

Asteroides y cometas como cuerpos progenitores de meteoritos: su peligro de impacto con la Tierra

Asteroids and comets as parent bodies of meteorites: clues on Earth's impact hazard

JOSEP M. TRIGO RODRÍGUEZ¹ Y JOSÉ M. MADIEDO^{2,3}

¹ Grupo de Meteoritos, Cuerpos Menores y Ciencias Planetarias. Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC), Campus UAB, Facultat de Ciències, C5-p2, 08193 Bellaterra (Barcelona), Spain. trigo@ice.csic.es

² Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, Facultad de Física, Universidad de Sevilla, E-41012 Sevilla, Spain

³ Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Avda. de las Fuerzas Armadas S/N, E-21071 Huelva, Spain. madiedo@cica.es

Resumen Los asteroides y los cometas son los principales cuerpos que producen meteoritos aunque la Tierra también recibe rocas de diversos cuerpos planetarios como la Luna, Vesta o Marte. Este artículo pretende dar a conocer las diversas regiones del Sistema Solar pobladas por estos cuerpos menores y explicar los mecanismos dinámicos que permiten el transporte de meteoritos a la Tierra. También se introduce al lector en los principales criterios que nos permiten datar isotópicamente el tiempo de transporte desde que las rocas productoras de meteoritos se encontraban en sus asteroides y cometas hasta llegar a la Tierra: las Edades de Exposición Cósmica o CREAs. Tales edades demuestran que el Sistema Solar es un sistema tremendamente dinámico, aparentemente estable a escala humana, pero sometido a grandes colisiones en el Cinturón Principal de asteroides. En la actualidad, la mayoría de meteoritos que llegan a la Tierra se desprendieron hace decenas de millones de años de sus asteroides progenitores como consecuencia de impactos colosales. Precisamente los fragmentos asteroidales de varias decenas de metros constituyen hoy en día una de las mayores fuentes de peligro de impacto sustancial para la Tierra

Palabras clave: Asteroides, asteroides próximos a la Tierra (NEAs), cometas, meteoroides, meteoritos, objetos próximos a la Tierra (NEOs) y objetos transneptunianos (TNOs).

Abstract Asteroids and comets are the main bodies producing meteorites although the Earth also receives rocks from several planetary bodies such as the Moon, Vesta or Mars. This article deals with the diverse regions of the Solar System populated by these so-called minor bodies in order to explain the dynamic mechanisms allowing the transport of meteorites to the Earth. We also introduce the reader to the main criteria that allow us to perform isotopic dating of the transport times from the time in which the meteorites were in their asteroids or comets: Cosmic Ray Exposure Ages (CREAs). These ages show that our Solar System is a highly dynamic system, apparently stable at our human time-scale, but subject to large collisions that take place in the main asteroid belt. Nowadays, most meteorites that reach the Earth were released tens of millions of years ago from their parent asteroids due to colossal impacts. Just these tens of meters in diameter asteroidal fragments are nowadays one of the most significant sources of impact hazard for Earth

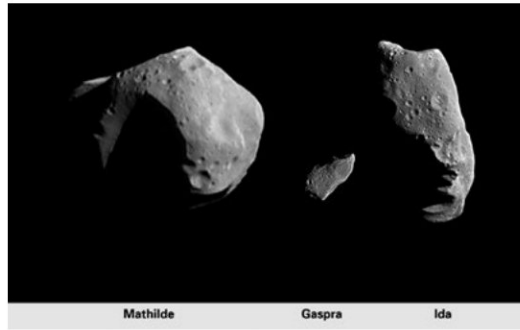
Keywords: Asteroid, comet, meteoroid, meteorites, Near Earth Asteroids (NEAs), Near-Earth Objects (NEOs) y Transneptunian Objects (TNOs).

EL ORIGEN DE LOS ASTEROIDES Y LOS METEORITOS

No todos los cuerpos formados en el Sistema Solar adquirieron dimensiones planetarias. Con las primeras ideas de agregación de los objetos primigenios se acuñó el término planetesimal que se refiere a los bloques primordiales de varios cientos de metros que se formaron en el disco protoplanetario hace unos 4.565 millones de años (Ma). Los aste-

roides que encontramos en diferentes regiones son los objetos remanentes de esos primeros cuerpos aunque moldeados por innumerables impactos a lo largo de los eones (Fig. 1). En este artículo se describe el origen y la localización de esos cuerpos en la actualidad. También se explica de manera sucinta cómo se formaron los objetos consolidados en las regiones exteriores del disco que formaron cometesimales y que, en la actualidad, están representados por los cometas.

Fig. 1. Los asteroides Mathilde, Gaspra e Ida a escala. Mathilde aparece más brillante en esta imagen de lo que es realmente y se piensa que sus materiales formativos son similares a las condritas carbonáceas. A modo de comparación Mathilde en esta imagen mide 59x47 km² (NASA).



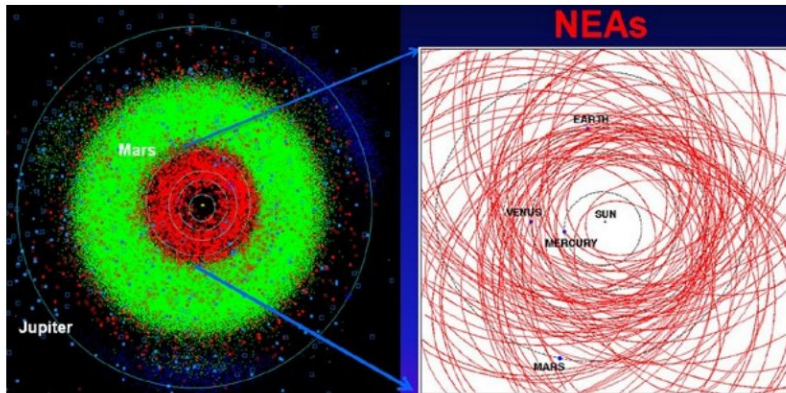
La mayoría de los meteoritos llegados a la Tierra proceden de asteroides pero un pequeño porcentaje de acondritas procede de la Luna o Marte (Grady, 2000). Así lo demuestran sus propiedades químicas y mineralógicas pero también las estadísticas recopiladas en el último siglo de las principales clases. Sin embargo, resulta enormemente complicado establecer un origen concluyente para la mayoría de los meteoritos. En otras palabras, sabemos que los meteoritos proceden de asteroides pero establecer concretamente de cuáles es otra historia que sólo se ha completado en contados casos.

Los meteoritos contienen elementos que son o fueron radiactivos y cuyo estudio permite establecer cronómetros isotópicos para datar los procesos de formación en los asteroides de los que proceden. Ya se describe de manera sucinta los procesos de agregación primigenios en el artículo 3 de este monográfico por lo que aquí nos centraremos en discutir acerca de las regiones en que hoy en día encontramos asteroides en nuestro sistema planetario. También discutiremos en qué medida existen procesos dinámicos que permiten el tránsito de asteroides y meteoroides de unas a otras regiones y, por último, describiremos cuáles son las fuentes principales de los meteoritos.

EL CINTURÓN PRINCIPAL DE ASTEROIDES

El principal almacén de asteroides es el denominado Cinturón Principal. En tal región situada entre las órbitas de Marte y Júpiter se conocen hoy en día cerca de medio millón de asteroides (Fig. 2). En realidad hay bastantes más pues si bajamos el límite de la definición de asteroide (objetos de al menos 10 metros de diámetro) la cifra subiría a varios millones. Sin embargo, la mayoría son objetos relativamente pequeños con diámetros inferiores a 300 km

Fig. 2. Diagrama de los más de 400.000 objetos conocidos en el cinturón de asteroides (izquierda) y de la región próxima a la Tierra (derecha) en donde se muestran las órbitas de algunos NEOs (Minor Planet Center).



ASTEROIDE	DIÁMETRO (km)	MASA (kg)	DENSIDAD MEDIA (g/cm ³)
1 Ceres	913	9.5x10 ²⁰	2.1
2 Pallas	523	2.4x10 ²⁰	2.9
4 Vesta	520	2.7x10 ²⁰	3.5
10 Hygiea	429	1.1x10 ²⁰	-
511 Davida	337	1.1x10 ²⁰	-
704 Interamnia	333	7.0x10 ¹⁹	-
52 Europa	312	5.2x10 ¹⁹	-

Tabla I. Asteroides con diámetro superior a 300 km, indicando su diámetro, masa y densidad media (cuando es conocida).

(véase Tabla I).

No todos los asteroides son iguales. Existen diferentes poblaciones con características particulares que sugieren que existió una agregación diferenciada de objetos en función de la distancia al Sol y también en función del tiempo. Incluso entre los mayores asteroides debe haber importantes diferencias composicionales. Un ejemplo claro es el gigante 1 Ceres (el número indica el número de catálogo del *Minor Planet Center*) que, a pesar de poseer unos 930 km frente a los 530 km de diámetro de 4 Vesta, parece ser un objeto mucho más primitivo y que podría haber escapado a la diferenciación, siendo una fuente de volátiles. Ambos objetos, comparados con el diámetro de Marte en la Fig. 3, son el principal objetivo científico de la misión Dawn de la NASA que pretende orbitarlos, cartografiarlos y caracterizarlos en base a cámaras y espectrómetros de última generación. Curiosamente, Ceres es más primitivo lo que da idea de la proporción de hielos y rocas que formaron estos cuerpos. Vesta, pese a ser más pequeño, debió formarse mayoritariamente a partir de la agregación de planetesimales rocosos, con abundantes isótopos radioactivos que calentarían eficientemente su interior mientras que algo diferente debió ocurrir a Ceres. Con este ejemplo nos damos cuenta que no podemos comparar a la ligera los asteroides del Sistema Solar pues podrían haber nacido en tiempos y lugares diferentes y, por si fuera poco, de materiales enormemente variados. Esto lo trataremos en el próximo apartado.



Fig. 3. Comparación entre el diámetro de Marte, Ceres y Vesta (NASA).

Principales tipos de asteroides: clases espectrales.

El cinturón principal se encuentra plagado de objetos de naturaleza muy diversa. Gracias a que los asteroides reflejan una parte de la luz que reciben del Sol es posible obtener espectros de la luz reflejada. Comparando estos espectros, una vez corregidos y calibrados, con los espectros obtenidos en laboratorio para diversos tipos de meteoritos, se comprobó que era posible establecer criterios de caracterización remota de los asteroides (Johnson y Fanale, 1973; Gaffey, 1976). Una revisión del estado actual de las principales asociaciones entre asteroides y meteoritos fue realizada por de León et al. (2011) y Trigo-Rodríguez et al. (2014).

Un ejemplo evidente de la importancia de comparar espectros de meteoritos con los de asteroides fue identificar que ciertas acondritas basálticas que llegan a la Tierra en forma de tres grupos diferentes denominados Howarditas, Eucritas y Diogenitas (conocidos por el acrónimo HED) proceden del asteroide 4 Vesta. Así lo revelan ciertas bandas de absorción características de dos minerales comunes de esos materiales como son el olivino y los piroxenos. Pieters y McFadden (1994) realizaron una excelente revisión de esa afinidad entre las acondritas HED y 4 Vesta.

Podría parecer que ese tipo de identificación remota a través de los espectros de asteroides y meteoritos se ha establecido en muchos otros casos pero desgraciadamente no es así. Por ejemplo, también conocemos que ciertos asteroides de clase espectral S poseen similitudes claras con las condritas ordinarias pero existen innumerables asteroides compartiendo esas propiedades reflectivas. Esto es consecuencia de que han existido diversas fragmentaciones de los asteroides progenitores de las condritas ordinarias. Nesvorný et al. (2002a) descubrieron recientemente que existe una familia de 38 asteroides asociada dinámicamente al asteroide 832 Karin, derivada probablemente de la fragmentación de un asteroide mayor hace unos 5.8 Ma.

En cierto modo la existencia de diferentes poblaciones son reminiscencia de los procesos arcaicos que dieron lugar a estos objetos pero con salvedades. La evolución dinámica hace que se desplacen de sus regiones de origen y, además, el procesado acaecido por impactos ha sido intenso tanto destruyendo asteroides como produciendo fragmentos que complican el escenario. Estos y otros factores hacen que el cinturón principal de asteroides sea diverso y dinámicamente complejo por la introducción de caos asociado a las denominadas resonancias orbitales de las que hablaremos en otro apartado.

Volviendo al hecho constatado de que existen asteroides con composiciones mineralógicas similares, formando poblaciones en el cinturón principal, desearía poner algunos ejemplos. Es bien conocido que los asteroides formados por enstatita se encuentran en una región interna cercana a Marte. No es de extrañar pues que su mineralogía particular e isótopos de oxígeno, aspectos medidos en las raras condritas de enstatita, nos hacen sospechar que sean los bloques progenitores mayoritarios de la Tierra. Posiblemente sean auténti-

cos fósiles de una población prácticamente extinta que dio origen en el pasado a los planetas terrestres por agregación. Tan sólo aquellos asteroides de esa naturaleza que dinámicamente quedaron almacenados en esa región fueron capaces de sobrevivir (Figura 4). También los asteroides de clase espectral S equiparados con las comunes condritas ordinarias dominan el interior del Sistema Solar. Después los asteroides de naturaleza carbonácea y clase espectral C son más frecuentes en torno al centro del cinturón principal. Finalmente, las clases espectrales D y P presumiblemente más primitivas y asociadas a las condritas carbonáceas más ricas en volátiles, dominan la región externa. Es lo esperable si esos objetos fuesen una amalgama de materiales sólidos formados a alta temperatura (como silicatos o metales formados en el disco protoplanetario interno) y otros de baja temperatura (como hielos o materia orgánica) procedentes de las regiones externas más frías. Esto es consistente, por otro lado, con la existencia de un gradiente de temperatura en el disco protoplanetario durante su evolución temprana (Wasson, 1985; Trigo Rodríguez, 2012a).

Las resonancias como fuentes de meteoritos

En las últimas décadas ha existido un enorme progreso en nuestra comprensión de los mecanismos dinámicos que transportan tanto asteroides del cinturón principal hacia la región NEO próxima a la Tierra como fragmentos menores o meteoroides que más frecuentemente llegan a nuestro planeta y producen meteoritos.

Los asteroides grandes están sometidos a colisiones y se pensaba hasta hace relativamente poco que eran las causantes de enviar fragmentos de asteroides hacia las resonancias. Sin embargo, hoy sabemos que son los fragmentos producidos por una colisión y de diámetro inferior a unos 20 km los que se encuentran mayormente sometidos al denominado Efecto Yarkovsky. Este es un efecto no gravitacional en el que la superficie de los asteroides absorbe la luz solar y la irradia posteriormente con cierto retraso. Esa energía irradiada es ínfima pero al ser un proceso constante en el tiempo supone una fuerza opuesta al movimiento que contribuye a que el asteroide pierda energía potencial y vaya cayendo hacia el Sol, una revolución tras otra. Al decaer en su órbita, estos pequeños asteroides irán cruzando las llamadas resonancias de movimiento medio con los diversos

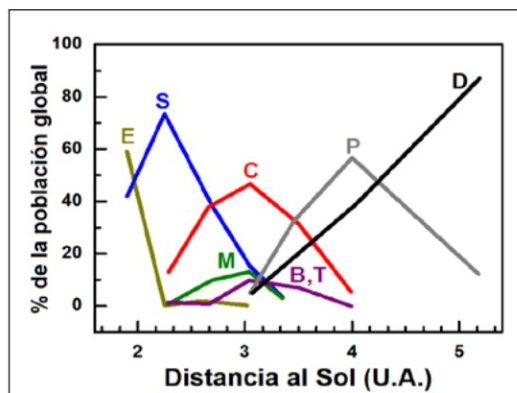
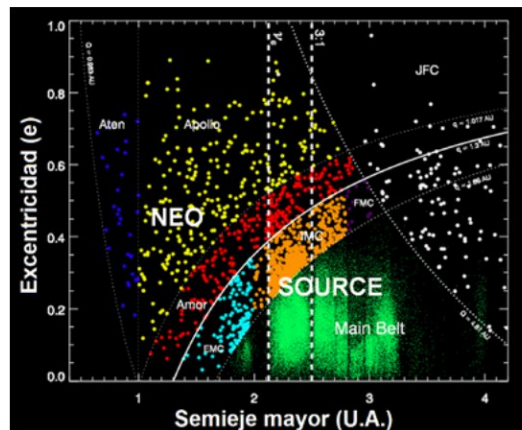


Fig. 4. Distribución de poblaciones en el cinturón principal de asteroides. Las clases de meteoritos a los que pueden asociarse son: E: Asteroides de Enstatita, S: Condritas ordinarias, M: Metálicos, B: Carbonáceos tipo 2 Pallas, C: Carbonáceos tipo 253 Mathilde, T, D y P: Son asteroides carbonáceos (Marco Polo-R team).

planetas. Entre las más intensas se encuentran aquellas asociadas a Júpiter, Saturno y el propio Marte. Por simplicidad sólo hablaremos de algunas de ellas. Las resonancias de movimiento medio con Júpiter más intensas son: 3:1, 4:1 y 5:2 como se aprecia en la Fig. 5. Pondremos un ejemplo para explicar el origen de esa doble numeración. Así, la resonancia 3:1 (leída: tres, uno) se produce cuando el asteroide completa tres órbitas mientras Júpiter hace una. Al caer el asteroide en esas regiones su órbita, afectada por la influencia gravitatoria de Júpiter, puede adquirir una excentricidad tal que lo lanza hacia la región próxima a la Tierra. En esa región puede orbitar durante pocos millones de años para más tarde regresar al cinturón principal (Morbidelli et al., 2002).

Como podemos ver en la Fig. 5, la distribución de los asteroides en función de su distancia al Sol permite detectar regiones prohibidas denominadas huecos de Kirkwood.

Fig. 5. Diagrama del semieje mayor versus excentricidad de los objetos presentes en el interior del Sistema Solar. Obsérvese los "huecos" en la región del Main Belt que producen las resonancias. También se indican las diferentes poblaciones de los objetos NEOs (Apollo, Aten y Amor), así como otras regiones de cometas como los de la Familia de Júpiter (JFC) y los cometas en la región próxima a la Tierra (NECs) (Imagen Marco Polo-R team/ESA).



Otras resonancias importantes son las denominadas seculares. Estas resonancias se producen cuando la precesión de dos órbitas se sincroniza. Como consecuencia, el asteroide que cae en la resonancia acaba completando la precesión al mismo tiempo que el planeta y esto causa cambios extremos en la excentricidad y la inclinación del asteroide. La resonancia secular más importante es la denominada ν_6 y es la que sufren los asteroides por influencia del planeta Saturno. Los asteroides que osan acercarse a esa región sufren un cambio en su excentricidad que los hace cruzar peligrosamente la órbita de Marte. Precisamente, en esos encuentros cercanos, estos asteroides pueden ser expulsados del cinturón principal para adentrarse en las regiones más internas. El estudio de las órbitas de asteroides en la región próxima a la Tierra y las simulaciones nos indican que esta resonancia es una de las más importantes fuentes de NEOs (Nesvorný et al., 2002b).

LA REGIÓN DE ASTEROIDES PRÓXIMOS A LA TIERRA

Quizás para sorpresa del lector, la denominada *Región Próxima a la Tierra* se encuentra también poblada por asteroides procedentes mayoritariamente del cinturón principal, aunque

también está mínimamente poblado por cometas o núcleos cometarios inactivos. Es necesario distinguir entre NEOs (acrónimo anglosajón de Near Earth Objects) y NEAs (asteroides en sentido estricto). Se trata de un aspecto sutil pero no menos importante. Una pequeña parte de los NEOs está formada por núcleos de cometas y posee características dinámicas y reflectivas peculiares. Por ello, se reserva por un lado el acrónimo NEA para los auténticos asteroides y por otro NEC para los cometas próximos a la Tierra. Así, por ejemplo, a principios de enero de 2014 conocemos 10.596 NEOs, de los cuales 10.502 son asteroides y, por tanto, 94 siguen órbitas típicamente cometarias. Estos últimos constituyen un porcentaje inferior a un 1% de todos los NEOs conocidos tal y como revelan las estadísticas actualizadas del *Near Earth Object Program* de NASA. Los NEAs pueden clasificarse en varios grupos de acuerdo con el valor del semieje mayor de su órbita (a) y de los valores de la distancia al afelio (Q) y al perihelio (q) (Figura 6). Así, aquellos cuya órbita cumple las condiciones $a > 1.0$ U.A. y $q < 1.02$ U.A. se denominan Apolos y forman el grupo más numeroso: aproximadamente el 62% de los NEAs identificados hasta ahora se encuentra dentro de esta clasificación. Estos objetos cruzan la órbita de la Tierra, al igual que los NEAs tipo Aten, que son aquellos asteroides cuyo semieje mayor es menor que 1 U.A., con distancias al afelio inferiores a 1.0167 U.A.. El tercer grupo es el de los denominados asteroides tipo Amor, que tienen $a > 1$ U.A. y distancias al perihelio comprendidas entre 1.02 y 1.3 U.A.. Las órbitas de los asteroides tipo Amor, por tanto, caen enteramente fuera de la de la Tierra, si bien se aproximan a nuestro planeta cuando se encuentran en su perihelio. Un último grupo lo constituyen los IEOs, acrónimo anglosajón de Inner Earth Objects y cuya órbita se encuentra en todo momento contenida dentro de la órbita de la Tierra. Hasta la fecha, sólo se han identificado 6 NEAs que pueden clasificarse dentro de esta categoría.

Entre los objetos NEOs encontramos los asteroides potencialmente peligrosos, también conocidos como PHAs de su acrónimo anglosajón Potentially Hazardous Asteroids. Se definen específicamente como aquellos NEOs cuyas órbitas poseen una distancia mínima de intersección orbital de 0.05 U.A. y

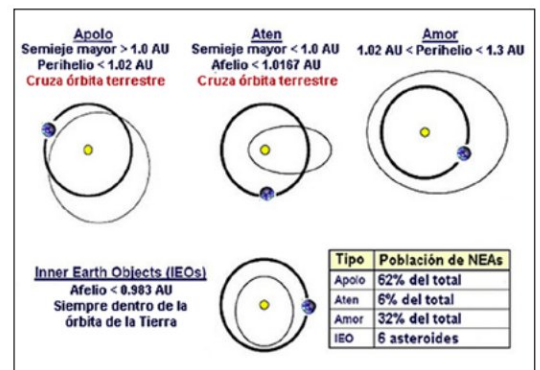


Fig. 6. Clasificación de los NEAs en función de los valores del semieje mayor, la distancia al perihelio y la distancia al afelio de su órbita.

que, además, sean mayores de unos 150 metros de diámetro. Se conocen unos 1.450 PHAs a principios de 2014 y, entre ellos, existen 154 con un diámetro estimado superior al kilómetro. Tal y como se muestra en la Fig. 5, encontramos 3.972 NEOs en órbitas tipo Amor, 5.712 en órbitas tipo Apollo, 805 en tipo Aten, 13 en tipo Atira y 94 cometas en la región próxima a la Tierra (NECs).

El interés de las agencias espaciales por estudiar NEAs es creciente. Se necesita conocer bien la estructura y composición de estos objetos, no solo por su contenido científico intrínseco, sino también por si en el futuro debemos emplear sistemas de paliación contra algunos de ellos. La agencia espacial Japonesa Hayabusa que se posó en noviembre de 2005 sobre el NEA 25143 Itokawa (Fig. 7). Esta sonda consiguió el 13 de junio de 2010 retornar en una cápsula en condiciones estancas muestras de partículas micrométricas de polvo la superficie del asteroide. Estas fueron las primeras muestras de la historia recogidas en la superficie de un asteroide (Nakamura et al., 2012).

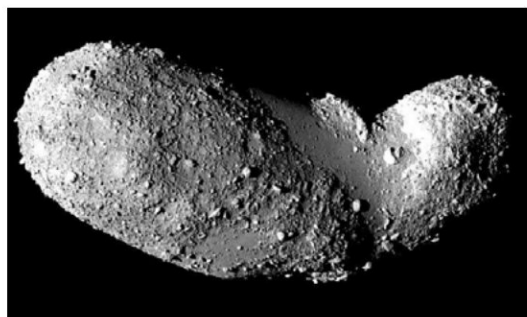


Fig. 7. Imagen del NEA 25143 Itokawa, cartografiado por la sonda Hayabusa (ISAS/JAXA).

Dado que la historia de una buena parte de los asteroides ha estado marcada por infinidad de impactos, no nos debe sorprender que su estructura externa e incluso interna haya sido alterada por esos procesos. De hecho, algunos de esos impactos entre asteroides entrarían en la categoría de catastróficos dando lugar a la fragmentación del objeto en múltiples bloques. Esos bloques o fragmentos resultantes, sometidos a su propia gravedad, se reagruparían formando nuevos asteroides. De hecho, se piensa que buena parte de los asteroides podrían ser pilas de escombros. Este tipo de estructuras (o incluso objetos múltiples) se encuentran entre los pocos asteroides próximos a la Tierra (NEAs) de los que se ha reconstruido su fisonomía en base al empleo del radar. La Figura 8 muestra diferentes perspectivas evidenciando la rotación del asteroide 4179 Toutatis y nos muestra que se encuentra formado por dos objetos de 4 y 2.5 km de eje mayor respectivamente. Tal y como se suele modelar, las colisiones entre asteroides a baja velocidad relativa pueden dar lugar a este tipo de objetos débilmente cohesionados en uno de sus extremos. Tras un impacto, el campo gravitatorio mutuo permite que se reagrupen los bloques mayores. Para no extendernos más en el origen y la evolución de los asteroides, objetivo secundario de este artículo, recomiendo al lector interesado la lectura de la obra divulgativa de Gutiérrez Buenestado (2012).

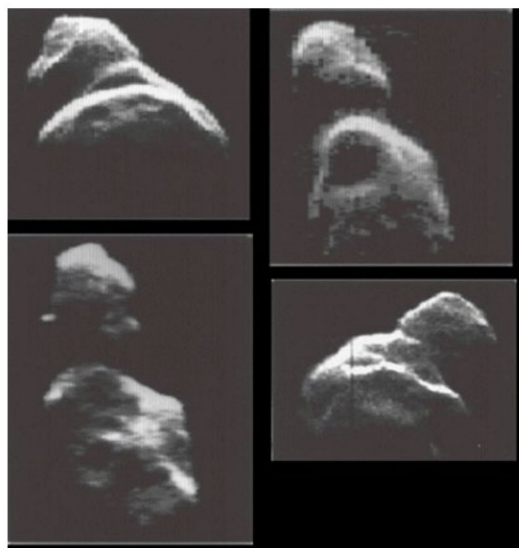


Fig. 8. El asteroide 4179 Toutatis nos muestra que se encuentra formado por dos objetos de 4 y 2.5 km de eje mayor. Secuencia de imágenes evidenciando la rotación tomadas entre el 8 y 13 de diciembre por Steven Ostro (JPL/NASA).

LA ESTANCIA DE LOS METEORITOS EN EL ESPACIO

El lector se sorprenderá ante el grado de sofisticación alcanzado en el estudio de los isótopos contenidos en los meteoritos. En ese sentido, la cantidad de información que se puede extraer sobre la estancia de los meteoritos en el espacio interplanetario resulta particularmente sorprendente y útil para confirmar los escenarios de transporte dinámico anteriormente expuestos. Un aspecto poco conocido por el público es que no sólo podemos conocer la edad exacta de formación de los meteoritos por los cronómetros que proporcionan sus isótopos. Antes de que el meteorito llegue a la superficie terrestre habrá surcado el espacio como un meteoroide. Existe un tipo de radioactividad que es inducida por la exposición del meteoroide a los denominados rayos cósmicos galácticos y a las también partículas energéticas que son producidas en fulguraciones solares y transportadas por el viento solar a todos los rincones de nuestro sistema planetario. Algunas partículas son literalmente implantadas en los meteoroides, otras producen trazas en los materiales discernibles al contemplar esos materiales a través de *Microscopios Electrónicos de Transmisión (TEM)*, mientras que en los casos más energéticos las partículas golpean con tal intensidad los átomos de los minerales meteoríticos que crean núcleos estables o radioactivos diferenciados que son denominados *cosmogénicos*. En base al análisis de las abundancias de esos núcleos cosmogénicos, producidos por el bombardeo de rayos cósmicos, se puede inferir para cada meteorito la denominada Edad de Exposición a los Rayos Cósmicos también conocida como CREAs por el acrónimo anglosajón: Cosmic-Ray Exposure Ages (CREAs).

Los modelos físicos que permiten modelar la exposición de los materiales meteoríticos a los rayos cósmicos proporcionan información del tiempo en que estos materiales han surcado el espacio interplanetario desde que abandonaron su asteroide progenitor. También permiten conocer las dimensiones del meteoroide, el porcentaje de masa perdido en la ablación atmosférica, o la profundidad a la que

se encontraban los materiales que forman los meteoritos supervivientes.

Los datos de las Edades de Exposición a los Rayos C3smicos (CREAs) de las condritas ordinarias revelan que los diferentes grupos de condritas ordinarias se han generado en diversos procesos de fragmentaci3n que los han expuesto a los rayos c3smicos (Eugster et al., 2006). Esto es consistente con la idea de que el procesado colisional de los asteroides que conforman el cintur3n principal ha sido muy importante desde la formaci3n del sistema solar. Muy pocos asteroides han permanecido ajenos a las colisiones catastr3ficas. As3 pues, la distribuci3n de CREAs en los diferentes grupos de condritas indican que la mayor3a de ellas proceden de colisiones acontecidas en el Cintur3n Principal de Asteroides entre 5 y 50 Ma (Eugster et al., 2006). Eso es as3 incluso para la mayor3a de grupos de condritas carbon3ceas aunque las m3s primitivas asociadas a los grupos CI y CM que sospechamos podr3an proceder de cometas poseen CREAs inferiores a unos 10 Ma (v3ase Fig. 9). Por tanto, deben existir mecanismos que destruyen esos meteoroides m3s fr3giles y, posiblemente, a sus cuerpos progenitores en esas escalas temporales.

Fig. 9. Diagrama de las Edades de Exposici3n a los Rayos C3smicos (CREAs) para las condritas ordinarias y de enstatita (izqda.) y para las condritas carbon3ceas (dcha.). Las flechas debajo del nombre de cada grupo indican el n3mero de meteoritos con CREAs inferiores a un mill3n de a3os que no salen en el diagrama. Figura adaptada de Eugster et al. (2006) con permiso de los autores.

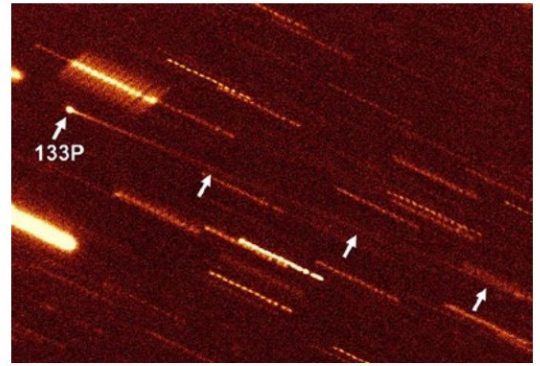
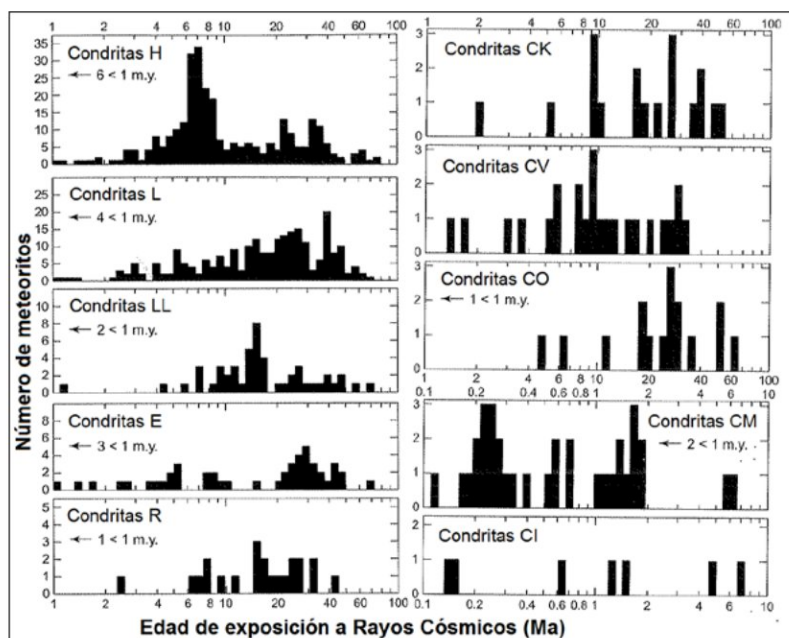


Fig. 10. El cometa del cintur3n principal 133P/Elst-Pizarro registrado el 7 de septiembre de 2002 con el telescopio de Mauna Kea de la Universidad de Hawa3i. En esta imagen se ha hecho seguimiento sobre el cometa por lo que las estrellas aparecen como arcos. El cometa se indica con su numeraci3n y las flechas sucesivas siguen en el campo estelar su cola formada por part3culas de polvo (Cortes3a D. Jewitt-H. Hsieh/U. Hawa3i).

hecho, pas3 durante d3cadas desapercibido como asteroide, por lo que tambi3n posee el n3mero de cat3logo 7968 entre estos objetos (Fig. 10).

Es preciso aclarar al lector que la palabra *cometa*, id3ntica en muchos idiomas modernos, procede del griego y su significado es *cabellera*. De hecho, si los cometas se diferencian en algo de otros astros que encontramos en el firmamento es porque van acompa3ados de largas cabelleras, conocidas como *colas*. Esas colas se producen cuando los cometas se aproximan al Sol pues se subliman el hielo que contienen y los gases que desprenden impulsan peque3as part3culas de hielo y polvo. Ese comportamiento es posible dado que los cometas son cuerpos enormemente fr3giles al haberse formado mediante la agregaci3n de peque3as part3culas s3lidas y hielo presentes en la regi3n m3s externa del disco protoplanetario. De hecho, son cuerpos extraordinariamente porosos cuya densidad media es inferior a la del agua. Al parecer las colisiones a baja velocidad de los diminutos materiales conformaron una estructura esponjosa, altamente porosa que todav3a hoy los caracteriza.

Por si fuera poco, para sorprender algo m3s al lector, los objetos transicionales son tambi3n conocidos como cometas del cintur3n principal. Esto es as3 dado que pueden desarrollar una d3bil coma o cola aunque sea, en algunos casos, de manera espor3dica. Al parecer, forman parte de una poblaci3n de miles de asteroides, muchos de ellos en una *familia colisional* llamada familia del asteroide 24 Temis (Campins et al., 2010). La mayor3a de estos asteroides nunca presenta ning3n tipo de actividad, lo que sugiere que la proporci3n de hielo en estos cuerpos es significativamente menor que en los TNOs y cometas. Obviamente, estos objetos est3n cubiertos de un grueso regolito debido al procesado de la superficie como consecuencia de innumerables impactos acontecidos a lo largo de los eones. En este caso, la conductividad t3rmica es tan baja que pocos cent3metros por debajo pueden encontrarse regiones ricas en vol3tiles. De hecho, se ha podido modelar que un impacto casual fue el mecanismo m3s razonable de la emisi3n de materiales desde la superficie del asteroide Sheila.

La existencia de los cometas del cinturón principal indica que la transición entre objetos rocosos y helados, los primeros formados cerca del Sol y los otros lejos de él, no es súbita, sino que hay una región a unas tres veces la distancia Sol-Tierra poblada con objetos de composición intermedia. Como se formaron en esta región, incorporaron materia orgánica, minerales hidratados e hielos. Por otro lado, se sospecha que es una población de alto interés cosmoquímico dado que la Tierra ha recibido el impacto de muchos asteroides. Si estos realmente tienen un cierto contenido en agua, podrían haber contribuido a la formación de los océanos terrestres hace unos 3.900-3.800 Ma, tiempo en que se ha postulado la migración de los planetas gigantes (Gomes et al., 2005). Tal migración hacia el interior habría dispersado gravitatoriamente miles de objetos de transición hacia rutas de colisión con los planetas terrestres y explicaría, de manera natural, el gran bombardeo tardío que se ha deducido de la antigüedad de grandes cuencas y cráteres lunares en base al estudio de la edad de las rocas lunares recogidas en las misiones Apolo (Trigo-Rodríguez, 2012b).

LOS COMETAS: EL CINTURÓN TRANSNEPTUNIANO Y LA NUBE DE ÖORT

El que los cometas hayan preservado sus propiedades primordiales es debido a que la mayoría han permanecido almacenados en distantes regiones del Sistema Solar sin ser calentados por la desintegración radiactiva o por la luz solar. La fascinación que siempre ha rodeado a estos objetos ha quedado reflejada en la literatura incluso de civilizaciones ancestrales. En base al estudio de las diferentes apariciones de cometas, fue el británico Edmond Halley quien primero identificó la periodicidad en su visualización desde la Tierra. El primer cometa que identificó, cuya espectacularidad y periodo orbital de unos 76 años lo hacía un objeto destacable, fue denominado cometa 1P/Halley. La fascinación por conocer más detalles sobre este cometa hizo que diferentes agencias espaciales diseñasen toda una armada de naves espaciales para explorar de cerca el núcleo del cometa 1P/Halley, generalmente oculto en la coma de gas sublimado de su interior. La pléyade de resultados obtenidos por esas sondas que atravesaron la coma de ese cometa en 1986 supuso un primer avance en el enigmático origen de estos objetos, aunque surgieron muchas otras preguntas. En las últimas décadas la comunidad científica ha ido acumulando evidencias de que son objetos primitivos que preservan en su interior las claves a los procesos físico-químicos acontecidos durante el origen del Sistema Solar. A fin de corroborar esas ideas la misión *Stardust* de la NASA recuperó en el año 2006 por primera vez partículas de un cometa, catalogado como 81P/Wild 2, que de hecho son las primeras muestras sólidas recuperadas *in situ* de un objeto del sistema solar que no sea la Luna (Brownlee et al., 2006). Los estudios de esa sonda revelaron que el cometa 81P/Wild 2 tiene un diámetro de 4.5 km y está compuesto mayoritariamente por una mezcla de hielo, materia orgánica y granos minerales cuyo tamaño típico es de unos 10 micrómetros (un micrómetro es una milésima de milímetro) (Fig. 11).

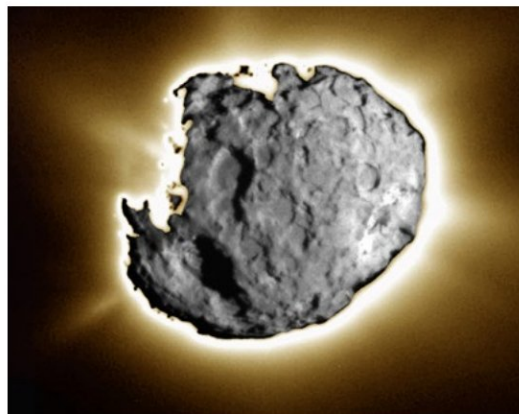


Fig. 11. El cometa 81P/Wild 2 con las regiones activas que emiten el gas sublimado e impulsan las diminutas partículas que la sonda Stardust trajo a la Tierra (Stardust/NASA).

Los objetos en la Nube de Oort y el cinturón transneptuniano son los objetos más abundantes del Sistema Solar (del orden de 10^{12}). Están compuestos básicamente de hielo y silicatos poco procesados que han permanecido en una región alejada del Sol muy fría, “congelados”, por lo que los materiales que los forman son los más primitivos que podemos encontrar. Son los precursores de los cometas, cuerpos que se escapan de la Nube y el Cinturón y se meten en la región cercana al Sol por perturbaciones gravitatorias. De la *Nube de Oort* llegan los cometas en órbitas de largo periodo con órbitas que alcanzan a tener periodos orbitales de decenas de miles de años (Figura 12). Los objetos de la Nube sólo pueden ser detectados, con la tecnología actual, si se transforman en cometas. No se ha observado ningún cuerpo allí dadas las enormes distancias a las que se encuentran. Los objetos transneptunianos (TNOs del inglés trans-neptunian objects) son los “padres” de los denominados Centauros pero también de los cometas de corto periodo (<20 años) (Jewitt, 2008). Mucho se ha avanzado en el conocimiento de estos objetos en la última década. Entre los hechos más notables

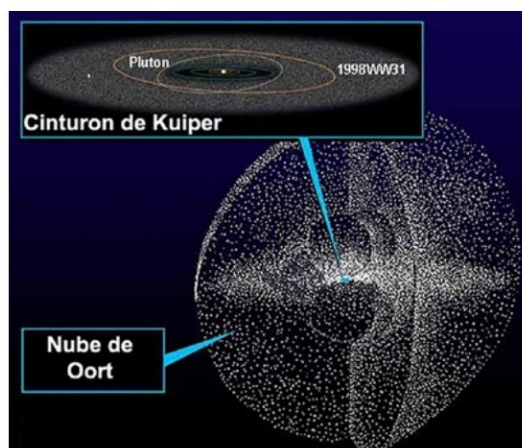


Fig. 12. Diagrama para mostrar el Cinturón de Kuiper y la Nube de Oort (Adaptada con permiso de imagen de D. K. Yeomans (JPL/NASA).

OBJETO	DIÁMETRO (KM)
(136199) Eris	2.326
(134340) Plutón	2.340
(90377) Sedna	1.600
(136472) Makemake	~1.500
(136108) 2002 EL61	1.270
Caronte (satélite de Plutón)	1.210
(84522) 2002 TC302	1.150
(50000) Quaoar	1.140

Tabla II. Principales objetos transneptunianos con diámetro superior a 1000 km.

relacionados con esta población, debe destacarse el descubrimiento en 2005 de 3 TNOs de tamaño similar a Plutón: Eris, Makemake y 2003 EL61 (ver Tabla 2), este último descubierto en el Observatorio de Sierra Nevada por el grupo del Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) liderado por el Dr. José Luis Ortiz que ha realizado importantes contribuciones para conocer mejor las dimensiones y propiedades físicas de los TNOs (Sicardy et al., 2011; Ortiz et al., 2012). En base a los resultados de esos estudios se ha recopilado la Tabla II.

PROBABLES FUENTES DE METEORITOS

Los mecanismos de transporte hasta la Tierra de las rocas que se desprenden en las colisiones o la desintegración de asteroides y cometas no son, ni mucho menos, tan rápidos como podríamos pensar (Morbidelli et al., 2002). Esos fragmentos cuyo diámetro oscila entre 10 metros y una milésima de milímetro se denominan *meteoroides*. Por término medio, tales rocas suelen pasar varias decenas de millones de años en el espacio interplanetario. Estos tiempos se conocen gracias a las Edades de Exposición a los Rayos Cósmicos (CREAs) que ya describimos anteriormente. Dependiendo del tiempo de exposición en el espacio interplanetario, estas partículas acumulan estos isótopos y permiten datar el tiempo desde que se desprendieron de su cuerpo progenitor.

La comprensión de las resonancias dinámicas hace que conozcamos los mecanismos de transporte. Una serie de carambolas cósmicas permitirán que estas rocas encuentren a nuestro planeta en su camino y, sólo en aquellas condiciones geométricas más favorables, con una velocidad y un ángulo de incidencia adecuado, permitirán la supervivencia de restos que alcanzarán la superficie terrestre. A tales objetos se les denomina meteoritos. Por término general, más de un 95% de la masa de estas rocas en el espacio se perderá en la atmósfera en la fase luminosa de *bola de fuego*, produciendo polvo fino, gas caliente y un pequeño porcentaje de luz, suficiente para que estos fenómenos sean extraordinariamente impactantes para los afortunados observadores casuales. La mayoría de los meteoritos que alcanzan la superficie de la Tierra son rocas compuestas esencialmente de silicatos, aunque también los hay metálicos, compuestos por aleaciones de hierro y níquel, principalmente. Sabemos que la mayoría de estos meteoritos proceden de rocas impulsadas desde el cinturón principal. Sin embargo, hemos ido recopilando evidencias de que ciertos objetos próximos a la Tierra pueden producir meteoritos.

A MODO DE CONCLUSIÓN: EL PELIGRO ACTUAL DE IMPACTO

Parece ser que podría haber fuentes adicionales de pequeños asteroides y de grandes meteoroides productores de meteoritos, no directamente enviadas desde el cinturón principal por el mecanismo dinámico de las resonancias planetarias. De hecho, algunas condritas carbonáceas primitivas poseen CREAs de pocos millones de años o incluso de menos

de 500.000 años. Es posible que se hayan producido por la fragmentación reciente de cometas evolucionados pero también puede intervenir otro mecanismo. Sabemos que una cantidad apreciable de NEOs posee estructura de pila de escombros por lo que es posible que en sus aproximaciones a los planetas terrestres pudiesen despegarse por el efecto de la marea gravitatoria rocas suficientemente grandes o incluso fragmentarse en los bloques grandes constitutivos. Tal mecanismo fue propuesto por primera vez a raíz del descubrimiento de un complejo de asteroides representado por el NEO 2002NY40 del que podrían haberse desprendido rocas capaces de generar meteoritos por ese mecanismo (Trigo-Rodríguez et al., 2007). En ese sentido, los estudios de monitorización de grandes bólidos que se realizan desde la Red SPMN está permitiendo ponderar mejor la frecuencia de tales impactos (Madiedo et al., 2014a).

El análisis del flujo de impactos contra la Tierra de objetos situados en la región de NEOs tiene una importancia trascendental debido fundamentalmente a las consecuencias catastróficas que podrían llegar a tener estos eventos. Sabemos que cuanto más grande es el tamaño del objeto que colisiona, muchísima menor es su probabilidad de impactar contra la Tierra, porque existen muchos menos objetos grandes que pequeños, siguiendo aproximadamente una ley de potencias. Este flujo de impactos ha sido estimado mediante diversas técnicas, una de las cuales se basa en el análisis de bólidos registrados en la atmósfera terrestre. De esta manera, Brown et al. (2012) establecieron que la frecuencia de estas colisiones variaba con la energía de estos impactos siguiendo los datos que se muestran en la Figura 13. Así, esta información ha sido tomada por la comunidad científica como referencia para estas estimaciones, si bien otros investigadores que han utilizado técnicas de análisis de impactos de rocas contra la Luna (Ortiz et al. 2006),

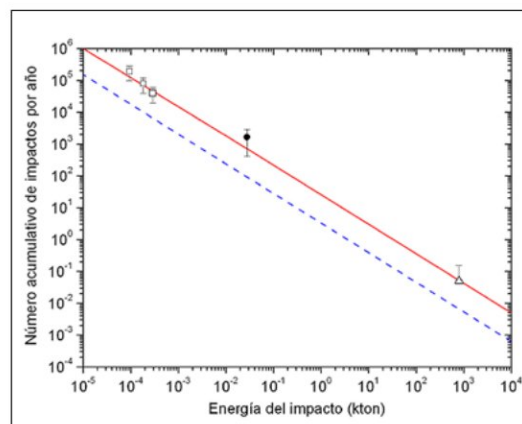


Fig. 13. Frecuencia acumulativa de impactos contra la Tierra en función de la energía del impacto. La línea discontinua corresponde a la tasa de impactos obtenida por Brown et al. (2002). Los cuadrados representan los resultados obtenidos por Ortiz et al. (2006) a partir del análisis de destellos de impactos en la Luna, correspondiendo la línea continua a la frecuencia obtenida a partir de dicho análisis. El resultado correspondiente al gran impacto en la Luna detectado por Madiedo et al. (2014b) está representado mediante el círculo negro, mientras que el triángulo corresponde al flujo de impactos calculado por Brown et al. (2013) a partir del análisis del evento de Chelyabinsk (Figura adaptada de Madiedo et al. 2014b, con permiso de los autores).

ya advirtieron que la tasa real de impactos era muy superior a la establecida por Brown et al. (2012). De hecho, a raíz del análisis del evento de Chelyabinsk, que tuvo lugar en Rusia en febrero de 2012, el propio Peter Brown publicó un estudio (Brown et al. 2013) en el que estableció un factor cercano a diez para la tasa de impactos de objetos con un tamaño superior a 20 metros de diámetro, si bien no contempló que en otro intervalo de tamaños el flujo también puede ser superior. Así, del análisis de superbólidos registrados por la Red Española de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos se desprende que para objetos más pequeños, este flujo también debe corregirse al alza (Madiedo et al. 2014a), extremo que se ha visto asimismo confirmado por la reciente detección (septiembre de 2013) del destello de impacto en la Luna más intenso y largo jamás registrado hasta ahora (Madiedo et al. 2014b).

BIBLIOGRAFÍA

- Barucci M.A. et al., (2012) Marco Polo-R near earth asteroid simple return misión. *Experimental Astronomy* 33, 645-684.
- Brown P., Spalding R.E., Revelle D.O., Tagliaferri E., Worden S.P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*, 420, 294-296, 2002.
- Brown P. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503, 238-241, 2013.
- Brownlee D. et al. (2006) Comet 81P/Wild 2 Under a Microscope, *Science* 314, 1711-1716.
- Campins H. et al. (2010) Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 Themis, *Nature* 464, 1320-1321.
- De León, J., Licandro J., Serra-Ricart M., Pinilla-Alonso N. y Campins H. (2011) Finding the compositional diversity of the Solar System. En *Highlights of Spanish Astrophysics VI*, Proceedings of the IX Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society (SEA), Zapatero Osorio M.R. et al. (eds.), pp. 555-569.
- Eugster O. et al. (2006) Irradiation records, Cosmic-Ray Exposure Ages, and Transfer times of meteorites. En *Meteorites and the Early Solar System II*, D. Lauretta, H.Y. McSween (eds.), The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, pp. 829-851.
- Gaffey M.J. (1976), Spectral reflectance characteristics of the meteorite classes, *Journal of Geophysical Research* 81, 905-920.
- Gomes R., H.F. Levison, K. Tsiganis y A. Morbidelli (2005) Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature* 435, 466-469.
- Grady M. 2000. *Catalogue of Meteorites*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Gutiérrez Buenestado P.J. (2012) Asteroides y Cometas, Colección ¿Qué sabemos de...?, Editorial Catarata-CSIC, Madrid.
- Hsieh H. y D. Jewitt (2006) A population of comets in the Main Asteroid Belt. *Science* 312, 561-563.
- Jewitt D. (2008) Kuiper Belt and Comets: An observational perspective. En *Trans-Neptunian Objects and Comets*, Swiss Soc. For Astrophysics and Astronomy, Springer-Verlag, Heidelberg, Alemania, pp. 1-78.
- Johnson T.V. y Fanale F.P. (1973) Optical Properties of Carbonaceous Chondrites and Their Relationship to Asteroids, *JGR* 78, 8507-8518.
- Madiedo J.M., Ortiz J.L., Trigo-Rodríguez J.M., et al. (2014a) Analysis of two superbólidos with a cometary origin observed over the Iberian Peninsula, Icarus, DOI: 10.1016/j.icarus.2014.01.031.
- Madiedo J.M., Ortiz J.L., Morales N., Cabrera-Cañó J. (2014b) A large Lunar impact blast on September 11th 2013, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, DOI: 10.1093/mnras/stuo83.
- Morbidelli A., W. F. Bottke Jr., Ch. Froeschlé, and P. Michel (2002) Origin and evolution of Near-earth Objects. En *Asteroids III*, W.F.Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R.P. Binzel (eds.), The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, pp. 409-422.
- Nakamura E. et al. (2012) Space environment of an asteroid preserved on micrograins returned by the Hayabusa spacecraft, *Proc. National Academy of Sciences*, doi: pnas.1116236109.
- Nesvorný D., W.F. Bottke Jr., L. Dones, and H. F. Levison (2002a) The recent breakup of an asteroid in the main-belt region. *Nature* 417, 720-722.
- Nesvorný D., S. Ferraz-Mello, M. Holman and A. Morbidelli (2002b) Regular and chaotic dynamics in the Mean-motion resonances: implications for the structure and evolution of the asteroid belt. En *Asteroids III*, W.F.Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi and R.P. Binzel (eds.), The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, pp. 379-394.
- Ortiz J.L., Aceituno, F. J., Quesada J. A., Aceituno J.; Fernández M., Santos-Sanz, P., Trigo-Rodríguez J. M., Llorca J., Martín-Torres F. J., Montañés-Rodríguez P., Pallé E. (2006) Detection of sporadic impact flashes on the Moon: Implications for the luminous efficiency of hypervelocity impacts and derived terrestrial impact rates. *Icarus* 184, 319-326.
- Ortiz J.L. et al. (2012) Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation, *Nature* 491, 566-569.
- Pieters C.M. and L.A. McFadden (1994), Meteorite and Asteroid Reflectance Spectroscopy: Clues to Early Solar System Processes, *Annual Review Earth Planetary Science* 22, 457-497.
- Sicardy B. et al. (2011) A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation, *Nature* 478, 493-496.
- Trigo-Rodríguez J.M., Lyytinen E., Jones D.C., Madiedo J.M., Castro-Tirado A.J., Williams I., Llorca J., Vítek S., Jelínek M., Troughton B., Gálvez F. (2007) Asteroid 2002NY40 as a source of meteorite-dropping boulders, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 382, 1933-1939.
- Trigo-Rodríguez J.M. (2012a) Meteoritos, Colección ¿Qué sabemos de...?, Editorial Catarata-CSIC, Madrid.
- Trigo-Rodríguez J.M. (2012b) Las raíces cósmicas de la vida, Colección El Espejo y la Lámpara, Servei Publicacions UAB, Barcelona.
- Trigo-Rodríguez J.M., Moyano-Camero C.E., Llorca J., Fornasier S., Barucci M.A., Belskaya I., Martins Z., Rivkin A.S., Dotto E., Madiedo J.M. y Alonso-Azcárate J. (2014) UV to far-IR reflectance spectra of carbonaceous chondrites - I. Implications for remote characterization of dark primitive asteroids targeted by sample-return missions, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 437, 227-240.
- Wasson J.T. (1985) *Meteorites: their record of early Solar System history*, W.H. Freeman and Company, New York, EUA. ■

Este artículo fue solicitado desde ECT el día 22 de julio de 2013, y aceptado definitivamente para su publicación el 3 de diciembre de 2013