelante. $T = 0$ corresponde a las 00:00 hs de TU del 23 de mayo de 2014. El semieje mayor de Júpiter se indica con una línea recta en 5,2 ua.

de $\beta = 0,10$ magnitudes por grado en su estudio de Centauros activos, mientras que Peixinho et al. (2004) propone un valor de $\beta = 0,11$ magnitudes por grado. En el caso del albedo, el valor asumido usualmente para JFCs es $p_R = 0,04$, mientras que para la población de Centauros el albedo está en el rango de $0,025 \leq p_R \leq 0,260$ con un valor medio de $p_R \sim 0,069 \pm 0,039$ (Duffard et al., 2014).

Siguiendo el mismo procedimiento que se usa en Mazzotta Epifani et al. (2017), la figura 3.9 muestra dos curvas para el diámetro en función del albedo utilizando $\beta = 0,035$ y $0,110$ magnitudes por grado, respectivamente. Las líneas verticales indican el albedo medio asumido para JFCs, Centauros, y $p_R = 0,13$ que es el valor medido para dos

Centauros activos (Chiron y 29P/Schwassmann-Wachmann 1; Cruikshank y Brown, 1983; Bus et al., 1989). Tomando estos valores medios, el diámetro estimado para 2008 GO₉₈ es: $15,5 \pm 4$ km o $20,1 \pm 5,4$ km para $p_R = 0,13$ y $p_R = 0,069$, respectivamente.

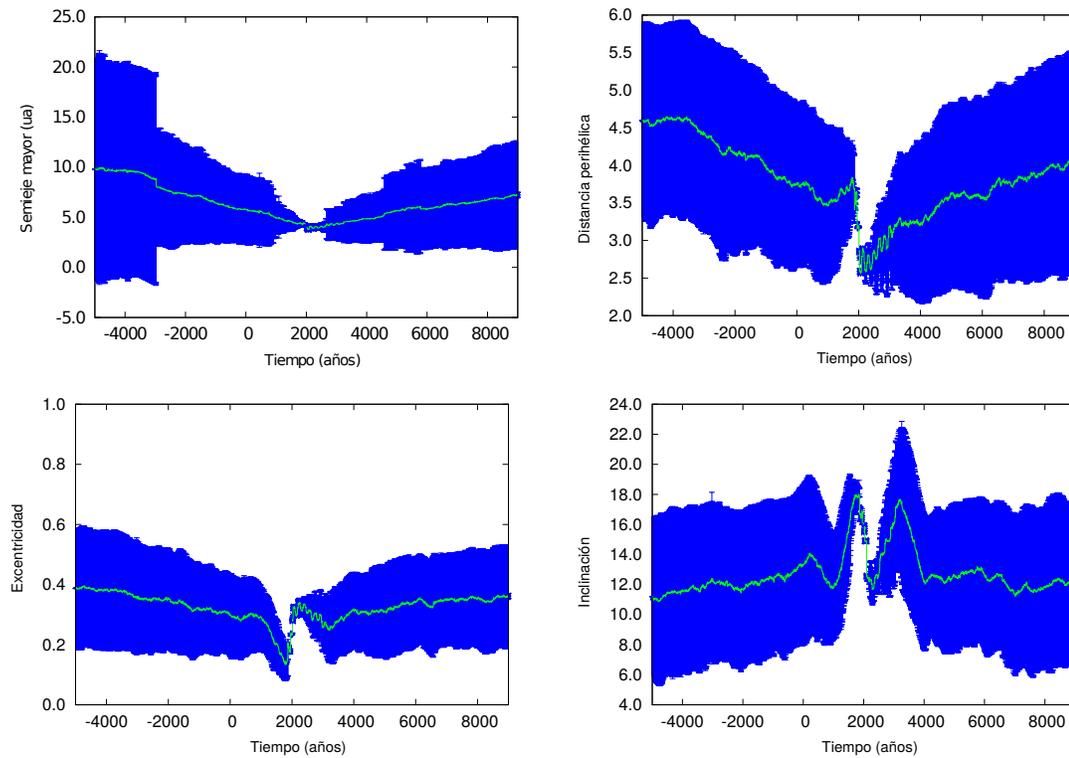


Figura 3.11: Evolución orbital de los elementos orbitales de los 100 clones de 2008 GO₉₈. Arriba a la izquierda el semieje mayor, arriba a la derecha la distancia perihélica, abajo a la izquierda la excentricidad y abajo a la derecha la inclinación. En verde se indica el promedio, y en azul la desviación estándar para cada punto.

3.4. Evolución dinámica

Si bien conocemos el pasado dinámico del objeto, resulta de interés conocer si el objeto permanecerá en esa región del Sistema Solar durante mucho tiempo o si, por el contrario, será expulsado de ella en algún tiempo. Para eso, se integró numéricamente la órbita del objeto hacia adelante durante 30.000 años (en la tabla 3.1 se muestran los elementos orbitales del objeto utilizados en la integración), y junto con el objeto se integraron 100 clones. Las características generales del proceso de integración son las mismas que fueron descriptas en el capítulo anterior.

El análisis del comportamiento de los clones durante la integración nos permite confirmar que la órbita de 2008 GO₉₈ es dinámicamente inestable a escalas de tiempo realmente cortas. La dispersión de los principales elementos orbitales de la nube de clones se expande por un factor de 2 en menos de 10 años hacia atrás y en ~ 20 años hacia adelante. Esto es un claro indicador de la naturaleza caótica de su actual órbita.

La evolución del semieje mayor y de las distancias perihélica y afélica se muestran en la figura 3.10. Si bien en el capítulo anterior ya se analizó el pasado dinámico reciente del objeto, se agregan también en esta figura unos 30.000 años hacia atrás para tener una visión más abarcativa de la dinámica del objeto. Las simulaciones muestran que la órbita del objeto está muy perturbada por Júpiter y que, luego de sufrir una nueva interacción en un encuentro, el objeto es nuevamente eyectado a la región de los Centauros. De manera que este objeto se comporta como QHC durante un muy pequeño lapso de tiempo de 7.000 años centrado aproximadamente en la actualidad.

La evolución del semieje mayor, distancia perihélica, excentricidad e inclinación de los clones se muestra en la figura 3.11, donde se puede apreciar que los frecuentes encuentros de los clones con Júpiter genera una dispersión importante en sus elementos orbitales. Este comportamiento caótico es bastante común en los objetos de la población de Centauros debido a sus frecuentes encuentros con Júpiter y Saturno. Por otro

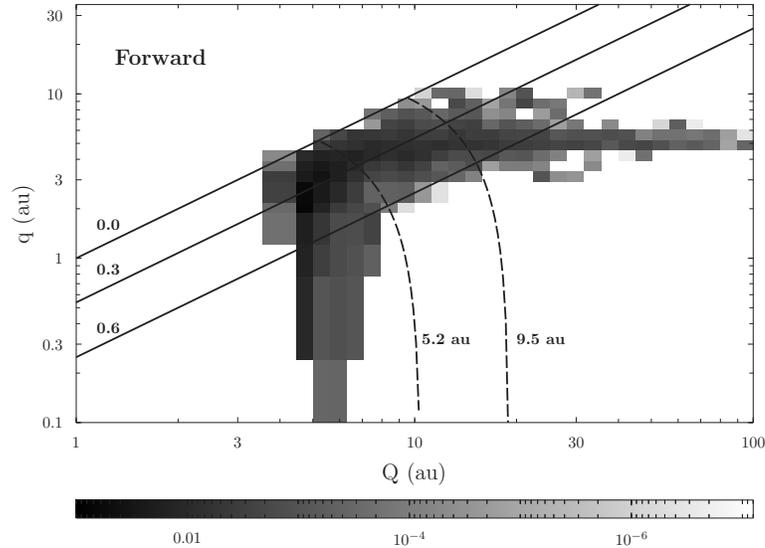


Figura 3.12: Distribución de probabilidad por ua^2 en el espacio $(Q; q)$ de 2008 GO₉₈ para los 30.000 años de integraciones hacia adelante. Las líneas continuas indican excentricidades de 0,0; 0,3 y 0,6. Las líneas intermitentes indican los valores de semieje mayor de Júpiter (5,2 ua) y de Saturno (9,5 ua). La barra de abajo representa la escala de probabilidades.

lado la figura 3.12 muestra la distribución de tiempo promedio de los clones en el plano $(Q; q)$ al igual que la figura 2.18 del capítulo anterior, pero esta vez con las integraciones hacia adelante en el tiempo. Al igual que en las integraciones anteriores de este mismo objeto, también aquí se observa la indudable influencia de Júpiter y, en menor medida, de Saturno en su comportamiento dinámico.

Por último, vale destacar la importancia de los resultados positivos en la búsqueda de actividad de este objeto. No sólo por lo que implican para el estudio de este objeto en particular, si no también porque de alguna manera convalida los resultados obtenidos a partir de las integraciones numéricas. De esta manera, la confirmación de la presencia de hielos en este objeto hacen suponer que es probable que algunos de los otros objetos

seleccionados como candidatos también conserven volátiles en su composición ya que poseen historias dinámicas similares.

Por otro lado, permiten reformular los criterios de búsqueda de actividad, mostrando que es posible la presencia de actividad varios meses después del paso por el perihelio de los objetos.

Capítulo 4

Conclusiones y posibilidades futuras

Durante las últimas décadas, las mejoras instrumentales han permitido detectar objetos con órbitas asteroidales pero que tienen actividad cometaria y viceversa, de manera que la brecha entre cometas y asteroides se ha vuelto más difusa sobre todo en ciertas regiones del Sistema Solar. Una de ellas es la región externa del cinturón principal de asteroides, puntualmente la región de la resonancia 3:2 de movimientos medios con Júpiter. En esta región residen los denominados asteroides del grupo Hilda, un grupo dinámico en configuración altamente estable. A su vez en esta misma región pero en configuraciones inestables se encuentran algunos objetos que provienen de la región de los Centauros, los cometas quasi-Hilda.

Con el objetivo de identificar y detectar objetos de naturaleza cometaria entre la población de los asteroides Hilda, se estudió la población de objetos que habitan esta región del Sistema Solar. Diferenciar ambos grupos no es una tarea sencilla, ya que ambas poblaciones poseen características dinámicas y físicas en común.

Conclusiones de las integraciones numéricas

Se analizó la región de los asteroides Hilda y se encontraron 2439 objetos con valores de semieje mayor en el rango $3,7 \text{ ua} < a < 4,2 \text{ ua}$ y que tuviesen sus órbitas determinadas por observaciones que cubrieran un arco no menor de 180 días.

Siguiendo la metodología utilizada en Toth (2006) se analizó el plano $(q; p)$ de elementos lagrangianos para detectar objetos en configuraciones orbitales inestables y que podrían pertenecer a la población de cometas quasi-Hilda. Se encontraron 277 de estos objetos. Con el objetivo de identificar aquellos que arribaron recientemente a esta región se integraron hacia atrás las órbitas de estos 277 objetos durante 50.000 años.

Se encontraron 11 objetos cuya evolución orbital muestra que han llegado recientemente a la región externa del cinturón de asteroides, donde se encuentran actualmente. Las simulaciones también muestran que estos objetos provienen desde la región de los Centauros, y que en las últimas etapas antes de alcanzar un semieje menor a $5,2 \text{ ua}$ su dinámica ya está altamente influenciada por Júpiter.

Las simulaciones muestran en general órbitas inestables, con variaciones muy abruptas por encuentros con los planetas gigantes y objetos que pasan ciertos periodos de tiempo en órbitas con distancias perihélicas de $q \sim 1 \text{ ua}$. Considerando particularmente esto último, y teniendo en cuenta que se buscan objetos que puedan mostrar actividad cometaria, se hicieron las mismas integraciones para 100 clones de cada uno de los 11 objetos mencionados para tener un punto de vista estadístico sobre su evolución dinámica. Estas simulaciones también muestran una clara influencia de Júpiter en la dinámica de los objetos y aunque en menor grado, también se observa la influencia de Saturno.

Las simulaciones evidencian que ninguno de los 11 objetos seleccionados pasó más de 1.000 años en órbitas con $q \sim 1 \text{ ua}$, lo que indicaría que en el caso de que efectivamente contengan volátiles estos no se habrían sublimado completamente aún ya que de acuerdo con Fernandez (1984) deben pasar unos 4.000-8.000 años para agotarlos. De esta manera los 11 objetos encontrados son candidatos a presentar en algún momento actividad

cometaria.

Conclusiones de las observaciones de 2008 GO₉₈

Si bien encontramos 11 candidatos para ser observados, se ha tenido la oportunidad de observar durante el tiempo necesario y en las cercanías de su perihelio sólo al objeto 2008 GO₉₈. Este objeto tuvo su paso por el perihelio el 21 de Agosto de 2016, lo que representaba una inigualable oportunidad para la búsqueda de actividad y para corroborar los resultados obtenidos en las simulaciones. Este objeto fue observado en varios turnos entre el 5 de Septiembre de 2016 y el 25 de Junio de 2017 con el telescopio de 2,15 m del Complejo Astronómico el Leoncito (CASLEO).

A pesar de que el objeto en las primeras fechas de observación se encontraba muy próximo a su perihelio, las observaciones realizadas esas noches no indicaron en principio actividad cometaria. De manera que se decidió estudiar el perfil de intensidad del objeto y compararlo con perfiles de estrellas de campo (PSF). Estas comparaciones muestran un claro ensanchamiento en el perfil del objeto, lo que evidencia que no se trata de una fuente puntual sino de una fuente extendida producida por la presencia de una coma alrededor del núcleo. En los turnos siguientes la actividad cometaria de 2008 GO₉₈ se aprecia con mayor claridad, e incluso en las observaciones de Junio de 2017 muestra una pequeña cola. Sorpresivamente, la actividad aparente del objeto se incrementó a medida que también lo hizo su anomalía verdadera. De cualquier manera, hay que destacar que en el turno de Junio, el objeto se encontraba más cerca de la Tierra, lo que favorece claramente las observaciones.

Con el objetivo de obtener una estimación del tamaño del núcleo se usaron las imágenes del primer turno de observación cuando la contaminación de la coma era menor. El valor obtenido para el diámetro del núcleo es de $15,5 \pm 4,0$ km para $p_R = 0,13$ y $20,1 \pm 5,4$ km para $p_R = 0,069$. Estos valores están por encima de los valores típicos que uno esperaría para un JFC pero están de acuerdo con los valores obtenidos por

Mazzotta Epifani et al. (2017) para el Centauro activo C/2011 P2 (PANSTARRS). Por otro lado, es posible que la contaminación de la coma haya sido subestimada por el método utilizado y por lo tanto el tamaño del núcleo sobreestimado, por lo que estos valores deben ser considerados como una estimación de primer orden.

La evolución dinámica de 2008 GO₉₈ muestra que su actual órbita es transitoria y que el objeto volverá a la región de los Centauros después de un corto periodo en la zona interior a Júpiter. Es muy probable que el proceso de actividad genere cambios en las características superficiales del objeto alterando su color superficial y, dado que 2008 GO₉₈ regresará a la zona de los Centauros próximamente, este objeto puede representar un ejemplo de cómo la evolución dinámica afectaría el color superficial de los Centauros propuesto por Melita y Licandro (2012).

Posibilidades futuras

Las posibilidades que se desprenden del trabajo son muchas. En primer lugar, lógicamente, queda una gran cantidad de objetos a ser observados con el objetivo de detectar actividad. De todas maneras, poder observar los restantes 10 candidatos depende de sus órbitas, de la geometría con la Tierra en las próximas oposiciones y del tiempo de observación que se disponga. A continuación se enumera cada objeto y la factibilidad de ser observado cerca de su perihelio:

- (18916) 2000 OG44: este objeto tuvo su último paso por el perihelio el 7 de Febrero de 2016. De manera que cuando empezó la campaña observacional, en septiembre de 2016 el objeto tenía una anomalía media de más de 90°. Sumado a que el objeto tenía declinaciones muy altas, resultó imposible de observar desde las instalaciones de CASLEO. Su próximo paso por el perihelio será en el año 2023.
- (371837) 2007 VM₃₁₈: el 12 de Julio de 2011 ocurrió su último paso por el perihelio. Su valor de f entre Septiembre de 2016 y Junio de 2017 pasó de $\sim 220^\circ$ a $\sim 245^\circ$.

Considerando que el objeto tiene un periodo orbital de 7,92 años, resulta una interesante oportunidad para ser observado en 2019. Las integraciones lo muestran como buen candidato a mostrar actividad.

- 2001 QG₂₈₈: este objeto pasó por el perihelio de su órbita el 18 de Febrero de 2018. Pero sus coordenadas hacían imposible su observación desde CASLEO. El objeto tiene un periodo de 8,21 años, de manera que en 2026 pasará nuevamente por el perihelio de su órbita.
- 2002 UP₃₆: es un caso similar al de 2001 QG₂₈₈. El último paso por el perihelio de este objeto ocurrió el 14 de Abril de 2018. Lamentablemente, su posición en el cielo no permitió observarlo en las condiciones necesarias. Su periodo es de 7,86 años, de manera que en 2026 tendrá su próximo paso por el perihelio.
- 2003 UR₂₆₇: el 5 de Septiembre de 2018 el objeto pasó por su perihelio. En ese momento, las coordenadas del objeto no eran propicias para que sea observado. Sin embargo se planea observar el objeto desde CASLEO en Enero de 2019. El objeto tendrá una anomalía verdadera de 59° y una distancia geocéntrica de $1,28 \text{ ua}$, condiciones que pueden ser favorables para la búsqueda de actividad.
- 2006 XL₅: este objeto pasó por el perihelio de su órbita por última vez el 9 de febrero de 2014. Por otro lado, su periodo orbital es de 7,19 años, de manera que este objeto seguirá lejos de su perihelio hasta el año 2021.
- 2007 UC₉: el 25 de Julio de 2015 este objeto pasó por su punto más cercano al Sol por última vez. Con un periodo de 7,5 años, su próximo paso por el perihelio será en el año 2023.
- 2009 KF₃₇: este objeto fue observado desde CASLEO en el turno de Junio de 2017 y también en nuevos turnos otorgados durante 2018, pero en ningún caso pudo

ser detectado, lo que indicaría que se encuentra mucho más débil de lo esperado y que claramente no está activo. De todos modos, se lo seguirá observando para intentar detectarlo.

- 2009 SR₁₄₃: este objeto representa otro caso de aquellos objetos que no pudieron ser observados desde CASLEO por su posición en el cielo. Pasó por su perihelio el 10 de Diciembre de 2016 y pasará nuevamente por ese punto en el año 2024.
- 2013 QR₉₀: el próximo paso por el perihelio de este objeto será en Octubre de 2019, lo que representa una buena oportunidad para que sea observado cerca de ese punto de su órbita.

Más allá de la búsqueda de actividad en los objetos, también puede resultar de interés medir su color superficial ya que, por lo que muestran las integraciones realizadas, se sabe que algunos de ellos han pasado un tiempo considerable en órbitas con valores de $q \sim 1$. Esto podría tener efectos en las características superficiales de sus núcleos y, principalmente, en su color.

Bibliografía

- A'Hearn, M. F., Krishna Swamy, K. S., Wellnitz, D. D., Meier, R., Jul. 2015. Prompt Emission by OH in Comet Hyakutake. *AJ* 150, 5.
- Alvarez-Candal, A., Jan. 2013. SDSS photometry of asteroids in cometary orbits. *A&A* 549, A34.
- Alvarez-Candal, A., Licandro, J., Nov. 2006. The size distribution of asteroids in cometary orbits and related populations. *A&A* 458, 1007–1011.
- Bailey, M. E., Aug. 1983. The structure and evolution of the solar system comet cloud. *MNRAS* 204, 603–633.
- Bailey, M. E., Jan. 1986. The mean energy transfer rate to comets in the Oort cloud and implications for cometary origins. *MNRAS* 218, 1–30.
- Barucci, M. A., Capria, M. T., Coradini, A., Fulchignoni, M., Nov. 1987. Classification of asteroids using G-mode analysis. *Icarus* 72, 304–324.
- Bell, J. F., Davis, D. R., Hartmann, W. K., Gaffey, M. J., 1989. Asteroids - The big picture. In: Binzel, R. P., Gehrels, T., Matthews, M. S. (Eds.), *Asteroids II*. pp. 921–945.

- Bell, J. F., Owensby, P. D., Hawke, B. R., Gaffey, M. J., Mar. 1988. The 52-Color Asteroid Survey: Final Results and Interpretation. In: Lunar and Planetary Science Conference. Vol. 19 of Lunar and Planetary Inst. Technical Report.
- Bessell, M. S., Oct. 1990. UBVRI passbands. *PASP* 102, 1181–1199.
- Binzel, R. P., Rivkin, A. S., Stuart, J. S., Harris, A. W., Bus, S. J., Burbine, T. H., Aug. 2004. Observed spectral properties of near-Earth objects: results for population distribution, source regions, and space weathering processes. *Icarus* 170, 259–294.
- Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Colom, P., Crovisier, J., Henry, F., Lellouch, E., Winberg, A., Johansson, L. E. B., Gunnarsson, M., Rickman, H., Rantakyö, F., Davies, J. K., Dent, W. R. F., Paubert, G., Moreno, R., Wink, J., Despois, D., Benford, D. J., Gardner, M., Lis, D. C., Mehringer, D., Phillips, T. G., Rauer, H., Jun. 2002. The 1995 2002 Long-Term Monitoring of Comet C/1995 O1 (HALE BOPP) at Radio Wavelength. *Earth Moon and Planets* 90, 5–14.
- Bobrovnikoff, N. T., Jan. 1929. The spectra of asteroids (abstract). *Popular Astronomy* 37, 263.
- Bockelée-Morvan, D., Lis, D. C., Wink, J. E., Despois, D., Crovisier, J., Bachiller, R., Benford, D. J., Biver, N., Colom, P., Davies, J. K., Gérard, E., Germain, B., Houde, M., Mehringer, D., Moreno, R., Paubert, G., Phillips, T. G., Rauer, H., Jan. 2000. New molecules found in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). Investigating the link between cometary and interstellar material. *A&A* 353, 1101–1114.
- Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.-M., Levison, H. F., Michel, P., Metcalfe, T. S., Apr. 2002. Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus* 156, 399–433.

- Brown, G., Ziegler, W., 01 1980. Vapor pressure and heats of vaporization and sublimation of liquids and solids of interest in cryogenics below 1-atm pressure. *Adv. Cryog. Eng.* 25, 662–670.
- Brownlee, D., Tsou, P., Aléon, J., et al., Dec. 2006. Comet 81P/Wild 2 Under a Microscope. *Science* 314, 1711.
- Brownlee, D. E., Tsou, P., Anderson, J. D., Hanner, M. S., Newburn, R. L., Sekanina, Z., Clark, B. C., Hörz, F., Zolensky, M. E., Kissel, J., McDonnell, J. A. M., Sandford, S. A., Tuzzolino, A. J., Oct. 2003. Stardust: Comet and interstellar dust sample return mission. *Journal of Geophysical Research (Planets)* 108, 8111.
- Brunini, A., Nov. 2002. Dynamics of the Edgeworth-Kuiper Belt beyond 50 AU. Spread of a primordial thin disk. *A&A* 394, 1129–1134.
- Bus, S. J., Binzel, R. P., Jul. 2002a. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus* 158, 146–177.
- Bus, S. J., Binzel, R. P., Jul. 2002b. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The Observations. *Icarus* 158, 106–145.
- Bus, S. J., Bowell, E., Harris, A. W., Hewitt, A. V., 1989. 2060 Chiron - CCD and electronographic photometry. *Icarus* 77, 223–238.
- Cañada-Assandri, M., Gil-Hutton, R., Ribeiro, A. O., Jan. 2015. The Hungaria population: A comparison between sub-groups. *Planetary and Space Science* 105, 60–64.
- Campins, H., Hargrove, K., Pinilla-Alonso, N., Howell, E. S., Kelley, M. S., Licandro, J., Mothé-Diniz, T., Fernández, Y., Ziffer, J., Apr. 2010. Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 Themis. *Nature* 464, 1320–1321.

- Carruba, V., Nesvorný, D., Aljbaae, S., Huaman, M. E., Jul. 2015. Dynamical evolution of the Cybele asteroids. *MNRAS* 451, 244–256.
- Chamberlin, A. B., McFadden, L.-A., Schulz, R., Schleicher, D. G., Bus, S. J., Jan. 1996. 4015 Wilson-Harrington, 2201 Oljato, and 3200 Phaethon: Search for CN Emission. *Icarus* 119, 173–181.
- Chapman, C. R., Johnson, T. V., McCord, T. B., 1971. A Review of Spectrophotometric Studies of Asteroids. NASA Special Publication 267, 51.
- Chapman, C. R., Morrison, D., Zellner, B., May 1975. Surface Properties of Asteroids: A Synthesis of Polarimetry, Radiometry, and Spectrophotometry. *Icarus* 25, 104–130.
- Cheng, Y.-C., Ip, W.-H., Jun. 2013. Detection of Coma Activity of the ACO/Quasi-Hilda Object 212P/2000YN₃₀. *ApJ* 770, 97.
- Chodas, P. W., Yeomans, D. K., 1996. The orbital motion and impact circumstances of Comet Shoemaker-Levy 9. In: Noll, K. S., Weaver, H. A., Feldman, P. D. (Eds.), *IAU Colloq. 156: The Collision of Comet Shoemaker-Levy 9 and Jupiter*. pp. 1–30.
- Cieza, L. A., Casassus, S., Tobin, J., Bos, S. P., Williams, J. P., Perez, S., Zhu, Z., Caceres, C., Canovas, H., Dunham, M. M., Hales, A., Prieto, J. L., Principe, D. A., Schreiber, M. R., Ruiz-Rodriguez, D., Zurlo, A., Jul. 2016. Imaging the water snow-line during a protostellar outburst. *Nature* 535, 258–261.
- Combi, M. R., Harris, W. M., Smyth, W. H., 2004. Gas dynamics and kinetics in the cometary coma: theory and observations, in *Comets II*, ed. M.C. Festou, H.U. Keller and H.A Weaver (Tucson: University of Arizona Press). pp. 523–552.
- Cruikshank, D. P., Brown, R. H., 1983. The nucleus of comet P/Schwassmann-Wachmann 1. *Icarus* 56, 377–380.

- Cunningham, L. E., Jan. 1950. Periodic Comet Wilson-Harrington (1949g). IAU Circ. 1250.
- Dahlgren, M., Lagerkvist, C.-I., Oct. 1995. A study of Hilda asteroids. I. CCD spectroscopy of Hilda asteroids. *A&A* 302, 907.
- Dahlgren, M., Lagerkvist, C.-I., Fitzsimmons, A., Williams, I. P., Gordon, M., Jul. 1997. A study of Hilda asteroids. II. Compositional implications from optical spectroscopy. *A&A* 323, 606–619.
- Dahlgren, M., Lahulla, J. F., Lagerkvist, C. I., Apr. 1999. A Study of Hilda Asteroids. VI. Analysis of the Lightcurve Properties. *Icarus* 138, 259–267.
- Davis, D. R., Durda, D. D., Marzari, F., Campo Bagatin, A., Gil-Hutton, R., 2002. in *Asteroids III*, ed. W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Tucson: University of Arizona Press). pp. 545–558.
- De Prá, M. N., Pinilla-Alonso, N., Carvano, J. M., Licandro, J., Campins, H., Mothé-Diniz, T., De León, J., Alí-Lagoa, V., Sep. 2018. PRIMASS visits Hilda and Cybele groups. *Icarus* 311, 35–51.
- DeMeo, F., Binzel, R. P., Apr. 2008. Comets in the near-Earth object population. *Icarus* 194, 436–449.
- DeMeo, F. E., Alexander, C. M. O., Walsh, K. J., Chapman, C. R., Binzel, R. P., 2015. The Compositional Structure of the Asteroid Belt. pp. 13–41.
- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., Bus, S. J., Jul. 2009. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus* 202, 160–180.
- DeMeo, F. E., Carry, B., Jan. 2014. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature* 505, 629–634.

- Di Sisto, R. P., Brunini, A., Sep. 2007. The origin and distribution of the Centaur population. *Icarus* 190, 224–235.
- di Sisto, R. P., Brunini, A., de Elía, G. C., Sep. 2010. Dynamical evolution of escaped plutinos, another source of Centaurs. *A&A* 519, A112.
- Di Sisto, R. P., Brunini, A., Dirani, L. D., Orellana, R. B., Mar. 2005. Hilda asteroids among Jupiter family comets. *Icarus* 174, 81–89.
- Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., Santos-Sanz, P., Vilenius, E., Ortiz, J. L., Mueller, T., Fornasier, S., Lellouch, E., Mommert, M., Pal, A., Kiss, C., Mueller, M., Stansberry, J., Delsanti, A., Peixinho, N., Trilling, D., 2014. “TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region. XI. A Herschel-PACS view of 16 Centaurs. *A&A* 564, A92.
- Duncan, M., Quinn, T., Tremaine, S., Nov. 1987. The Formation and Extent of the Solar System Comet Cloud. *AJ* 94, 1330.
- Duncan, M., Quinn, T., Tremaine, S., May 1988. The Origin of Short-Period Comets. *ApJ* 328, L69.
- Edgeworth, K. E., Jan. 1949. The origin and evolution of the Solar System. *MNRAS* 109, 600–609.
- Elst, E. W., Pizarro, O., Pollas, C., Ticha, J., Tichy, M., Moravec, Z., Offutt, W., Marsden, B. G., Aug. 1996. Comet P/1996 N2 (Elst-Pizarro). *IAU Circ.* 6456.
- Emel’Yanenko, V. V., Asher, D. J., Bailey, M. E., Oct. 2007. The fundamental role of the Oort cloud in determining the flux of comets through the planetary system. *MNRAS* 381, 779–789.
- Fanale, F. P., Salvail, J. R., Dec. 1984. An idealized short-period comet model - Surface insolation, H₂O flux, dust flux, and mantle evolution. *Icarus* 60, 476–511.

- Fanale, F. P., Salvail, J. R., Nov. 1989. The water regime of asteroid (1) Ceres. *Icarus* 82, 97–110.
- Fernandez, J. A., Aug. 1980. On the existence of a comet belt beyond Neptune. *MNRAS* 192, 481–491.
- Fernandez, J. A., Jun. 1984. The distribution of the perihelion distances of short-period comets. *A&A* 135, 129–134.
- Fernández, J. A. (Ed.), 2005. Comets - Nature, Dynamics, Origin and their Cosmological Relevance. Vol. 328 of *Astrophysics and Space Science Library*.
- Fernández, J. A., Brunini, A., Jun. 2000. The Buildup of a Tightly Bound Comet Cloud around an Early Sun Immersed in a Dense Galactic Environment: Numerical Experiments. *Icarus* 145, 580–590.
- Fernández, J. A., Gallardo, T., Brunini, A., Oct. 2002. Are There Many Inactive Jupiter-Family Comets among the Near-Earth Asteroid Population? *Icarus* 159, 358–368.
- Fernández, J. A., Gallardo, T., Young, J. D., Sep. 2016. The end states of long-period comets and the origin of Halley-type comets. *MNRAS* 461, 3075–3088.
- Fernández, J. A., Helal, M., Gallardo, T., Sep. 2018. Dynamical evolution and end states of active and inactive Centaurs. *Planet. Space Sci.* 158, 6–15.
- Fernández, J. A., Sosa, A., Dec. 2015. Jupiter family comets in near-Earth orbits: Are some of them interlopers from the asteroid belt? *Planet. Space Sci.* 118, 14–24.
- Fernández, J. A., Sosa, A., Gallardo, T., Gutiérrez, J. N., Aug. 2014. Assessing the physical nature of near-Earth asteroids through their dynamical histories. *Icarus* 238, 1–12.

- Fernández, Y. R., Jewitt, D. C., Sheppard, S. S., Jul. 2005. Albedos of Asteroids in Comet-Like Orbits. *AJ* 130, 308–318.
- Fernández, Y. R., McFadden, L. A., Lisse, C. M., Helin, E. F., Chamberlin, A. B., Jul. 1997. Analysis of POSS Images of Comet-Asteroid Transition Object 107P/1949 W1 (Wilson-Harrington). *Icarus* 128, 114–126.
- Fitzsimmons, A., Bowdley, D., Bedient, J., Asher, D. J., Lowry, S. C., Snodgrass, C., Martin, I., Taylor, A. D., Hormuth, F., Sonnenberg, K., Kurtze, L., Jennings, E. S., Edmondson, G. W., Fendius, S. M., Wassermann-Fry, S. D. W., Skilton, J. L., Kaddooka, M., Hu, S., Hang, M., Jeong, I., Jennings, W. A. H., Ng Lung Kit, B., Sanne, A. N. D. M., Galbraith, I. J., Fish, J. M., Stratas, S. Y., Wong, P., McAdams, J., Hughes, J. S., Allen, A. S. E., Barry, C. J., Fitch, M. J., Lewis, A. F., Watson, R. A., Morgan, M. E., Longfellow, I. E., Oct. 2005. Minor Planet Observations [F65 Haleakala-Faulkes Telescope North]. *Minor Planet Circulars* 54982, 2.
- Fitzsimmons, A., Dahlgren, M., Lagerkvist, C.-I., Magnusson, P., Williams, I. P., Feb. 1994. A spectroscopic survey of D-type asteroids. *A&A* 282, 634–642.
- Fornasier, S., Mottola, S., Keller, H. U., Barucci, M. A., Davidsson, B., Feller, C., Deshapriya, J. D. P., Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., A'Hearn, M., Agarwal, J., Bertaux, J.-L., Bertini, I., Besse, S., Cremonese, G., Da Deppo, V., Debei, S., De Cecco, M., Deller, J., El-Maarry, M. R., Fulle, M., Groussin, O., Gutierrez, P. J., Güttler, C., Hofmann, M., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, M. L., Lazzarin, M., Moreno, J. J. L., Marzari, F., Massironi, M., Naletto, G., Oklay, N., Pajola, M., Pommerol, A., Preusker, F., Scholten, F., Shi, X., Thomas, N., Toth, I., Tubiana, C., Vincent, J.-B., Dec. 2016. Rosetta's comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sheds its dusty mantle to reveal its icy nature. *Science* 354, 1566–1570.

- Francis, P. J., Dec. 2005. The Demographics of Long-Period Comets. *ApJ* 635, 1348–1361.
- Froeschle, C., Scholl, H., Sep. 1989. The three principal secular resonances ν_5 , ν_6 , and ν_{16} in the asteroidal belt. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 46, 231–251.
- Fulle, M., 2004. Motion of cometary dust, in *Comets II*, ed. M. C. Festou et al. (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press). pp. 565–575.
- García-Migani, E., Gil-Hutton, R., Aug. 2015. Análisis morfológico de comas cometarias. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina* 57, 248–250.
- Gicquel, A., Vincent, J.-B., Agarwal, J., A’Hearn, M. F., Bertini, I., Bodewits, D., Sierks, H., Lin, Z.-Y., Barbieri, C., Lamy, P. L., Rodrigo, R., Koschny, D., Rickman, H., Keller, H. U., Barucci, M. A., Bertaux, J.-L., Besse, S., Cremonese, G., Da Deppo, V., Davidsson, B., Debei, S., Deller, J., De Cecco, M., Frattin, E., El-Maarry, M. R., Fornasier, S., Fulle, M., Groussin, O., Gutiérrez, P. J., Gutiérrez-Marquez, P., Güttler, C., Höfner, S., Hofmann, M., Hu, X., Hviid, S. F., Ip, W.-H., Jorda, L., Knollenberg, J., Kovacs, G., Kramm, J.-R., Kührt, E., Küppers, M., Lara, L. M., Lazzarin, M., Moreno, J. J. L., Lowry, S., Marzari, F., Masoumzadeh, N., Massironi, M., Moreno, F., Mottola, S., Naletto, G., Ockay, N., Pajola, M., Pommerol, A., Preusker, F., Scholten, F., Shi, X., Thomas, N., Toth, I., Tubiana, C., Nov. 2016. Sublimation of icy aggregates in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko detected with the OSIRIS cameras on board Rosetta. *MNRAS* 462, S57–S66.
- Gil-Hutton, R., Brunini, A., Feb. 2008. Surface composition of Hilda asteroids from the analysis of the Sloan Digital Sky Survey colors. *Icarus* 193, 567–571.
- Gil-Hutton, R. A., 2004. Evolución colisional en el Sistema Solar. Ph.D. thesis, UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA.

- Gradie, J., Tedesco, E., Jun. 1982. Compositional structure of the asteroid belt. *Science* 216, 1405–1407.
- Gundlach, B., Blum, J., May 2016. Why are Jupiter-family comets active and asteroids in cometary-like orbits inactive?. How hydrostatic compression leads to inactivity. *A&A* 589, A111.
- Hahn, G., Rickman, H., Mar. 1985. Asteroids in cometary orbits. *Icarus* 61, 417–442.
- Hicks, M. D., Buratti, B. J., Newburn, R. L., Rabinowitz, D. L., Feb. 2000. Physical Observations of 1996 PW and 1997 SE5: Extinct Comets or D-Type Asteroids? *Icarus* 143, 354–359.
- Hills, J. G., Nov. 1981a. Comet showers and the steady-state infall of comets from the Oort cloud. *AJ* 86, 1730–1740.
- Hills, J. G., Nov. 1981b. Comet showers and the steady-state infall of comets from the Oort cloud. *AJ* 86, 1730–1740.
- Hirayama, K., Oct. 1918. Groups of asteroids probably of common origin. *AJ* 31, 185–188.
- Howell, E. S., 1995. Probing Asteroid Composition Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy. Ph.D. thesis, THE UNIVERSITY OF ARIZONA.
- Hsieh, H. H., Jewitt, D., Apr. 2006. A Population of Comets in the Main Asteroid Belt. *Science* 312, 561–563.
- Hsieh, H. H., Jewitt, D., Pittichova, J., Apr. 2006. Comet P/1999 RE₇₀ = (118401). *IAU Circ.* 8704.
- Hsieh, H. H., Novaković, B., Kim, Y., Brassier, R., Feb. 2018. Asteroid Family Associations of Active Asteroids. *AJ* 155, 96.

- Ip, W.-H., Fernandez, J. A., Aug. 1997. On dynamical scattering of Kuiper Belt Objects in 2:3 resonance with Neptune into short-period comets. *A&A* 324, 778–784.
- Ishiguro, M., Ham, J.-B., Tholen, D. J., Elliott, G. T., Micheli, M., Niwa, T., Sakamoto, M., Matsuda, K., Urakawa, S., Yoshimoto, K., Sarugaku, Y., Usui, F., Hasegawa, S., Iwata, I., Ozaki, S., Kuroda, D., Ootsubo, T., Jan. 2011a. Search for the Comet Activity of 107P/(4015) Wilson-Harrington during 2009/2010 Apparition. *ApJ* 726, 101.
- Ishiguro, M., Hanayama, H., Hasegawa, S., Sarugaku, Y., Watanabe, J.-i., Fujiwara, H., Terada, H., Hsieh, H. H., Vaubaillon, J. J., Kawai, N., Yanagisawa, K., Kuroda, D., Miyaji, T., Fukushima, H., Ohta, K., Hamanowa, H., Kim, J., Pyo, J., Nakamura, A. M., Nov. 2011b. Interpretation of (596) Scheila's Triple Dust Tails. *ApJ* 741, L24.
- Jewitt, D., 1991. Cometary photometry. In: Newburn, Jr., R. L., Neugebauer, M., Rahe, J. (Eds.), *IAU Colloq. 116: Comets in the post-Halley era*. Vol. 167 of *Astrophysics and Space Science Library*. pp. 19–65.
- Jewitt, D., Jan. 2005. A First Look at the Damocloids. *AJ* 129, 530–538.
- Jewitt, D., Apr. 2006. Comet D/1819 W1 (Blanpain): Not Dead Yet. *AJ* 131, 2327–2331.
- Jewitt, D., May 2009. The Active Centaurs. *AJ* 137, 4296–4312.
- Jewitt, D., Mar. 2012. The Active Asteroids. *AJ* 143, 66.
- Jewitt, D., Dec. 2015. Color Systematics of Comets and Related Bodies. *AJ* 150, 201.
- Jewitt, D., Danielson, G. E., 1984. Charge-coupled device photometry of Comet P/Halley. *Icarus* 60, 435–444.
- Jewitt, D., Hui, M.-T., Mutchler, M., Weaver, H., Li, J., Agarwal, J., Oct. 2017. A Comet Active Beyond the Crystallization Zone. *ApJ* 847, L19.

- Jewitt, D., Luu, J., Apr. 1993. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB₁. *Nature* 362, 730–732.
- Jewitt, D., Sheppard, S., Fernández, Y., Jun. 2003. 143P/Kowal-Mrkos and the Shapes of Cometary Nuclei. *AJ* 125, 3366–3377.
- Jewitt, D. C., Feb. 2002. From Kuiper Belt Object to Cometary Nucleus: The Missing Ultrared Matter. *AJ* 123, 1039–1049.
- Joswiak, D. J., Brownlee, D. E., Nguyen, A. N., Messenger, S., Aug. 2017. Refractory materials in comet samples. *Meteoritics and Planetary Science* 52, 1612–1648.
- Kelley, M. S., Fernández, Y. R., Licandro, J., Lisse, C. M., Reach, W. T., A’Hearn, M. F., Bauer, J., Campins, H., Fitzsimmons, A., Groussin, O., Lamy, P. L., Lowry, S. C., Meech, K. J., Pittichová, J., Snodgrass, C., Toth, I., Weaver, H. A., Jul. 2013. The persistent activity of Jupiter-family comets at 3-7 AU. *Icarus* 225, 475–494.
- Kim, Y., Ishiguro, M., Usui, F., Jul. 2014. Physical Properties of Asteroids in Comet-like Orbits in Infrared Asteroid Survey Catalogs. *ApJ* 789, 151.
- Knight, M. M., Schleicher, D. G., Feb. 2013. The highly unusual outgassing of Comet 103P/Hartley 2 from narrowband photometry and imaging of the coma. *Icarus* 222, 691–706.
- Kokotanekova, R., Snodgrass, C., Lacerda, P., Green, S. F., Lowry, S. C., Fernández, Y. R., Tubiana, C., Fitzsimmons, A., Hsieh, H. H., Nov. 2017. Rotation of cometary nuclei: new light curves and an update of the ensemble properties of Jupiter-family comets. *MNRAS* 471, 2974–3007.
- Kosai, H., Mar. 1992. Short-period comets and Apollo-Amor-Aten type asteroids in view of Tisserand invariant. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 54, 237–240.

- Kresak, L., 1979. in *Asteroids*, ed. T Gehrels, & M. S. Matthews (Tucson: University of Arizona Press). pp. 289–309.
- Kresak, L., Feb. 1980. Dynamics, interrelations and evolution of the systems of asteroids and comets. *Moon and Planets* 22, 83–98.
- Kresak, L., May 1982. On the reality and genetic association of comet groups and pairs. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia* 33, 150–160.
- Kuiper, G. P., Jan. 1951. On the Origin of the Solar System. In: Hynek, J. A. (Ed.), 50th Anniversary of the Yerkes Observatory and Half a Century of Progress in Astrophysics. p. 357.
- Lamy, P. L., Toth, I., Fernandez, Y. R., Weaver, H. A., 2004. *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, & H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson. pp. 223–264.
- Levison, H. F., Jan. 1996. Comet Taxonomy. In: Rettig, T., Hahn, J. M. (Eds.), *Completing the Inventory of the Solar System*. Vol. 107. pp. 173–191.
- Levison, H. F., Duncan, M. J., Mar. 1994. The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets. *Icarus* 108, 18–36.
- Levison, H. F., Duncan, M. J., May 1997. From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets. *Icarus* 127, 13–32.
- Licandro, J., Alí-Lagoa, V., Tancredi, G., Fernández, Y., Jan. 2016. Size and albedo distributions of asteroids in cometary orbits using WISE data. *A&A* 585, A9.
- Licandro, J., Alvarez-Candal, A., de León, J., Pinilla-Alonso, N., Lazzaro, D., Campins, H., Apr. 2008. Spectral properties of asteroids in cometary orbits. *A&A* 481, 861–877.

- Licandro, J., Campins, H., Jan. 2010. Are the main belt comets, comets? In: Fernandez, J. A., Lazzaro, D., Prialnik, D., Schulz, R. (Eds.), *Icy Bodies of the Solar System*. Vol. 263. pp. 215–217.
- Licandro, J., Campins, H., Kelley, M., Fernández, Y., Delbó, M., Reach, W. T., Groussin, O., Lamy, P. L., Toth, I., A’Hearn, M. F., Bauer, J. M., Lowry, S. C., Fitzsimmons, A., Lisse, C. M., Meech, K. J., Pittichová, J., Snodgrass, C., Weaver, H. A., Dec. 2009a. Spitzer observations of the asteroid-comet transition object and potential spacecraft target 107P (4015) Wilson-Harrington. *A&A* 507, 1667–1670.
- Licandro, J., Campins, H., Kelley, M., Fernández, Y., Delbó, M., Reach, W. T., Groussin, O., Lamy, P. L., Toth, I., A’Hearn, M. F., Bauer, J. M., Lowry, S. C., Fitzsimmons, A., Lisse, C. M., Meech, K. J., Pittichová, J., Snodgrass, C., Weaver, H. A., Dec. 2009b. Spitzer observations of the asteroid-comet transition object and potential spacecraft target 107P (4015) Wilson-Harrington. *A&A* 507, 1667–1670.
- Licandro, J., Campins, H., Kelley, M., Hargrove, K., Pinilla-Alonso, N., Cruikshank, D., Rivkin, A. S., Emery, J., Jan. 2011. (65) Cybele: detection of small silicate grains, water-ice, and organics. *A&A* 525, A34.
- Licandro, J., de León, J., Pinilla, N., Serra-Ricart, M., Jan. 2006. Multi-wavelength spectral study of asteroids in cometary orbits. *Advances in Space Research* 38, 1991–1994.
- Licandro, J., Tancredi, G., Lindgren, M., Rickman, H., Hutton, R. G., Sep. 2000. CCD Photometry of Cometary Nuclei, I: Observations from 1990-1995. *Icarus* 147, 161–179.
- Lowry, S. C., Weissman, P. R., Aug. 2003. CCD observations of distant comets from Palomar and Steward Observatories. *Icarus* 164, 492–503.

- Luu, J. X., Jewitt, D. C., Jun. 1992. High resolution surface brightness profiles of near-earth asteroids. *Icarus* 97, 276–287.
- Marboeuf, U., Schmitt, B., Petit, J.-M., Mousis, O., Fray, N., Jun. 2012. A cometary nucleus model taking into account all phase changes of water ice: amorphous, crystalline, and clathrate. *A&A* 542, A82.
- Marochnik, L. S., Mukhin, L. M., Sagdeev, R. Z., Oct. 1988. Estimates of Mass and Angular Momentum in the Oort Cloud. *Science* 242, 547–550.
- Marsden, B. G., Williams, G. V., 1992. Catalogue of cometary orbits.
- Mazzotta Epifani, E., Palumbo, P., Capria, M. T., Cremonese, G., Fulle, M., Colangeli, L., 2007. The distant activity of short-period comets - I. *MNRAS* 381, 713–722.
- Mazzotta Epifani, E., Palumbo, P., Capria, M. T., Cremonese, G., Fulle, M., Colangeli, L., Oct. 2008. The distant activity of Short Period Comets - II. *MNRAS* 390, 265–280.
- Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Di Fabrizio, L., Dall’Ora, M., Palumbo, P., Snodgrass, C., Licandro, J., Della Corte, V., Tozzi, G. P., Jan. 2014a. Observational results for eight long-period comets observed far from the Sun. *A&A* 561, A6.
- Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Dotto, E., Palumbo, P., Dall’Ora, M., Micheli, M., Ieva, S., Perozzi, E., Jan. 2017. Nucleus of the active Centaur C/2011 P2 (PANSTARRS). *A&A* 597, A59.
- Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Licandro, J., Dall’Ora, M., Palumbo, P., Dotto, E., Barucci, M. A., Brucato, J. R., Della Corte, V., Tozzi, G. P., May 2014b. Blending the distinctions among groups of minor bodies: a portrait of the Centaur-comet “transition” object P/2010 C1 (Scotti). *A&A* 565, A69.

- McCord, T. B., Gaffey, M. J., Oct. 1974. Asteroids: Surface Composition from Reflection Spectroscopy. *Science* 186, 352–355.
- Melita, M. D., Licandro, J., 2012. Links between the dynamical evolution and the surface color of the Centaurs. *A&A* 539, A144.
- Mommert, M., Hora, J. L., Harris, A. W., Reach, W. T., Emery, J. P., Thomas, C. A., Mueller, M., Cruikshank, D. P., Trilling, D. E., Delbo, M., Smith, H. A., Jan. 2014. The Discovery of Cometary Activity in Near-Earth Asteroid (3552) Don Quixote. *ApJ* 781, 25.
- Morbidelli, A., May 1997. Chaotic Diffusion and the Origin of Comets from the 2/3 Resonance in the Kuiper Belt. *Icarus* 127, 1–12.
- Morbidelli, A., Brown, M. E., Levison, H. F., Jun. 2003. The Kuiper Belt and its Primordial Sculpting. *Earth Moon and Planets* 92, 1–27.
- Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., Gomes, R., May 2005. Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature* 435, 462–465.
- Mothé-Diniz, T., Carvano, J. M. á., Lazzaro, D., Mar. 2003. Distribution of taxonomic classes in the main belt of asteroids. *Icarus* 162, 10–21.
- Mumma, M. J., Charnley, S. B., Sep. 2011. The Chemical Composition of Comets—Emerging Taxonomies and Natal Heritage. *ARA&A* 49, 471–524.
- Murray, C. D., Dermott, S. F., 1998. *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press.
- Nakamura, T., Noguchi, T., Tanaka, M., Zolensky, M. E., Kimura, M., Tsuchiyama, A., Nakato, A., Ogami, T., Ishida, H., Uesugi, M., Yada, T., Shirai, K., Fujimura, A., Okazaki, R., Sandford, S. A., Ishibashi, Y., Abe, M., Okada, T., Ueno, M., Mukai,

- T., Yoshikawa, M., Kawaguchi, J., Aug. 2011. Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites. *Science* 333, 1113.
- Nesvorný, D., Brož, M., Carruba, V., 2015. Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families. pp. 297–321.
- Nesvorný, D., Ferraz-Mello, S., Dec. 1997. On the Asteroidal Population of the First-Order Jovian Resonances. *Icarus* 130, 247–258.
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., Dones, L., Levison, H. F., Kaib, N., Morbidelli, A., Aug. 2017. Origin and Evolution of Short-period Comets. *ApJ* 845, 27.
- Ohtsuka, K., Ito, T., Yoshikawa, M., Asher, D. J., Arakida, H., Oct. 2008. Quasi-Hilda comet 147P/Kushida-Muramatsu. Another long temporary satellite capture by Jupiter. *A&A* 489, 1355–1362.
- Oort, J. H., Jan. 1950. The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands* 11, 91–110.
- Peixinho, N., Boehnhardt, H., Belskaya, I., Doressoundiram, A., Barucci, M. A., Delsanti, A., 2004. ESO large program on Centaurs and TNOs: visible colors - final results. *Icarus* 170, 153–166.
- Perna, D., Dotto, E., Barucci, M. A., Mazzotta Epifani, E., Vilenius, E., Dall’Ora, M., Fornasier, S., Müller, T. G., Jun. 2013. Photometry and taxonomy of trans-Neptunian objects and Centaurs in support of a Herschel key program. *A&A* 554, A49.
- Quinn, T., Tremaine, S., Duncan, M., Jun. 1990. Planetary Perturbations and the Origin of Short-Period Comets. *ApJ* 355, 667.

- Read, M. T., Bressi, T. H., Gehrels, T., Scotti, J. V., Christensen, E. J., Oct. 2005. Comet P/2005 U1 (Read). IAU Circ. 8624.
- Reinhard, R., May 1986. The Giotto encounter with comet Halley. *Nature* 321, 313–318.
- Rickman, H., Fernandez, J. A., Gustafson, B. A. S., Oct. 1990. Formation of stable dust mantles on short-period comet nuclei. *A&A* 237, 524–535.
- Rivkin, A. S., Emery, J. P., Apr. 2010. Detection of ice and organics on an asteroidal surface. *Nature* 464, 1322–1323.
- Roig, F., Nesvorný, D., Dec. 2015. The Evolution of Asteroids in the Jumping-Jupiter Migration Model. *AJ* 150, 186.
- Russell, H. N., 1916. On the Albedo of the Planets and Their Satellites. *ApJ* 43, 173–196.
- Sagdeev, R. Z., Szabo, F., Avanesov, G. A., Cruvellier, P., Szabo, L., Szego, K., Abergel, A., Balazs, A., Barinov, I. V., Bertaux, J. L., Blamont, J., Demaille, M., Demareis, E., Dul'nev, G. N., Endroczy, G., Gardos, M., Kanyo, M., Kostenko, V. I., Krasikov, V. A., Nguyen-Trong, T., Nyitrai, Z., Reny, I., Ruzsnyak, P., Shamis, V. A., Smith, B., Sukhanov, K. G., Szabo, F., Szalai, S., Tarnopolsky, V. I., Toth, I., Tsukanova, G., Valnicek, B. I., Varhalmi, L., Zaiko, Y. K., Zatsepin, S. I., Ziman, Y. L., Zsenei, M., Zhukov, B. S., May 1986. Television observations of comet Halley from Vega spacecraft. *Nature* 321, 262–266.
- Schleicher, D. G., Millis, R. L., Birch, P. V., Apr. 1998. Narrowband Photometry of Comet P/Halley: Variation with Heliocentric Distance, Season, and Solar Phase Angle. *Icarus* 132, 397–417.
- Schorghofer, N., Jul. 2008. The Lifetime of Ice on Main Belt Asteroids. *ApJ* 682, 697–705.

- Schubart, J., Mar. 1968. Long-Period Effects in the Motion of Hilda-Type Planets. *AJ* 73.
- Schubart, J., Oct. 1982. Three characteristic parameters of orbits of Hilda-type asteroids. *A&A* 114, 200–204.
- Schubart, J., Jan. 1991. Additional results on orbits of Hilda-type asteroids. *A&A* 241, 297–302.
- Schulz, R., Aug. 2009. Rosetta—one comet rendezvous and two asteroid fly-bys. *Solar System Research* 43, 343–352.
- Sheppard, S. S., Trujillo, C., Feb. 2015. Discovery and Characteristics of the Rapidly Rotating Active Asteroid (62412) 2000 SY178 in the Main Belt. *AJ* 149, 44.
- Smoluchowski, R., Feb. 1981. Amorphous ice and the behavior of cometary nuclei. *ApJ* 244, L31–L34.
- Smoluchowski, R., Torbett, M., Sep. 1984. The boundary of the solar system. *Nature* 311, 38.
- Takir, D., Emery, J. P., Jun. 2012. Outer Main Belt asteroids: Identification and distribution of four 3- μ m spectral groups. *Icarus* 219, 641–654.
- Tancredi, G., May 2012. The “Main-Belt Comets” are Not Comets, but Shaken Asteroids. In: *Asteroids, Comets, Meteors 2012*. Vol. 1667. p. 6202.
- Tancredi, G., May 2014. A criterion to classify asteroids and comets based on the orbital parameters. *Icarus* 234, 66–80.
- Tholen, D. J., Sep. 1984. Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry. Ph.D. thesis, THE UNIVERSITY OF ARIZONA.

- Tiscareno, M. S., Malhotra, R., Dec. 2003. The Dynamics of Known Centaurs. *AJ* 126, 3122–3131.
- Toth, I., Mar. 2006. The quasi-Hilda subgroup of ecliptic comets - an update. *A&A* 448, 1191–1196.
- Trujillo, C. A., Luu, J. X., Bosh, A. S., Elliot, J. L., Nov. 2001. Large Bodies in the Kuiper Belt. *AJ* 122, 2740–2748.
- Vaghi, S., Apr. 1973. The Origin of Jupiter's Family of Comets. *A&A* 24, 41.
- Wang, Z., Chen, X., Gao, F., Zhang, S., Zheng, X.-W., Ip, W.-H., Wang, N., Liu, X., Zuo, X.-T., Gou, W., Chang, S.-Q., Dec. 2017. Observations of the Hydroxyl Radical in C/2013 US10 (Catalina) at 18 cm Wavelength. *AJ* 154, 249.
- Weaver, H. A., Nov. 1988. The volatile composition of comets. Tech. rep.
- Weissman, P. R., Jan. 1979. Physical and Dynamical Evolution of Long-Period Comets. In: Duncombe, R. L. (Ed.), *Dynamics of the Solar System*. Vol. 81. p. 277.
- Weissman, P. R., Apr. 1990. The Oort cloud. *Nature* 344, 825–830.
- Weissman, P. R., Jan. 1996. The Oort Cloud. In: Rettig, T., Hahn, J. M. (Eds.), *Completing the Inventory of the Solar System*. Vol. 107. pp. 265–288.
- Wetherill, G. W., Sep. 1987. Dynamical relations between asteroids, meteorites and Apollo-Amor objects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 323, 323–337.
- Wierzchos, K., Womack, M., Sarid, G., May 2017. Carbon Monoxide in the Distantly Active Centaur (60558) 174P/Echeclus at 6 au. *AJ* 153, 230.

- Wood, X. H. J., Kuiper, G. P., May 1963. Photometric Studies of Asteroids. *ApJ* 137, 1279.
- Xu, S., Binzel, R. P., Burbine, T. H., Bus, S. J., May 1995. Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey: initial results. *Icarus* 115, 1–35.
- Yamamoto, T., Kozasa, T., Sep. 1988. The cometary nucleus as an aggregate of planetesimals. *Icarus* 75, 540–551.
- Zellner, B., Sep. 1973. Polarimetric Albedos of Asteroids. In: *Bulletin of the American Astronomical Society*. Vol. 5. p. 388.
- Zellner, B., Thirunagari, A., Bender, D., Jun. 1985a. The large-scale structure of the asteroid belt. *Icarus* 62, 505–511.
- Zellner, B., Tholen, D. J., Tedesco, E. F., Mar. 1985b. The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets. *Icarus* 61, 355–416.
- Ziffer, J., Campins, H., Licandro, J., Pinilla-Alonso, N., Fernandez, Y., Bus, S. J., Dec. 2005. Near Infrared Spectra of two Asteroids with low Tisserand Invariant. *Earth Moon and Planets* 97, 203–212.

Anexo

En este anexo se adjuntan las publicaciones finales de los trabajos científicos que forman parte de esta Tesis doctoral. La primera de las publicaciones que se adjuntan es “Comet candidates among quasi-Hilda objects” por Gil-Hutton y García-Migani, *Astronomy & Astrophysics* **590**, A111, del año 2016, que corresponde a los resultados mostrados en el Capítulo 2. El segundo trabajo se titula “The activity and dynamical evolution of quasi-hilda asteroid (457175) 2008 GO98” por García-Migani y Gil-Hutton, *Planetary and Space Science* **611**, 12, año 2018, cuyos resultados se incluyen en el Capítulo 3.

Comet candidates among quasi-Hilda objects

R. Gil-Hutton^{1,2} and E. García-Migani¹

¹ Grupo de Ciencias Planetarias, Complejo Astronómico El Leoncito, UNLP, UNC, UNSJ, CONICET, Av. España 1512 sur, J5402DSP, San Juan, Argentina
e-mail: rgilhutton@casleo.gov.ar

² Universidad Nacional de San Juan, J. I. de la Roza 590 oeste, 5400 Rivadavia, San Juan, Argentina

Received 25 January 2016 / Accepted 9 April 2016

ABSTRACT

Aims. We present the results of a search for quasi-Hilda comets. We wanted to find objects that have recently arrived from the Centaur zone that could become active near the perihelion of their orbits.

Methods. Two hundred and seventy-seven objects from the ASTORB database were selected following a dynamical criteria to constrain the unstable quasi-Hilda region. These objects were integrated backward 50 000 yr in order to identify those that have recently arrived from the outer regions of the solar system.

Results. The backward integration showed that 11 objects could be Centaurs or transneptunian objects that ended their dynamical evolution as quasi-Hilda comets. The dynamical evolution of these objects from a statistical point of view was studied by computing the time-averaged distribution of a number of clones as a function of the aphelion and perihelion distances. All the candidates show a dynamical behavior that is expected for comets injected in the inner solar system from the Centaur or transneptunian regions and reaching the quasi-Hilda region.

Key words. minor planets, asteroids: general – comets: general

1. Introduction

Comets are objects that have a nucleus of mixed ice and dust and are characterized by their activity when they reach the inner solar system. Among them, the Jupiter-family comets (JFCs) are a group of the cometary population with unstable orbits that are strongly affected by the gravitational perturbation of Jupiter. These objects have evolved from the transneptunian region and have reached the zone inside the Jupiter orbit after suffering the perturbations of the external planets during the period they behaved as Centaurs (Fernández 1980; Duncan et al. 1995; Levison & Duncan 1997).

One of the outermost dynamically stable zones of the asteroid belt is the Hilda region, where a group of asteroids is trapped in the 3:2 mean motion resonance with Jupiter (Schubart 1968, 1982, 1991; Nesvorný & Ferraz-Mello 1997; Ferraz-Mello et al. 1998). These objects have semimajor axes in the range $3.7 \leq a \leq 4.2$ au, eccentricities $e \leq 0.3$, and inclinations $i \leq 20^\circ$; the critical argument for the resonance librates around 0° (Zellner et al. 1985). During the last century, several JFCs have stayed in the Hilda region, but in an unstable 3:2 mean motion resonance with Jupiter. They have moved from outside of Jupiter's orbit to inside the orbit, and some of them have undergone a temporary satellite capture by this planet (e.g., Carusi & Valsecchi 1979). These objects were called quasi-Hilda comets (QHCs) by Kresak (1979) and currently there are several comets in this region, including the pre-captured orbit of D/Shoemaker-Levy 9 (Chodas & Yeomans 1996).

The quasi-Hilda region is not only occupied by the QHCs, but it is also visited by Hilda objects escaping from the stable mean motion resonance. Di Sisto et al. (2005) performed numerical simulations to study the dynamical evolution of Hilda asteroids and found that 99% of the objects escaping from the

resonance behave like JFCs, at least during the first 1000 yr. From the physical point of view, it is not easy to differentiate between escaped Hildas and QHCs because both populations are mainly D- and P-types (Fitzsimmons et al. 1994; Dahlgren & Lagerkvist 1995; Dahlgren et al. 1997, 1999; Jewitt 2002; Gil-Hutton & Brunini 2008); to distinguish comets from asteroids in the external zone of the main belt it is necessary to study the orbital evolution of these objects.

After the suggestion of Di Sisto et al. that escaped Hildas and asteroids in the quasi-Hilda region could show a dynamical behavior similar to that of JFCs, Toth (2006) gave an update of the QHCs in this zone, found new members of this cometary group, and identified 23 objects that could be dormant or extinct comet nuclei. Recently, Cheng & Ip (2013) have detected coma activity in the quasi-Hilda object 2000 YN₃₀, presently known as 212P/NEAT, and have shown that 47 000 yr ago it could have been captured into a short-period orbit from a Centaur-like orbit as a result of a close encounter with Jupiter.

We searched for new QHCs candidates by looking for objects that have recently arrived in the quasi-Hilda region from the Centaur zone. In Sect. 2 we explain how the objects were selected and in Sect. 3 we present the results. Finally, in Sect. 4 we summarize our conclusions.

2. Selection criteria

We extracted from the ASTORB database¹ the orbital elements for all the asteroids with semimajor axis in the range $3.7 \leq a \leq 4.2$ au and an orbital arc spanned by the observations used in the orbit computation greater than 180 days. This first sample includes 2439 objects that fulfill the selection criteria.

¹ See <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>

Table 1. Quasi-Hilda objects coming from the outer solar system.

Object	a	e	i deg.	H	T yr
(18916) 2000 OG ₄₄	3.847	0.586	7.42	14.5	-10 200
(371837) 2007 VM ₃₁₈	3.975	0.199	17.45	14.2	-8700
2001 QG ₂₈₈	4.074	0.426	3.99	16.2	-2200
2002 UP ₃₆	3.946	0.442	1.35	16.5	-13 000
2003 UR ₂₆₇	3.795	0.528	6.14	16.9	-12 400
2006 XL ₅	3.727	0.514	4.52	16.8	-21 000
2007 UC ₉	3.833	0.314	19.81	15.2	-16 000
2008 GO ₉₈	3.978	0.284	15.46	15.1	-1700
2009 KF ₃₇	4.071	0.321	11.49	15.9	1100
2009 SR ₁₄₃	3.872	0.524	5.90	16.4	-1000
2013 QR ₉₀	3.720	0.220	7.04	16.3	-29 500

Notes. The columns list the asteroid number, semimajor axis, eccentricity, inclination, absolute magnitude, and the time when the object reached $a > 5.2$ au.

Then, following [Toth \(2006\)](#) we define the quasi-Hilda region in Lagrangian elements where the orbits are unstable. The horizontal and vertical components of the eccentricity in Lagrangian elements are

$$k = e \cos(\varpi - \varpi_J), \quad h = e \sin(\varpi - \varpi_J), \quad (1)$$

where e and ϖ are the eccentricity and the longitude of perihelion of the object, respectively, and ϖ_J is the longitude of the perihelion of Jupiter. The objects in the unstable quasi-Hilda zone are those that have elements outside a circle with center $(k, h) \approx (0.075, 0)$ and radius ~ 0.24 ([Toth 2006](#)). This final sample contains 277 objects.

Since we are interested in objects that have recently arrived in the quasi-Hilda region, we integrate these 277 objects backward in time for 50 000 yr looking for changes in their semimajor axes that put them into the Centaur zone ($a > 5.2$ au). We used a Bulirsch-Stoer integrator with a step size of 1 day, and included all the planets from Mercury to Neptune. We found 11 objects that had a dynamical evolution showing they could recently have come from the outer solar system. They are listed in Table 1.

As an example, in Fig. 1 we show the evolution of the semimajor axis, and the perihelion and aphelion distances of (18916) 2000 OG₄₄ during the 50 000 yr backward integration. This object jumps to a Jupiter's external orbit at -10 200 yr changing its perihelion distance with the semimajor axis and semimajor axis with the aphelion distance. Later, it is captured in several mean-motion resonances and reaches the transneptunian belt at $\approx -27 000$ yr. The other objects have a similar behavior.

3. Results

The backward integration showed that these objects could be Centaurs or transneptunian objects that ended their dynamical evolution as QHCs, but owing to the uncertainties in their initial orbital elements the integration scheme could be affected by numerical effects that produce an incorrect final result. Then, it is important to study the dynamical evolution of these objects from a statistical point of view by integrating clones of each candidate and following the same procedure used to identify them and computing the time spent by each particle in different combinations of orbital elements to obtain statistical results of the dynamical behavior of the original object. One possibility for estimating the dynamical evolution of these QHCs is to obtain the time-averaged distribution of the clones as a

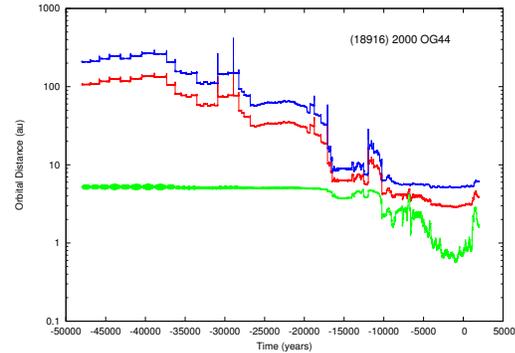


Fig. 1. Dynamical evolution of the semimajor axis (red line), perihelion (green), and aphelion (blue) distances for the object (18916) 2000 OG₄₄ during the numerical integration.

function of the aphelion (Q) and perihelion (q) distances (e.g., [Tiscareno & Malhotra 2003](#)) dividing the coordinate plane into grids of $0.5 \text{ au} \times 0.5 \text{ au}$. Figures 2 and 3 show in a gray scale the time spent by 100 clones of each candidate per 0.25 au^2 in the (Q, q) plane during a backward integration of 50 000 yr, which could be interpreted as the probability of finding a clone in a certain point of the grid in that period.

In all the cases shown in Figs. 2 and 3 it is possible to observe a strong influence of Jupiter and Saturn on the dynamical evolution of these objects indicated by horizontal strips with q almost fixed at ~ 5 au and, to a lesser extent, ~ 10 au. These two patterns are produced by the gravitational scattering of the particles by these planets to larger aphelion distances. This behavior is what would be expected of comets injected in the inner solar system from the Centaur or transneptunian regions and is similar to that found by [Tiscareno & Malhotra \(2003\)](#) for the Centaur population, indicating that the candidates found could have originated in the outer solar system and reached the quasi-Hilda region by the gravitational scattering of the giant planets.

On the other hand, the probability distributions shown in Figs. 2 and 3 indicate that almost all the candidates could visit the region where $q < 1$ au. If these objects were in fact comets they could be affected by strong activity due to the outgassing

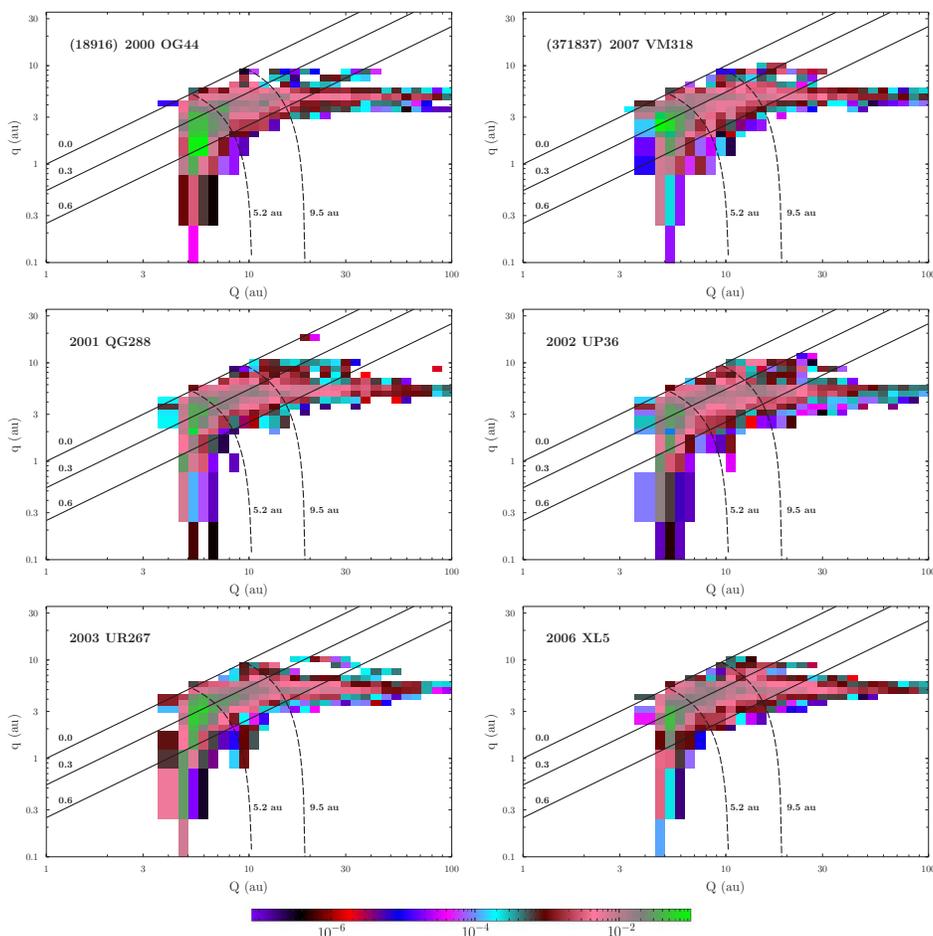


Fig. 2. Probability distribution per square au in (Q, q) space for the clones of (18916)2000 OG₄₄, (371837)2007 VM₃₁₈, 2001 QG₂₈₈, 2002 UP₃₆, 2003 UR₂₆₇, and 2006 XL₅. Continuous black lines indicate eccentricities of 0.0, 0.3, and 0.6, and dashed lines indicate semimajor axes of 5.2 and 9.5 au.

produced by their perihelion passage and they could become dormant or inactive comets. Fernández (1984) found that the average physical lifetime for short-period comets with $q \sim 1$ au is $\approx 500\text{--}1000$ revolutions or $\approx 4\text{--}8 \times 10^3$ yr for objects in an orbit with a semimajor axis of ~ 4 au. Since this period is not very long and it is also an order of magnitude shorter than the total integration time used, it is important to test if any one of the comet candidates remained in an orbit with $q < 1$ au for at least $\approx 10^3$ yr since this could indicate that it has a high probability of becoming inactive. The average time that the clones of the comet candidates stay in orbits with $q < 1$ au is 429 ± 21 yr for (18916)2000 OG₄₄, 162 ± 13 yr for (371837)2007 VM₃₁₈, 189 ± 14 yr for 2001 QG₂₈₈, 349 ± 19 yr for 2002 UP₃₆, 733 ± 27 yr for 2003 UR₂₆₇, 93 ± 10 yr for 2006 XL₅, 174 ± 13 yr for 2007 UC₉, 387 ± 20 yr for 2008 GO₉₈, 104 ± 10 yr for 2009 KF₃₇, 494 ± 22 yr for 2009 SR₁₄₃, and $< 1 \pm 0.05$ yr for 2013 QR₉₀.

Thus, the best candidates that will show cometary activity in the near future are (371837)2007 VM₃₁₈, 2013 QR₉₀, 2006 XL₅, 2009 KF₃₇, 2007 UC₉, and 2001 QG₂₈₈.

The best way to test whether these objects are comets is to observe them near the perihelion of their orbits and to search for cometary activity. They will be difficult to observe because these objects are very small: assuming a 4% albedo and the absolute magnitudes listed in Table 1, their diameters are between 9.6 and 2.8 km. Three of our best candidates (2007 VM₃₁₈, 2013 QR₉₀, 2006 XL₅) are now near the aphelion of their orbits: 2009 KF₃₇ had its perihelion passage in July 2015, and the other two, 2007 UC₉ and 2001 QG₂₈₈, will be at perihelion in September 2017 and February 2018, respectively. The other five objects in our list will be at perihelion during 2016 (2000 OG₄₄, 2008 GO₉₈, and 2009 SR₁₄₃) and 2018 (2002 UP₃₆ and 2003 UR₂₆₇), but the simulations show a high probability

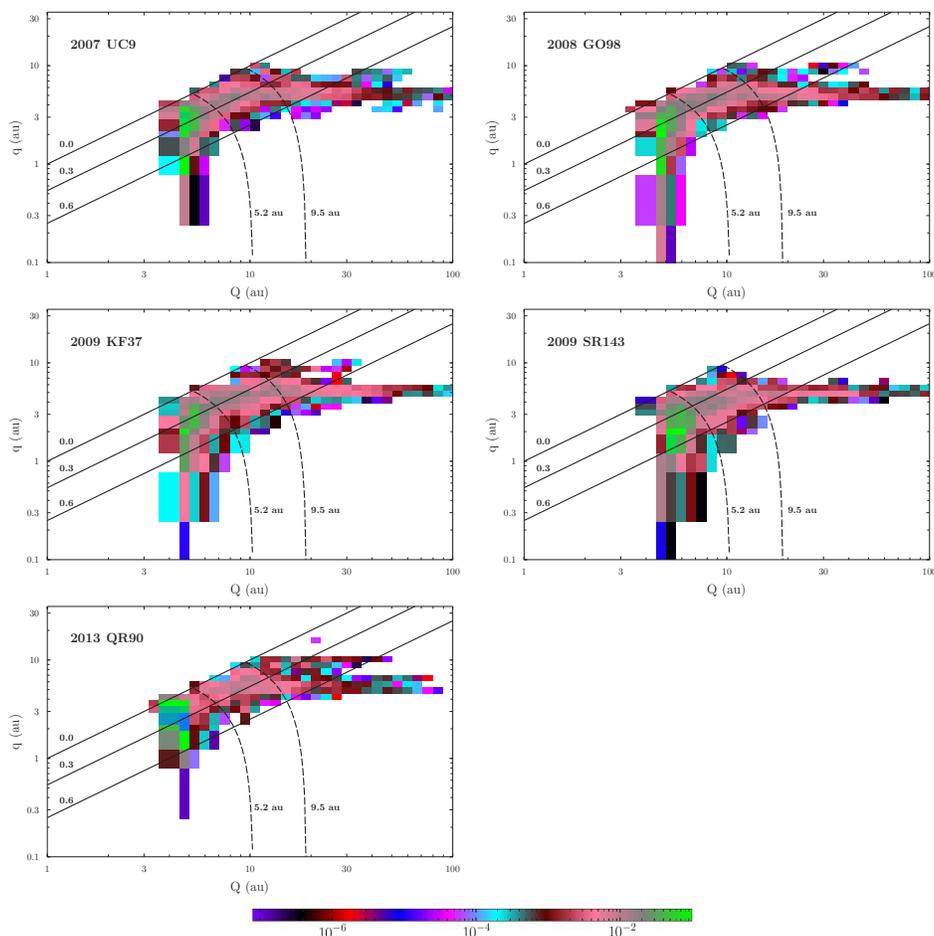


Fig. 3. Probability distribution per square au in (Q, q) space for the clones of 2007 UC₉, 2008 GO₉₈, 2009 KF₃₇, 2009 SR₁₄₃, and 2013 QR₉₀. Continuous black lines indicate eccentricities of 0.0, 0.3, and 0.6, and dashed lines indicate semimajor axes of 5.2 and 9.5 au.

that they spent some time in orbits with $q < 1$ and therefore they have already exhausted their volatile material.

4. Conclusions

The dynamical evolution of 277 objects with unstable orbits in the quasi-Hilda region were analyzed to search for those that have arrived in the last 50 000 yr and could have their origin in the Centaur region. These objects were originally selected from the ASTORB database considering asteroids with semimajor axes in the range $3.7 \leq a \leq 4.2$ au, orbital arcs spanned by the observations greater than 180 days, and Lagrangian elements indicating that their orbits are unstable (Toth 2006).

The orbits of these objects were integrated backward in time to look for changes that put them into the Centaur zone; there are 11 candidates that had a dynamical evolution showing they could have recently come from the outer solar system.

The analysis indicates that almost all the candidates could visit the inner region of the solar system and five of them could be affected by strong activity, occasionally becoming dormant or inactive comets. The remaining five candidates have a good chance of still being active and will pass the perihelion of their orbits during the following 2–3 yr, offering a good opportunity to detect activity on them.

Acknowledgements. The authors thank the referee, J. A. Fernández, for his useful review, which led to an improvement of the paper. R.G.H. gratefully acknowledges financial support by CONICET through PIP 114-201101-00358.

References

- Carusi, A., & Valsecchi, G. B. 1979, in *Asteroids*, ed. T. Gehrels (Tucson: Univ. of Arizona Press), 391
- Cheng, Y., -C., & Ip, W. -H. 2013, *ApJ*, **770**, 97

R. Gil-Hutton and E. García-Migani: Comet candidates among quasi-Hilda objects

- Chodas, P. W., & Yeomans, D. K. 1996, in *The collision of comet Shoemaker-Levy 9 and Jupiter*, eds. K. S. Noll, H. A. Weaver, & P. D. Feldman (Tucson: Cambridge Univ. Press), 1
- Dahlgren, M., & Lagerkvist, C.-I. 1995, *A&A*, **302**, 907
- Dahlgren, M., Lagerkvist, C.-I., Fitzsimmons, A., et al. 1997, *A&A*, **323**, 606
- Dahlgren, M., Lahulla, J. F. & Lagerkvist, C.-I. 1999, *Icarus*, **138**, 259
- Di Sisto, R. P., Brunini, A., Dirani, L., & Orellana, R. B. 2005, *Icarus*, **174**, 81
- Duncan, M., Levison, H., & Budd, S. 1995, *AJ*, **110**, 3070
- Fernández, J. A. 1980, *MNRAS*, **192**, 481
- Fernández, J. A. 1984, *A&A*, **135**, 129
- Ferraz-Mello, S., Nesvorný, D., & Michtchenko, T. A. 1998, in *Solar System Formation and Evolution*, eds. D. Lazzaro, R. Vieira Martins, S. Ferraz-Mello, J. Fernández, & C. Beaugé (San Francisco), *ASP Conf. Ser.*, **149**, 65
- Fitzsimmons, A., Dahlgren, M., Lagerkvist, C.-I., et al. 1994, *A&A*, **282**, 634
- Gil-Hutton, R., & Brunini, A. 2008, *Icarus*, **193**, 56
- Jewitt, D. C. 2002, *AJ*, **123**, 1039
- Kresak, L. 1979, in *Asteroids*, ed. T. Gehrels (Tucson: Univ. of Arizona Press), 289
- Levison, H., & Duncan, M. 1997, *Icarus*, **127**, 13
- Nesvorný, D., & Ferraz-Mello, S. 1997, *Icarus*, **130**, 247
- Schubart, J. 1968, *AJ*, **73**, 99
- Schubart, J. 1982, *A&A*, **114**, 200
- Schubart, J. 1991, *A&A*, **241**, 297
- Tiscareno, M. S., & Malhotra, R. 2003, *ApJ*, **126**, 3122
- Toth, I. 2006, *A&A*, **448**, 1191
- Zellner, B., Thirunagari, A., & Bender, D. 1985, *Icarus*, **62**, 505



Contents lists available at ScienceDirect

Planetary and Space Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/pss

The activity and dynamical evolution of quasi-hilda asteroid (457175) 2008 GO98[☆]

E. García-Migani^{*}, R. Gil-Hutton

Grupo de Ciencias Planetarias, Departamento de Geofísica y Astronomía, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan - CONICET, Av. José I. de la Roza 590 (O), J5402DCS Rivadavia, San Juan, Argentina

ARTICLE INFO

Keywords:
Comets
Centaur
Minor planets
Asteroids

ABSTRACT

The quasi-Hilda asteroid (457175) 2008 GO98 was found in a previous study as a good candidate to show cometary activity since it seems to come from the Centaurs region. The object was observed in the post-perihelion arc of its orbit during several runs between September 2016 and June 2017 with the 2.15 m telescope at Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) in San Juan, Argentina. The images obtained were analyzed and the object was observed active with a small coma that grew in size and brightness as the object moved away from the perihelion of the orbit, while in June 2017 it also showed a small tail. In order to get an estimation of the diameter of the nucleus the coma contribution has been calculated and subtracted to find values of 15.5 ± 4.0 km and 20.1 ± 5.4 km for albedos of $p_R = 0.13$ and $p_R = 0.069$, respectively. To understand the recent dynamical evolution of (457175) 2008 GO98, the orbit of the object and those of 100 clones were numerically integrated backward and forward in time for 30000 yr. The dynamical evolution confirms that this object is a recent incomer from the outer region of the solar system but it will return to this region in a short period of time indicating that its present dynamical state is rather transient.

1. Introduction

Jupiter-family comets (JFCs) are objects that reach the inner solar system after a dynamical evolution that took them from the trans-neptunian region, pass through the external planets zone where they behaved as Centaurs, and finish their journey as objects characterized by orbits inside Jupiter's showing activity when they approach the perihelion of their orbits. In their final state as JFCs these objects have unstable orbits that are strongly affected by the gravitational perturbation of Jupiter (Fernandez, 1980; Duncan et al., 1995; Levison and Duncan, 1997).

Several JFCs arrived the inner region of the solar system to stay in an unstable 3 : 2 mean motion resonance with Jupiter. The comets were called *quasi-Hilda comets* (QHCs) by Kresak (1979) and currently there are several objects in this region which also have undergone a temporary satellite capture by Jupiter during their passage from outside to inside the orbit of this planet (i.e., Ohtsuka et al., 2008). This resonance is also populated by a group of asteroids in stable orbits called the Hilda group (Schubart, 1968, 1982; 1991; Nesvorný and Ferraz-Mello, 1997;

Ferraz-Mello et al., 1998) with semimajor axes in the range $3.7 \leq a \leq 4.2$ au, eccentricities $e \leq 0.3$, inclinations $i \leq 20^\circ$, and a critical argument for the resonance librating around 0° (Zellner et al., 1985).

Unfortunately, the quasi-Hilda region is also visited by Hilda objects escaping from the stable region of the mean motion resonance making difficult to differentiate between these objects and QHCs without a study of their orbital evolution. Toth (2006) gave an update of the QHCs in this region, found new members, and identified 23 objects that could be dormant or extinct comet nuclei, while Gil-Hutton and García-Migani (2016) searched for new QHCs candidates that have recently arrived at this zone from the Centaur region and found 11 objects that show a dynamical behavior that is expected for comets injected in the quasi-Hilda region from outside the orbit of Jupiter. A possible method to confirm their cometary nature is to search for signals of activity of some kind that indicate mass loss triggered by sublimation of volatile material.

Then, we started an observational campaign from Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), Argentina, to search for activity on the QHCs candidates listed by Gil-Hutton and García-Migani (2016). Recently, one of these quasi-hilda objects, (457175) 2008 GO98, was

[☆] Based on observations carried out at the Complejo Astronómico El Leoncito, operated under agreement between the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina and the National Universities of La Plata, Córdoba, and San Juan.

^{*} Corresponding author.

E-mail addresses: egarciamigani@conicet.gov.ar (E. García-Migani), ricardo.gil-hutton@conicet.gov.ar (R. Gil-Hutton).

<https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.03.011>

Received 22 December 2017; Received in revised form 7 March 2018; Accepted 20 March 2018

Available online 24 March 2018

0032-0633/© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

reported as active on July 2017 by (Leonard et al., 2017) with a coma of $7 - 8$ arcsec in diameter and a tail, so it is an excellent candidate to study its activity and dynamical evolution.

In this paper we present results for this object indicating that it was active since few months before the Leonard et al. detection and we also make an analysis of its dynamical evolution. The data acquisition, the reduction process and the observational results are explained in Sections 2 and 3. In Section 4 we analyze the dynamical evolution of (457175) 2008 GO98, and the summary and conclusions are given in Section 5.

2. Observations

The quasi-hilda object (457175) 2008 GO98 was discovered by the Spacewatch Team at Kitt Peak on April 8, 2008. It has a period of 7.89 yr and a Tisserand parameter with Jupiter of $T_J = 2.927$. Its orbital parameters were taken from the JPL Horizon Database¹ and are listed in Table 1. The last perihelion passage of this object was August 21, 2016.

The object was observed in several runs between September 5, 2016 and June 25, 2017, with the 2.15 m telescope at Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) in San Juan, Argentina. For all the observations a focal reducer was used obtaining a plate scale of 33.9 arcsec mm^{-1} and a circular useful field of 9 arcmin. The detector is a thinned back-illuminated, coated CCD with 2048×2048 square pixels with size of $13.5 \mu m$ and installed on a dewar cooled with liquid nitrogen, resulting in a negligible dark current ($< 1 e^-/h/pixel$). The CCD was configured with a 2×2 on-chip binning resulting in a scale of 0.9 arcsec/pixel. Although, in this way we lose resolution to resolve a potential coma of the object, we gain signal-to-noise which is observationally advantageous since it is a faint object for our telescope. Finally, a broadband R filter of the Johnson-Cousins system was also used in order to try to detect a dust coma and/or tail.

All the images were corrected by bias and flat-fielding in the standard way using tasks and scripts available in IRAF. Each night, 10 zero-exposure frames and 10 twilight flat-fields were taken and averaged to obtain final images with enough good signal-to-noise ratio. The flat-fields exposure times were long enough to avoid any shutter effect. In order to obtain the best possible quality in the images of the object we avoid the use of removal algorithms to correct for cosmic rays, and preferred to reject any image with cosmic rays near the target. The observation conditions were good, except the first part of the night of the second run (March 29, 2017) which was affected by some cirrus. The images acquired in those conditions were discarded and only six individual images with enough good quality were used from that night.

A summary of the observational circumstances for all the nights are shown in Table 2, where the heliocentric distance (r), the geocentric distance (Δ), the phase angle (α), the true anomaly (f) and the number of individual images taken in each night are listed. In Fig. 1 the orbit of (457175) 2008 GO98 and Jupiter are shown, where the perihelia are marked with crosses and the positions of the object when it was observed are indicated by squares.

To avoid elongated images the exposure time of the individual images

Table 1
Orbital parameters of (457175) 2008 GO98 for the Epoch Dec 04, 2015 TDB.

Element	Value	Uncertainty (1σ)
Semimajor axis (au)	3.9646070	3.6988×10^{-7}
Eccentricity	0.2809973	3.9189×10^{-7}
Inclination (deg)	15.56866	2.9514×10^{-5}
Ascending node (deg)	192.60859	4.6882×10^{-5}
Argument of pericenter (deg)	53.28665	1.2159×10^{-4}
Mean anomaly (deg)	327.17517	8.5168×10^{-5}

¹ <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>.

Table 2
Observing circumstances for (457175) 2008 GO98.

Date	r^a	Δ^b	α^c	f^d	n^e
0 UT	au	au	deg	deg	
2016-Sep-05	2.851	3.111	18.8	3.2	$16 \times 60s$
2016-Sep-06	2.851	3.122	18.7	3.4	$30 \times 60s$
2017-Mar-29	3.072	3.475	16.1	47.9	$6 \times 70s$
2017-Mar-30	3.074	3.465	16.2	48.1	$20 \times 75s$
2017-Jun-24	3.254	2.572	15.0	64.3	$10 \times 360s$
2017-Jun-25	3.257	2.563	14.8	64.5	$10 \times 360s$

(^a) Heliocentric distance; (^b) geocentric distance; (^c) phase angle; (^d) true anomaly; (^e) number of individual images and their exposure times.

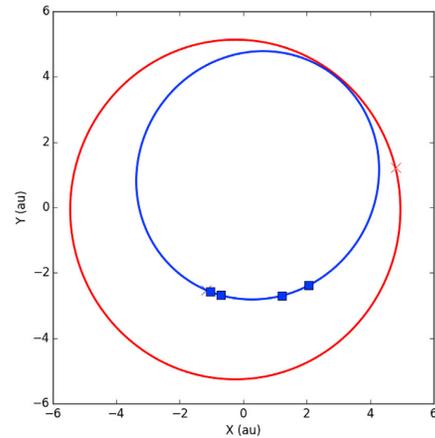


Fig. 1. Orbit of (457175) 2008 GO98 in blue with the positions of our observations in 2016 and 2017 marked with blue squares. The orbit of Jupiter is plotted in red. Both Jupiter and 2008 GO98 perihelion are indicated with crosses. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

was limited by the angular velocity of the object and the requirement that it does not move more than half a pixel during the exposure. Then, to obtain better signal-to-noise ratio we co-add the individual images centering them in the photocenter of the object using the task *imcntr* of the IRAF package.

The first two nights we had some problems with the Moon due to its proximity with the object, which produced some troublesome artifacts like bright patterns and a step background gradient in the CCD. The first night the Moon was 20% illuminated and at an angular distance from the object of 16° , while the second night the Moon was illuminated 26% and at an angular distance of 7.3° . To deal with this undesirable effects we had to resort to some processing techniques to fit the illumination gradient and to subtract it from the images. The other nights it was not necessary to apply any correction.

3. Results

3.1. Looking for activity

The observations of (457175) 2008 GO98 taken in September 2016 at first glance did not show signals of cometary activity, but it is possible that a compact unresolved coma could dominate the total brightness of a faint active object masking its cometary activity (Jewitt, 1991). Bearing this in mind and in order to detect any signs of activity, we decided to compare the brightness profile of the object with stellar profiles in the

same field since the point spread function (PSF) of an extended object, like an active comet, has a broader profile than that of a stellar object. This technique is widely used to detect signs of mass loss in objects of the solar system, while [Luu \(1992\)](#) applied this technique to detect cometary activity in near-Earth asteroids, and [Licandro et al. \(2000\)](#); [Mazzotta Epifani et al. \(2008\)](#); [Fitzsimmons et al. \(2005\)](#) do the same for Jupiter-family comets. There are also several examples of the application of this method to detect activity in Centaurs and transneptunian objects ([Perna et al., 2013](#); [Mazzotta Epifani et al., 2014](#); [2017](#)).

The profile for 2008 GO98 was obtained fitting a gaussian to the values of each pixel in two orthogonal directions and normalizing the flux to a value of 1 at the photocenter taking as reference the background level. The same was done for several stars near the object which were combined to obtain the comparison stellar profile. In both cases we used Python functions to make the fits.

[Figs. 2 and 3](#) show the images of 2008 GO98 obtained in September 5 and 6, 2016, respectively, and also the comparison between the profiles of the object and the stellar PSF. In both nights the profiles of 2008 GO98 are broader than the stellar PSF indicating the possibility that it could be active with a small coma. On those dates the object was very near the perihelion (the true anomaly was $\sim 3^\circ$) and it was in the post-perihelion arc of its orbit.

[Fig. 4](#) shows the image and profiles for March 28, 2017. On this night the number of useful images was limited because the object passed very near of two background stars. Again, the image of 2008 GO98 is at left and the profiles at right. It could be observed that the object's profile is broader than the stellar PSF, and even broader than the object profile in the previous observations. In fact the profile shows a significant asymmetry. Looking carefully the image of the object it is possible to detect a subtle elongated coma in the anti-solar direction which produces the asymmetry in the observed profile. The same thing happens with the observations taken in March 29, 2017. Because the images taken in March 28, 2017 allow to identify that the object is active without any doubt, for the remaining observations it was decided to replace the comparison of profiles with a contour plot of the object in order to confirm the presence of a coma. The contour plot shown in [Fig. 5](#) indicates that there is an asymmetric structure in the image with an elongation towards the anti-solar direction.

The results of the last observing run (June 24 and 25, 2017) are shown in [Figs. 6 and 7](#). Surprisingly, 10 months after its perihelion passage and with a true anomaly larger than 60° , the object showed its cometary nature in a clear and unequivocal way, presenting also a small tail in [Fig. 7](#). This observed activity several months after its perihelion passage could be related with a thermal inertia effect observed in comets that produce the maximum of activity some time after the perihelion passage ([Kelley et al., 2013](#); [Schleicher et al., 1998](#); [Knight and Schleicher, 2013](#)).

3.2. Nucleus

In order to get an estimation of the size of the nucleus of 2008 GO98, we use the images taken in September 05, 2016 because they show a less developed coma. Assuming a standard steady-state coma, it is possible to infer the integrated coma magnitude and its contribution to the total brightness, which allows us to derive the contribution of the nucleus and its radius. This method, was developed by [Jewitt and Danielson \(1984\)](#) to constrain the brightness of the coma of comet Halley at large heliocentric distances and it was used by [Mazzotta Epifani et al. \(2007\)](#) to characterize Jupiter family comets with low activity.

The coma magnitude m_{coma} within a circle of projected radius ρ in arc-seconds could be expressed as:

$$m_{coma} = \Sigma_R(\rho) - 2.5 \log(2\pi\rho^2), \quad (1)$$

where $\Sigma_R(\rho)$ is the surface brightness at a projected distance ρ in magnitudes per square arc-second. Then, once m_{coma} was estimated we can calculate which proportion of the total brightness comes from the coma by:

$$\frac{F_{coma}}{F} = 10^{-0.4(m_{coma}-m)}, \quad (2)$$

where F_{coma} , F , m_{coma} and m are the flux of the coma, the total flux, the coma magnitude and the total magnitude of the object, respectively.

The value of ρ was chosen in order to include at least the 90% of the photometric light of the object, which was determined using the *psfmeasure* task of IRAF. Then from [Eqs. \(1\) and \(2\)](#) we get $\frac{F_{coma}}{F} = 0.67$, which indicates that the coma contamination is considerable. Once we got this estimation, the standard magnitude of the nucleus, $m_{nucleus}$, is:

$$m_{nucleus} = m - 2.5 \log\left(1 - \frac{F_{coma}}{F}\right). \quad (3)$$

In the case of 2008 GO98 we found an estimation for the total standard magnitude $m = 16.7 \pm 0.1$ and then we get $m_{nucleus} = 17.9$, this value give us an absolute magnitude $H = 13.15$ which is in good agreement with the value in the JPL Horizon Database ($H = 13.3$). This value for the magnitude of the nucleus could be used to derive its size using the standard technique introduced by [Russell \(1916\)](#) and reformulated for a spherical object by [Jewitt \(1991\)](#). The relation between the magnitude of a spherical object and its radius is:

$$p_R \Phi(\alpha) a^2 = 2.238 \times 10^{22} r^2 \Delta^2 10^{0.4(m_\odot - m_{nucleus})}, \quad (4)$$

where p_R is the geometric albedo, $\Phi(\alpha)$ the phase function ($\Phi(\alpha) = 10^{-0.4(\alpha\beta)}$, α is the phase angle and β the phase coefficient), a is the radius of the object in meters, r and Δ are the heliocentric and geocentric distances in astronomical units, and $m_\odot = -27.1$ and $m_{nucleus}$ are the magnitudes of the Sun and the object in the R-filter, respectively.

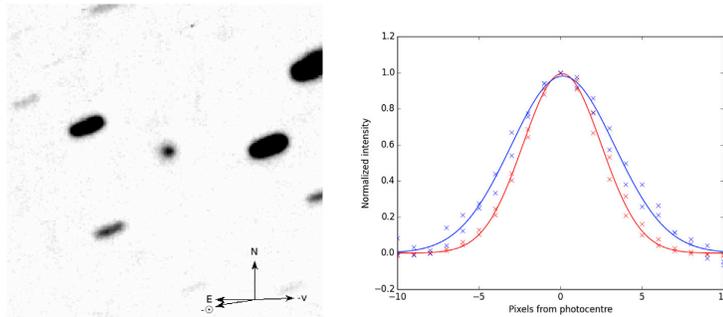


Fig. 2. (Left) Result of co-adding 16 images with an individual exposure time of 30 s taken in September 05, 2016. The object in the center of the image is (457175) 2008 GO98. North is up and East left, the arrow with the $-v$ symbol indicates the antisolar direction, and that with $-v$ the direction opposite to the object's heliocentric velocity vector. The image is 180 arcsec per side. (Right) The profiles of 2008 GO98 (blue) and the stellar PSF for comparison (red). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

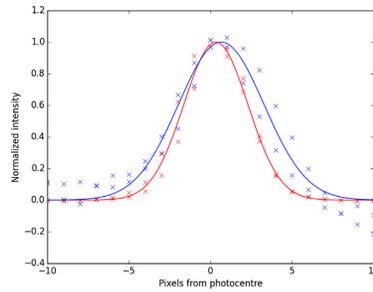
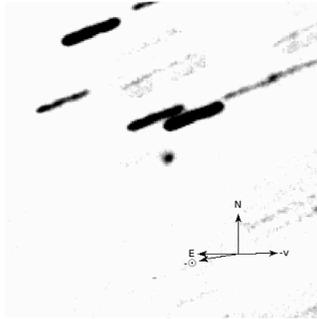


Fig. 3. (Left) Result of co-adding 6 images with an individual exposure time of 70 s taken in September 06, 2016. The object in the center of the image is (457175) 2008 GO98. North is up and East left, the arrow with the $-\odot$ symbol indicates the antisolar direction, and that with $-v$ the direction opposite to the object's heliocentric velocity vector. The image is 180 arcsec per side. (Right) The profile of 2008 GO98 (blue) and the stellar PSF for comparison (red). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

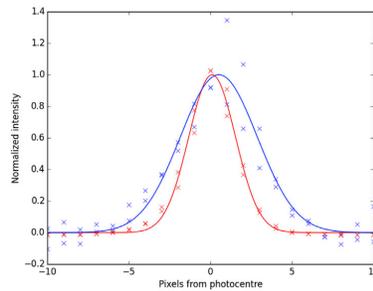
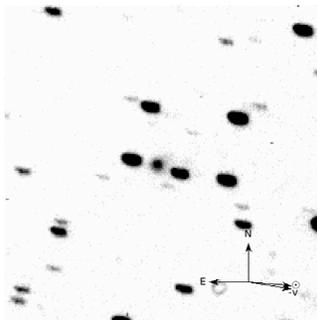


Fig. 4. (Left) Result of co-adding 6 images with an individual exposure time of 70 s taken in March 29, 2017. The object in the center of the image is (457175) 2008 GO98. North is up and East left, the arrow with the $-\odot$ symbol indicates the antisolar direction, and that with $-v$ the direction opposite to the object's heliocentric velocity vector. The image is 180 arcsec per side. (Right) The profile of 2008 GO98 (blue) and the stellar PSF for comparison (red). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

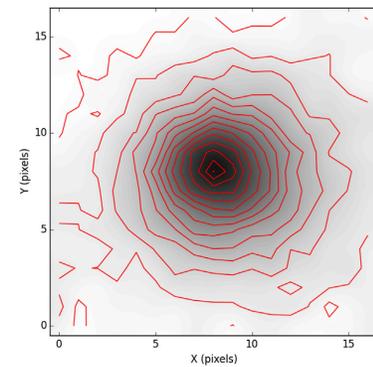
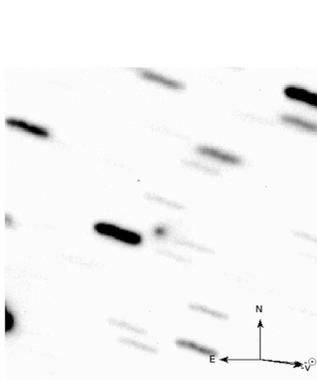


Fig. 5. (Left) Result of co-adding 20 images with an individual exposure time of 75 s taken in March 30, 2017. The object in the center of the image is (457175) 2008 GO98. North is up and East left, the arrow with the $-\odot$ symbol indicates the antisolar direction, and that with $-v$ the direction opposite to the object's heliocentric velocity vector. The image is 180 arcsec per side. (Right) The profile of 2008 GO98 (blue) and the stellar PSF for comparison (red). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

The diameter of the object could be found using Eq. (4) but we need to make assumptions about the values of the phase coefficient (β) and the albedo (p_R). While the present orbital elements of 2008 GO98 indicate that it belongs to the JFCs population, it would seem that it recently arrived to the quasi-hilda region from the Centaur zone (Gil-Hutton and García-Migani, 2016). Then, the best guess for β and p_R in this case is a mean value between those corresponding to these populations. While the values of β estimated for periodic comets fall generally in the interval $0.04 \geq \beta \geq 0.03 \text{ mag deg}^{-1}$ Jewitt and Danielson (1984); Lamy et al. (2004), for some objects in the Centaur population the estimated values are slightly higher: Jewitt (2009) used $\beta = 0.10 \text{ mag deg}^{-1}$ for his study

of active centaurs while Peixinho et al. (2004) proposed $\beta = 0.11 \text{ mag deg}^{-1}$. In the case of the albedo the value usually assumed for JFCs is $p_R = 0.04$, while for the Centaur population the albedo is in the range of $0.025 \leq p_R \leq 0.260$ with a mean value of $p_R \sim 0.069 \pm 0.039$ (Duffard et al., 2014).

Then, following the same procedure used by Mazzotta Epifani et al. (2017) in Fig. 8 the two curves show the radius in function of the albedo for $\beta = 0.035 \text{ mag deg}^{-1}$ and $0.110 \text{ mag deg}^{-1}$, and the vertical lines indicate the mean albedos assumed for JFCs, Centaurs, and $p_R = 0.13$ which is the albedo of two active Centaurs (Chiron and 29P/Schwassmann-Wachmann 1 Cruikshank and Brown, 1983; Bus et al., 1989).

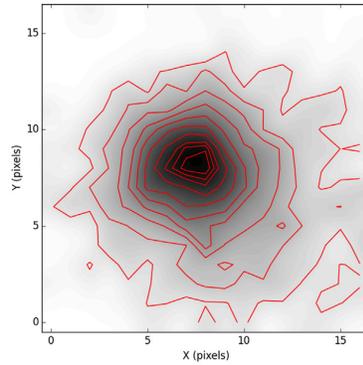
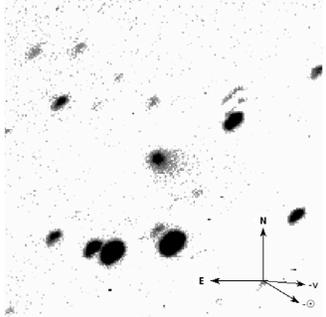


Fig. 6. (Left) Result of co-adding 10 images with an individual exposure time of 360 s taken in June 24, 2017. The object in the center of the image is (457175) 2008 GO98. North is up and East left, the arrow with the $-\odot$ symbol indicates the antisolar direction, and that with $-v$ the direction opposite to the object's heliocentric velocity vector. The image is 180 arcsec per side. (Right) The profile of 2008 GO98 (blue) and the stellar PSF for comparison (red). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

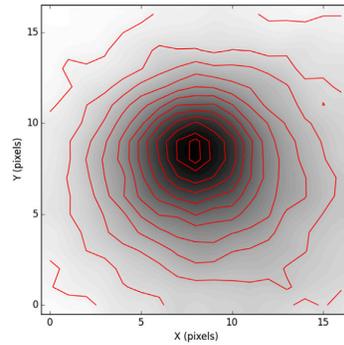
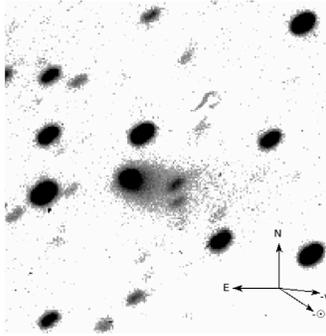


Fig. 7. (Left) Result of co-adding 10 images with an individual exposure time of 360 s taken in June 25, 2017. The object in the center of the image is (457175) 2008 GO98. North is up and East left, the arrow with the $-\odot$ symbol indicates the antisolar direction, and that with $-v$ the direction opposite to the object's heliocentric velocity vector. The image is 180 arcsec per side. (Right) The profile of 2008 GO98 (blue) and the stellar PSF for comparison (red). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

Taking mean values, the estimated diameter of 2008 GO98 is 15.5 ± 4.0 km or 20.1 ± 5.4 km for $p_R = 0.13$ and $p_R = 0.069$, respectively.

4. Dynamical evolution

To investigate the recent dynamical evolution of 2008 GO98, we numerically integrate its orbit backwards and forwards in time for 30000 yr (See Table 1 for the elements of the initial orbit), and we also integrated 100 clones with uniform distributed orbital elements centered on its current orbit with a dispersion of 10^{-3} of each element. For this purpose, we used a Bulirsch-Stoer integrator with a step size of 1 day, adopted accuracy of 10^{-12} , and all the planets from Mercury to Neptune included.

The evolution of the semimajor axis, and the perihelion and aphelion distances of 2008 GO98 are shown in Fig. 9. The simulation results show that the orbit of 2008 GO98 was strongly perturbed by Jupiter: the object behaves as Centaur until the year ≈ -1840 when it crosses Jupiter's orbit to enter the inner solar system and becomes a quasi-hilda object in the year ≈ 2000 . Later, in the year ≈ 5788 2008 GO98 crosses again Jupiter's orbit to return to the Centaur zone when the semimajor axis and aphelion of its orbit jump to larger values. Then, this object behaves as quasi-hilda during a very short period of ≈ 7000 yr.

Analyzing the behavior of the clones during the integration allow us to confirm that 2008 GO98 is in an orbit which is dynamically unstable on very short time-scales. The spread of the main orbital parameters of

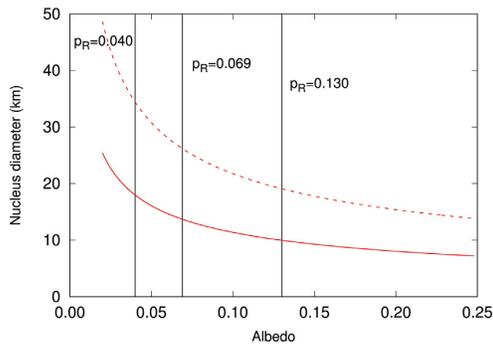


Fig. 8. Diameter of the nucleus of 2008 GO98 in function of the albedo. The red curve corresponds to values obtained with a phase coefficient of $\beta = 0.11 \text{ mag deg}^{-1}$, while the red dashed one is for $\beta = 0.035 \text{ mag deg}^{-1}$. The vertical lines indicate albedos of 0.04, 0.069, and 0.13. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

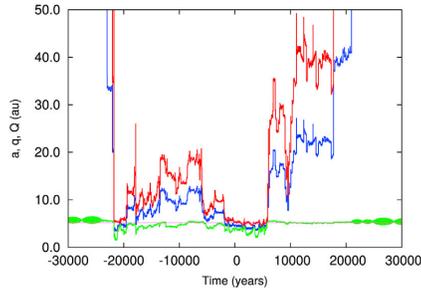


Fig. 9. Dynamical evolution of the semimajor axis (blue), perihelion (green), and aphelion (red) distances for (457175) 2008 GO98 during the numerical integration. Jupiter's semimajor axis is also shown in pink. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

the cloud of clones expands by a factor of 2 in less than 10 yr into the past and ≈ 20 yr into the future, indicating that the orbit has a strongly chaotic nature.

The evolution of the mean semimajor axis, perihelion distance, eccentricity and inclination of the clones are shown in Fig. 10. The frequent encounters of the clones with Jupiter lead to a divergence of their orbits allowing only a statistical analysis of their evolution. These results indicate that 2008 GO98 has a high probability of being a centaur that was occasionally disturbed by Jupiter to temporarily become a quasi-hilda during a very short time in which it was detected as an active object. This chaotic behavior is rather common among the centaur population since these objects have frequent encounters with Jupiter and Saturn.

We also obtain the time-averaged distribution of the clones as a function of the aphelion (Q) and perihelion (q) distances for the backward and forward integrations (Fig. 11). We can see in this figure the clear influence of Jupiter on the evolution of the orbit indicated by horizontal strips of high probability at $q \approx 5.2$ au in both cases, and also a less important influence of Saturn in the forward integration indicated

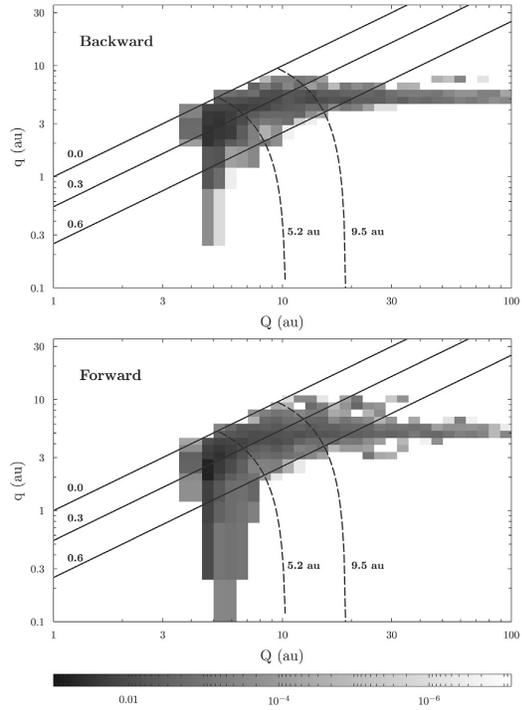


Fig. 11. Probability distribution per square au in (Q , q) space for the clones of 2008 GO98 in the backward and forward integrations. Continuous black lines indicate eccentricities of 0.0, 0.3, and 0.6, and dashed lines indicate semimajor axes of 5.2 and 9.5 au, **Jupiter and Saturn locations.**

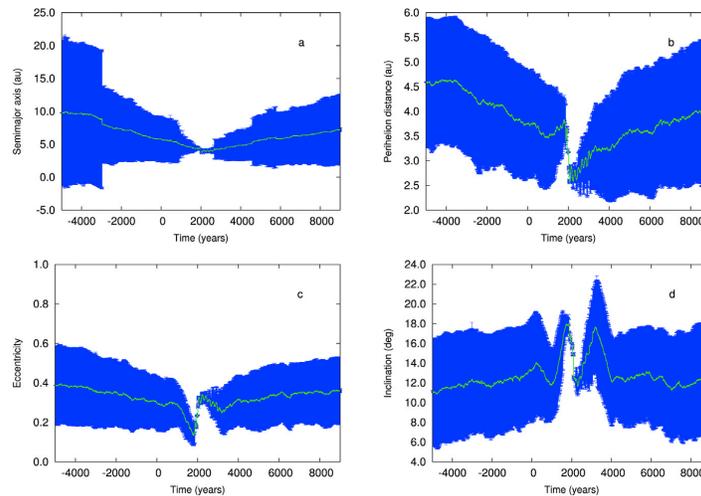


Fig. 10. Orbital evolution of the 100 clones of (457175) 2008 GO98 for the semimajor axis (a), perihelion distance (b), eccentricity (c), and inclination (d). The mean value is indicated in green while one standard deviation for each point is indicated in blue. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

as a high probability region at $q \approx 9.5$ au.

5. Conclusions

In Gil-Hutton and García-Migani (2016) we found 11 objects whose dynamical evolution show that they could have recently come from the outer solar system and several of them have a good chance of being active. One of them, the quasi-hilda object (457175) 2008 GO98, passed the perihelion of its orbit on August 21, 2016, offering a good opportunity to search for activity. The object was observed in several runs between September 5, 2016 and June 25, 2017, with the 2.15 m telescope at Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) in San Juan, Argentina.

The observations made in September 2016 at a first glance did not show evidence of activity but a comparison of the photometric profile with a stellar PSF show a clear widening, evidencing the presence of a coma. The object becomes more active in the following observing runs and in June 2017 it was visible in the images a small tail. Surprisingly, the object increases its activity for increasing true anomaly in spite that the heliocentric distance was greater in June 2017 than in September 2016 when it was near its perihelion.

In order to get an estimation of the nucleus size we use the images taken in the first run when the coma contamination was apparently smaller. The value obtained for the nucleus diameter was 15.5 ± 4.0 km for $p_R = 0.13$ and 20.1 ± 5.4 km for $p_R = 0.069$. These values are higher than one would expect for a typical JFC but it is in agreement with the size obtained by Mazzotta Epifani et al. (2017) for the active Centaur C/2011 P2 (PANSTARRS). On the other hand it is also possible that the coma contamination is being underestimated by the method used and hence the nucleus brightness was overestimated. Therefore these values must be considered only as a first-order estimation for the nucleus size.

The dynamical evolution of 2008 GO98 shows that its present orbit is transient and the object will return to the Centaur region after a short period inside the orbit of Jupiter. Since this object was observed active its surface suffered a thermal process that triggered the activity and broke the irradiation crust, producing a resurfacing process and a likely change of the surface color. Since 2008 GO98 will return to the Centaur region after this processing of its surface, it could be an example of the dynamical process proposed by Melita and Licandro (2012) to help to explain the color bimodality of the Centaur population. These authors found that the objects that are less red do not penetrate too much into the inner solar system and viceversa, indicating that the dynamics could be one of the factors that determine the surface color in addition to other factors like their size, collisional processes, intrinsic composition, etc.

In the case of 2008 GO98, when this object return to the Centaur region it will be a new member of the less red group confirming the proposal of Melita and Licandro (2012).

Acknowledgements

We thank prof. J. A. Fernández and an anonymous referee for their reviews which led to a improvement of the paper. The authors gratefully acknowledges financial support by CONICET through PIP 112-201501-00525.

References

- Bus, S.J., Bowell, E., Harris, A.W., Hewitt, A.V., 1989. 2060 Chiron - CCD and electronographic photometry. *Icarus* 77, 223–238.
- Cruikshank, D.P., Brown, R.H., 1983. The nucleus of comet P/Schwassmann-Wachmann 1. *Icarus* 56, 377–380.
- Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., Santos-Sanz, P., Vilénus, E., Ortiz, J.L., Mueller, T., Fornasier, S., Lellouch, E., Mommert, M., Pal, A., Kiss, C., Mueller, M., Stansberry, J., Delsanti, A., Peixinho, N., Trilling, D., 2014. “TNOs are Cool”: a survey of the trans-Neptunian region. XI. A Herschel-PACS view of 16 Centaurs. *A&A* 564, A92.
- Duncan, M.J., Levison, H.F., Budd, S.M., 1995. The dynamical structure of the kuiper belt. *AJ* 110, 3073.
- Fernandez, J.A., 1980. On the existence of a comet belt beyond Neptune. *MNRAS* 192, 481–491.
- Ferraz-Mello, S., Nesvorný, D., Michtchenko, T.A., 1998. Chaos, diffusion, escape and permanence of resonant asteroids in gaps and groups. In: Lazzaro, D., Vieira Martins, R., Ferraz-Mello, S., Fernandez, J. (Eds.), *Solar System Formation and Evolution*, vol. 149, p. 65 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*.
- Fitzsimmons, A., Lowry, S.C., Snodgrass, C., 2005. Comet observations [F65 haleakala-faulkes telescope north]. *Minor Planet Circulars* 53903.
- Gil-Hutton, R., García-Migani, E., 2016. Comet candidates among quasi-Hilda objects. *A&A* 590, A111.
- Jewitt, D., 1991. Cometary photometry. In: Newburn Jr., R.L., Neugebauer, M., Rahe, J. (Eds.), *IAU Colloq. 116: Comets in the Post-Halley Era*, vol. 167. *Astrophysics and Space Science Library*, pp. 19–65.
- Jewitt, D., 2009. The active centaurs. *AJ* 137, 4296–4312.
- Jewitt, D., Danielson, G.E., 1984. Charge-coupled device photometry of Comet P/Halley. *Icarus* 60, 435–444.
- Kelley, M.S., Fernández, Y.R., Licandro, J., Lisse, C.M., Reach, W.T., A’Hearn, M.F., Bauer, J., Campins, H., Fitzsimmons, A., Groussin, O., Lamy, P.L., Lowry, S.C., Meech, K.J., Pittichová, J., Snodgrass, C., Toth, I., Weaver, H.A., 2013. The persistent activity of Jupiter-family comets at 3–7 AU. *Icarus* 225, 475–494.
- Knight, M.M., Schleicher, D.G., 2013. The highly unusual outgassing of Comet 103P/Hartley 2 from narrowband photometry and imaging of the coma. *Icarus* 222, 691–706.
- Kresak, L., 1979. In: Gehrels, T. (Ed.), *Asteroids*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 289–309.
- Lamy, P.L., Toth, I., Fernandez, Y.R., Weaver, H.A., 2004. In: Festou, M.C., Keller, H.U., Weaver, H.A. (Eds.), *Comets II*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 223–264.
- Leonard, G.J., Christensen, E.J., Fuls, D.C., Gibbs, A.R., Grauer, A.D., Johnson, J.A., Kowalski, R.A., Larson, S.M., Matheny, R.G., Seaman, R.L., Shelly, F.C., Williams, G.V., 2017. Cometary Activity in (457175) 2008 GO98. *Minor Planet Electronic Circulars* 2017.
- Levison, H.F., Duncan, M.J., 1997. From the kuiper belt to Jupiter-family comets: the spatial distribution of ecliptic comets. *Icarus* 127, 13–32.
- Licandro, J., Tancredi, G., Lindgren, M., Rickman, H., Hutton, R.G., 2000. CCD photometry of cometary nuclei. I: observations from 1990–1995. *Icarus* 147, 161–179.
- Luu, J.X., 1992. High resolution surface brightness profiles of near-earth asteroids. *Icarus* 97, 276–287.
- Mazzotta Epifani, E., Palumbo, P., Capria, M.T., Cremonese, G., Fulle, M., Colangeli, L., 2007. The distant activity of short-period comets - I. *MNRAS* 381, 713–722.
- Mazzotta Epifani, E., Palumbo, P., Capria, M.T., Cremonese, G., Fulle, M., Colangeli, L., 2008. The distant activity of short period comets - II. *MNRAS* 390, 265–280.
- Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Dotto, E., Palumbo, P., Dall’Ora, M., Micheli, M., Ieva, S., Perozzi, E., 2017. Nucleus of the active centaur C/2011 P2 (PANSTARRS). *A&A* 597, A59.
- Mazzotta Epifani, E., Perna, D., Licandro, J., Dall’Ora, M., Palumbo, P., Dotto, E., Barucci, M.A., Brucato, J.R., Della Corte, V., Tozzi, G.P., 2014. Blending the distinctions among groups of minor bodies: a portrait of the Centaur-comet “transition” object P/2010 C1 (Scotti). *A&A* 565, A69.
- Melita, M.D., Licandro, J., 2012. Links between the dynamical evolution and the surface color of the Centaurs. *A&A* 539, A144.
- Nesvorný, D., Ferraz-Mello, S., 1997. On the asteroidal population of the first-order jovian resonances. *Icarus* 130, 247–258.
- Ohtsuka, K., Ito, T., Yoshikawa, M., Asher, D.J., Arakida, H., 2008. Quasi-Hilda comet 147P/Kushida-Muramatsu. Another long temporary satellite capture by Jupiter. *A&A* 489, 1355–1362.
- Peixinho, N., Boehnhardt, H., Belskaya, I., Doressoundiram, A., Barucci, M.A., Delsanti, A., 2004. ESO large program on Centaurs and TNOs: visible colors - final results. *Icarus* 170, 153–166.
- Perna, D., Dotto, E., Barucci, M.A., Mazzotta Epifani, E., Vilénus, E., Dall’Ora, M., Fornasier, S., Müller, T.G., 2013. Photometry and taxonomy of trans-Neptunian objects and Centaurs in support of a Herschel key program. *A&A* 554, A49.
- Russell, H.N., 1916. On the albedo of the planets and their satellites. *ApJ* 43, 173–196.
- Schleicher, D.G., Millis, R.L., Birch, P.V., 1998. Narrowband photometry of comet P/Halley: variation with heliocentric distance, season, and solar phase angle. *Icarus* 132, 397–417.
- Schubart, J., 1968. Long-period effects in the motion of hilda-type planets. *AJ* 73, 99–103.
- Schubart, J., 1982. Three characteristic parameters of orbits of Hilda-type asteroids. *A&A* 114, 200–204.
- Schubart, J., 1991. Additional results on orbits of Hilda-type asteroids. *A&A* 241, 297–302.
- Toth, I., 2006. The quasi-Hilda subgroup of ecliptic comets - an update. *A&A* 448, 1191–1196.
- Zelner, B., Thirunagari, A., Bender, D., 1985. The large-scale structure of the asteroid belt. *Icarus* 62, 505–511.