

El fenómeno meteórico y las clases de meteoritos

The meteoric phenomenon and meteorite classes

JOSEP M. TRIGO-RODRÍGUEZ

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

Resumen El espacio interplanetario está plagado de partículas que son el producto de la erosión de asteroides y planetas a través de impactos. Los cometas también los sufren pero contribuyen a esa población principalmente por desgasificación que lanza eficientemente pequeñas partículas al medio interplanetario. Todos estos fragmentos, denominados meteoroides, se desplazan a velocidades relativas de decenas de km/s y, al ser interceptadas por la Tierra, generan un rastro luminoso conocido como meteoro que se produce al interactuar a gran velocidad con los componentes de la atmósfera. Los meteoros más brillantes se denominan bólidos y su estudio desde la superficie terrestre o desde satélites artificiales permite reconstruir sus trayectorias y deducir los lugares de caída de meteoritos. Aquellos bólidos de luminosidad superior a la Luna suelen producir caídas de meteoritos y, por tanto, suelen ser de estudio prioritario. Finalmente, el artículo describirá someramente las cuatro principales clases de meteoritos: condritas, acondritas, metalorocosos y metálicos.

Palabras clave: Meteoros, bólidos, meteoritos, condritas, acondritas y meteoritos metálicos.

Abstract *The interplanetary space is full of particles that are consequence of erosive processes occurred due to impact processing of asteroids and planets. Comets are also subject to these processes but mainly contribute with particles to this population by outgassing. This mechanism efficiently releases small particles into the interplanetary medium. All these fragments, called meteoroids, are moving at relative velocities of tens of km/s and, when the Earth intercepts them, generate a luminous path known as a meteor due to the high-velocity interaction with atmospheric components. The brightest meteors are called fireballs or bolides and their study from the terrestrial surface or from artificial satellites allows to reconstruct their trajectories and deduce the location where the meteorites fell. These bolides whose luminosity is higher than the Moon's are usually produce meteorite falls and are therefore preferentially studied. Finally, this paper will provide a simple description of the four main meteorite classes: chondrites, achondrites, stony-irons and irons*

Keywords: *Meteors, Fireball/bolide, meteorites, chondrites, achondrites, and iron meteorites.*

DISTINGUIENDO METEORO, METEORITO Y... METEOROIDE

Este volumen especial de la revista de la AEPECT pretende acercar al público el fascinante campo de la Meteorítica y fomentar que desde la Asociación Española de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra puedan sus miembros ayudarnos a difundir y reconocer el valor científico de los meteoritos. Es preciso convencer al público que estas rocas deben ser estudiadas y preservadas adecuadamente. Por ello, es preciso divulgar sus enseñanzas acerca del origen del Sistema Solar, de la Tierra y el de los innumerables cuerpos que lo pueblan.

En este primer artículo se pretende describir el fenómeno meteórico y enumerar los principales ti-

pos de meteoritos que conocemos. El principal objetivo será facilitar la lectura de este monográfico a lectores interesados pero no expertos mediante un texto generalista que sacrifica aspectos técnicos más complejos. Lo cierto es que existe todavía entre el público y los medios de comunicación cierto desconcierto a la hora de describir los fenómenos astronómicos de naturaleza meteorítica. Precisamente, entre los fenómenos menos comprendidos quizás encontremos a los relacionados con los cuerpos menores del Sistema Solar: cometas, asteroides y meteoritos suelen ser los protagonistas de gazapos en los medios de comunicación realmente importantes. Así pues, es común encontrarse en la prensa diaria titulares erróneos tales como: “se acerca un meteorito a la Tierra”, “la pasada noche se vio pasar un

meteorito” o, por ejemplo, “los habitantes fueron sorprendidos por el paso fugaz de un cometa”. En todas estas frases hay gazapos directamente relacionados con la terminología que debe emplearse. En un monográfico como el que nos ocupa el primer paso es explicar de manera sencilla estos términos: asteroide, cometa, meteorito, meteoro y bólido o bola de fuego. Un mayor conocimiento de sus definiciones permitirá evitar muchos de esos errores de interpretación que naturalmente conlleva este desconocimiento en nuestra sociedad.

Todos los que hemos disfrutado alguna vez de la contemplación del firmamento estrellado conocemos que el fenómeno luminoso conocido como *meteoro* o *estrella fugaz* es bastante frecuente. Cada noche podremos contemplar varias decenas de estrellas fugaces si nos fijamos atentamente. Hay otras noches que, sin prestarles demasiada atención, podremos llegar a ver muchas al hacer una actividad al aire libre. Suele decirse que nuestro planeta atraviesa un enjambre meteórico.

A cada meteoro puede asignársele una magnitud de brillo por comparación directa con el brillo de las estrellas y, si se trazase su trayectoria entre las constelaciones, veríamos que cada noche hay regiones de la bóveda celeste que son fuentes de estrellas fugaces. A tales zonas de cielo se las denomina radiantes (Fig. 1). Volviendo a la luminosidad de estrellas y meteoros, los astrónomos hemos definido un sistema logarítmico para definir la magnitud de brillo de las estrellas que contemplamos. Las estrellas más débiles que podemos ver a simple vista poseen magnitud +6 mientras que las estrellas o los planetas más brillantes presentan magnitudes negativas. Así, en la convención astronómica los astros más luminosos poseen magnitudes negativas: la estrella más luminosa es Sírío y posee magnitud -1,5 mientras que Venus suele tener magnitud -4.

Algo más rara suele ser la observación de un *bólido* pero no es sino un meteoro dotado de una luminosidad igual o superior a la del planeta Venus. Sin embargo, en determinadas noches en que la Tierra atraviesa los restos sólidos de un cometa, podemos llegar a ser sorprendidos por bólidos (Fig. 2). Por la espectacularidad e imprevisibilidad de estos fenómenos celestes existen muchos aficionados que los siguen y estudian de una manera similar a como lo hicieron en sus días astrónomos y divulgadores de la talla de Camille Flammarion o Josep Comas Solà. En particular el estudio de las bolas de fuego más luminosas permite poder recuperar meteoritos, rocas supervivientes llegadas de los más lejanos confines de nuestro sistema planetario. En la Tabla I se recopilan los principales casos que se dan en el fenómeno meteórico.

El que podamos observar meteoros y bólidos de manera constante se produce debido a que el espacio interplanetario no está, ni mucho menos, vacío. Contiene partículas que son el resultado de la degradación constante de los cuerpos que forman el Sistema Solar. A esas partículas que surcan el espacio interplanetario se las conoce científicamente con el nombre de *meteoroides*. La Unión Astronómica Internacional (UAI) definió un meteoroides como un objeto sólido de un tamaño

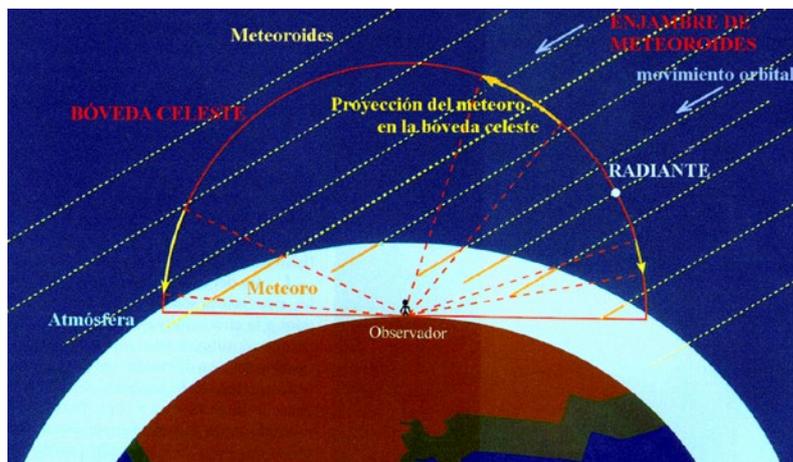


Fig. 1. El radiante de una lluvia de meteoros se produce por la perspectiva en la que las partículas inciden en la atmósfera desde un enjambre meteórico en el que las partículas siguen órbitas similares (J.M. Trigo/CSIC-IEEC).

superior a un átomo o molécula y cuyo diámetro máximo se estima en torno a unos 10 metros. Por tanto, el rango de diámetro es sumamente amplio, comprendiendo desde motas de polvo hasta rocas tan grandes como un elefante. Como nos podemos imaginar los meteoroides de pocos milímetros generarán meteoros, mientras que los que sean de escala centimétrica originarán los bólidos o bolas de fuego. Esto acontece fruto de la colisión con los átomos de la atmósfera que calienta superficialmente los meteoroides hasta que se funden, frag-



Fig. 2. Hay noches plagadas de meteoros en las que los bólidos también son comunes. Fotografía circumpolar mostrando un bólido de las Perseidas 1993 (J.M. Trigo/CSIC-IEEC).

Tabla I. Clasificación del fenómeno meteórico en función de su magnitud.

DENOMINACIÓN	MAGNITUD (M)	EJEMPLOS Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
Micrometeoro	$m > +6$	Visibles a través de prismáticos o telescopios. Evidencian la entrada continua de partículas de polvo interplanetario en la atmósfera terrestre.
Meteoro (Sinónimo popular: <i>estrella fugaz</i>)	$+6 < m < -4$	Se observan decenas en una noche estrellada. Son breves, con una duración típica entre 2 y 5 segundos.
Bólido (Sinónimo popular: <i>bola de fuego</i>)	$-4 < m < -17$	Fenómenos espectaculares pero breves. En ocasiones van acompañados por estelas persistentes durante pocos minutos e incluso sonido. Son producidos por partículas desde pocos centímetros hasta varios metros de diámetro. Los más luminosos pueden sobrevivir a su tránsito atmosférico y llegar al suelo en forma de <i>meteoritos</i> .
Superbólido	$m < -17$	Fenómenos muy raros y que suelen producir grandes caídas de meteoritos como, por ejemplo, el superbólido de Cheliábinsk.

mentan y evaporan dando lugar entonces a esos fenómenos luminosos. Cabe tener en cuenta que los meteoroides inciden sobre la atmósfera terrestre a velocidades vertiginosas, comprendidas entre 11 y 73 km/s, es decir, entre unos 40.000 y unos 260.000 km/hora (Trigo-Rodríguez, 2012a,b).

GRANDES METEOROIDES COMO PADRES DE LOS METEORITOS

Las mayores rocas presentes en el espacio interplanetario se han desprendido de asteroides, cometas o cuerpos planetarios, tales como la Luna, Vesta o Marte. Suponen una fuente de peligro moderado puesto que tales rocas se fragmentan preferentemente en la atmósfera y no se conoce en toda la historia de la Humanidad una muerte causada por el impacto directo de un meteorito (Trigo-Rodríguez, 2012a). Por ello, darle una explicación racional, conocer sus órbitas, los mecanismos de transporte dinámico hacia la Tierra y su cuerpo originario suponen algunos de los principales objetivos científicos de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (www.spmn.uji.es). El fenómeno meteórico es complejo pero nada despreciable dado que cada año llegan a la superficie de nuestro planeta entre cuarenta y ochenta mil toneladas de materia interplanetaria

(McSween, 1999; Brownlee, 2001). Este material llega principalmente como un flujo continuo que da origen a lo que se denomina componente esporádica que representa materiales desprendidos de sus cometas o asteroides hace decenas de miles de años y que, por tanto, alcanza la atmósfera sin estar asociado a un enjambre definido. Sin embargo, los cometas se desintegran muy eficientemente en sus pasos por el perihelio por lo que dan lugar a auténticos enjambres de partículas que mantienen su afinidad orbital, es decir, su coherencia y similitud al cometa engendrador por miles de años. Por poner un ejemplo, recientemente calculamos que durante una tormenta meteórica como la de Dracónidas ocurrida el 8 de octubre de 2011 y asociada al cometa 21P/Giacobini-Zinner pueden llegar a depositarse en la atmósfera decenas de toneladas de material cometario (Trigo-Rodríguez et al., 2013). Los cometas se encuentran precisamente entre los principales objetos que generan enjambres meteóricos aunque también algunos asteroides (Tabla II) parecen producirlos (Jenniskens, 2006).

Se estima que estadísticamente la velocidad promedio de impactos con fragmentos de Asteroides Próximos a la Tierra (NEAs) es de 16 km/s, mientras que para miembros del cinturón Transneptuniano sería en torno a 20 km/s y de 24 km/s para asteroides procedentes del cinturón principal (Trigo-Rodríguez, 2012a).

ENJAMBRE	PERÍODO DE OBSERVACIÓN (DÍA DEL MÁXIMO)	RADIANTE RA (°) DEC (°)		VELOCIDAD GEOCÉNTRICA (KM/S)	THZ (METEOROS/HORA)	CUERPO PROGENITOR / COMENTARIOS
Cuadrántidas	1-5 Enero (3)	229	+49	41	120	NEO 2003EH1
Líridas	16-26 Abril (21)	272	+33	47	30*	C/1861 G1 (Thatcher)
Pi Púpidas	18-25 Abril (23)	110	-45	15	5*	26P/Grigg-Skjellerup
Eta Acuáridas	21 Abr.- 12 May. (5)	337	-1	65	60*	1P/Halley
Tau Herculidas	19 May.-19 Jun. (9)	229	+39	15	3*	73P/Schwassmann-Wachmann 3
Bóotidas de Junio	27 Jun.- 5 Jul. (27)	223	+48	14	5*	7P/Pons-Winnecke
Delta Acuáridas	14 Jul. – 18 Ag.	342	-15	40	25	Posee dos ramas, Norte y Sur
Alfa Capricórnidas	15 Jul.- 11 Sept. (Agosto 1)	306	-9	23	10	169P/NEAT
Perseidas	23 Julio – 22 Agosto (12)	48	+58	59	100*	109P/Swift-Tuttle
Aurígidas	25 Ag.- 6 Sept.	85	+41	66	10*	C/1911 N1 (Kiess)
Dracónidas	6-10 Oct. (9)	264	+58	20	5*	21P/Giacobini-Zinner
Oriónidas	15-29 Oct. (21)	95	+16	66	30*	1P/Halley
Táuridas Norte	12 Oct.-2 Dic.	58	+21	28	10	2P/Encke
Táuridas Sur	17 Sept.-27 Nov.	49	+13	58	+21	NEO 2004 TG10
Leónidas	14-20 Nov. (17)	154	+22	71	20*	55P/Tempel-Tuttle
Alfa Monocerótidas	20-23 Nov. (21)	117	+1	63	10*	Desconocido
Gemínidas	6-19 Diciembre (13-14)	113	+32	35	120*	3200 Phaeton

Tabla II. Principales enjambres meteóricos, fechas en que se puede observar meteoros, posición del radiante (Ascensión Recta y Declinación en grados), la Tasa Horaria Cenital (THZ) o número de meteoros/hora máximo en condiciones perfectas de calidad de cielo y radiante en el cenit. Nótese que un asterisco indica que puede sufrir estallidos, asociados a cortinas densas de material, en los que la actividad meteórica multiplica varias veces la indicada. La última columna indica los cuerpos progenitores de los susodichos enjambres (si son conocidos). NEO es el acrónimo de Near Earth Object, mientras que un número seguido de P/indica el número de catálogo del Minor Planet Center (MPC) de un cometa periódico (p.e. 26P) y, finalmente, un C/seguido del año y un código alfanumérico es la nomenclatura empleada para un cometa no periódico (su nombre, si está establecido, aparece entre paréntesis). Para más información véase entre los Recursos en Internet el enlace del Meteor Data Center.

LA ABLACIÓN EN LA ATMÓSFERA: EL METEORO

La luz del meteor surge de las colisiones entre átomos, dado que buena parte de ellos se excita o ioniza y, al volver los electrones al estado fundamental, emiten luz que dará lugar a las columnas luminosas que denominamos meteoros. Conforme los meteoroides profundizan en la atmósfera sufren choques continuos con las moléculas de la estratosfera que van calentando progresivamente la superficie del meteoride hasta dar origen al proceso de pérdida de masa conocido como *ablación*. Comienza cuando la superficie de los meteoroides alcanza temperaturas de unos 1500° C. En ese momento los diferentes minerales constitutivos, dependiendo de su particular temperatura de fusión, cambian de fase y comienzan a desprenderse y evaporarse para crear el meteor (Fig. 3). Las columnas meteóricas poseen temperaturas entre 3.500 y 5.500° C mientras que en el frente de choque se pueden alcanzar unos 10.000° C (Trigo-Rodríguez, 2002).

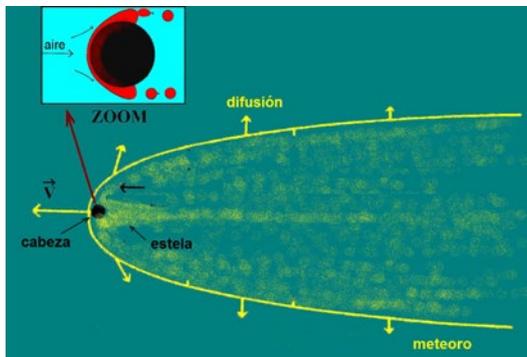
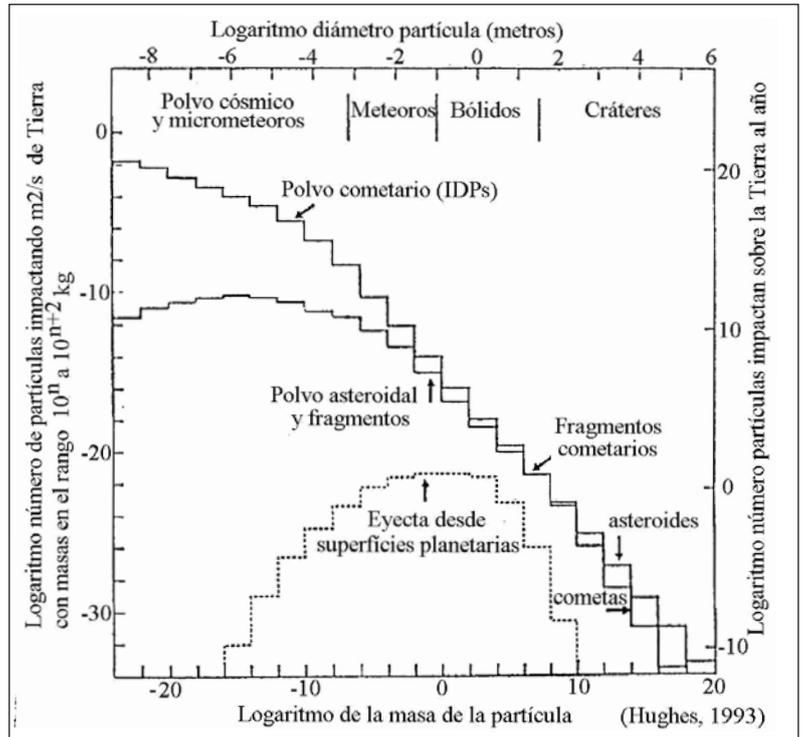


Fig. 3. La formación de la columna meteórica formada por material ionizado se produce durante la brusca deceleración de un meteoride en la atmósfera (J.M. Trigo-CASIC-IEEC).

La Tabla III recopila los rangos de diámetro de las partículas que originan el fenómeno meteórico. La mayoría del polvo interplanetario con diámetro superior a 20 micras se evapora eficientemente pero aquel de menor diámetro, se decelera e irradia el calor eficientemente por lo que sobrevive en lo que se denominan Partículas de Polvo Interplanetario (Brownlee, 2001) (conocidas también como IDPs por su acrónimo anglosajón). Trigo-Rodríguez (2012a) definió un límite inferior para distinguir entre meteoride y polvo de unas 100 micras (es decir de 0.1 mm). La contribución es enormemente variable dependiendo del rango de masa al que nos referimos como muestra como muestra la Fig. 4 que recopila las diferentes fuentes de materiales interplanetarios que llegan anualmente a la Tierra como función del logaritmo de su masa a la entrada a la atmósfera (Hughes, 1993).



Para una mayor comprensión del lector, la Fig. 5 ejemplifica la nomenclatura empleada para referirse al fenómeno meteórico en sus múltiples facetas. Diminutas partículas de polvo cuyas dimensiones no suelen superar unas pocas micras se deceleran eficientemente y alcanzar la superficie terrestre como IDPs o micrometeoritos. Generalmente los micrometeoritos presentan alteración: fusión parcial o total

Fig. 4. Flujo de materiales que alcanzan anualmente la superficie terrestre. Se representa el logaritmo de su masa a la entrada a la atmósfera frente al número. Fig. adaptada de (Hughes, 1993).

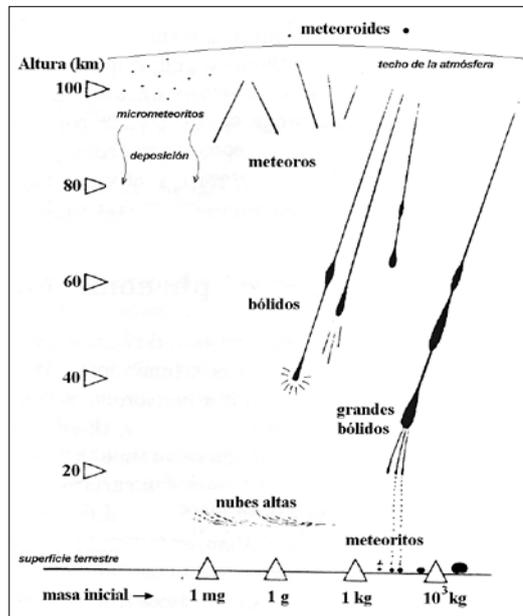


Fig. 5. El fenómeno meteórico a sus diversas escalas. Adaptado de J. Rendtel et al. (1995) con permiso.

CUERPOS EN EL ESPACIO	RANGO DE DIÁMETRO D	PROCESO	EVIDENCIA OBSERVABLE
Polvo interplanetario (IDPs)	D < 100 micras	Deposición progresiva (indetectable)	Micrometeoritos
Meteoroides	0.1 mm < D < 10 m	Meteoros ó bólidos	Meteoritos (raramente pequeños cráteres)
Asteroides/cometas	D > 10 m	Superbólidos	Cráteres de impacto

Tabla III. Denominación de los objetos, rangos de diámetro y fenómenos asociados (Trigo-Rodríguez, 2012b).

que las reduce a unas esférulas vítreas. Sin embargo, por lo general los meteoros son producidos por partículas mayores cuyas masas al entrar en la atmósfera van desde pocos miligramos a cientos de toneladas. Las menores producen estrellas fugaces o meteoros, mientras que las mayores producen bólidos. En general la atmósfera es un eficiente escudo protector pero en ocasiones las rocas mayores sobreviven en un pequeño porcentaje de su masa inicial en forma de meteoritos.

LA BÚSQUEDA Y FASCINACIÓN POR LOS METEORITOS

Los meteoritos son rocas que constituyen una oportunidad científica en muchos aspectos. De manera natural sobreviven como meteoritos pequeños fragmentos de rocas que surcan el espacio interplanetario como consecuencia de la desintegración de los diversos cuerpos que pueblan nuestro sistema planetario.

Los meteoritos van cayendo de manera homogénea por todo el globo. Sin embargo, las búsquedas actuales se concentran en regiones desérticas tanto calientes como heladas. A lo largo de miles de años los meteoritos caen en estas regiones y se acumulan hasta ser encontrados. De desiertos como el Sáhara procede una cantidad ingente de los meteoritos que existen en colecciones de los principales centros de investigación. De la región noroeste de África bajo el acrónimo NWA (North West Africa) aparecen catalogados hasta Junio de 2012 cerca de 6.700 meteoritos. Estos en realidad son una pequeña parte de los decenas de miles encontrados por beduinos, viajeros y aventureros pero, desgraciadamente, muchos de ellos son vendidos al mejor postor. Tal proceso hace que para la mayoría de meteoritos NWA se desconozcan los lugares donde se encontraron: un aspecto importante para nombrarlos y buscar otros quizás asociados a su misma caída. Algunos de esos meteoritos acaban sus días olvidados en los cajones de coleccionistas y, si no son más tarde donados o cedidos para su estudio, se pierden para la ciencia.

Las regiones polares, particularmente la Antártida, son particularmente favorables para la recuperación de meteoritos y quedan ajenas a ese co-

mercio gracias al esfuerzo de diferentes organismos internacionales. Existen diversos procesos por los cuales los meteoritos se acumulan y pueden ser recuperados incluso después de haber formado parte de ingentes masas de hielo glacial (Harvey, 2003). En realidad el interés científico por promover búsquedas exhaustivas en esas regiones surgió tras la designación del Año Internacional de la Geofísica en 1957. Entre 1961 y 1964 varias expediciones recuperaron varios meteoritos metálicos y algunos aparecieron asociados a morrenas glaciares. A finales de 1969 un grupo de científicos japoneses descubrirían nueve meteoritos de cinco diferentes tipos petrográficos en un área relativamente restringida de las Montañas Yamato explorada en el marco de la décima expedición científica japonesa a la Antártida (JARE-10). La acumulación de meteoritos estaba asociada al movimiento y abrasión del hielo de la región que concentraba los especímenes para así facilitar, de manera natural, el proceso de búsqueda (Yoshida et al., 1971).

William Cassidy de la Universidad de Pittsburg se encargó de promover en los Estados Unidos una búsqueda sistemática similar al exitoso programa japonés. De ese modo nació el programa *Antarctic Search for Meteorites (ANSMET)* en 1975. Precisamente el geólogo español Francisco Anguita fue un participante de excepción de la expedición realizada en 1991-1992, la más fructífera hasta entonces con 220 kg de meteoritos recuperados (Anguita y Castilla, 2003). Desde entonces los diversos grupos de investigación ya han descubierto cerca de 40.000 meteoritos en esa región. Para que nos hagamos una idea de su importancia los meteoritos antárticos vienen a ser cerca del 70% de todos los que se encuentran en las colecciones terrestres (Fig. 6).

Los que nos dedicamos profesionalmente a estudiar meteoritos en España deseamos que sean reconocidos como un patrimonio de todos. Deben permanecer en colecciones para su exhibición pública pero también en buena medida deberían ser accesibles a su estudio por investigadores que presenten proyectos bien razonados y se comprometan a devolverlos a los centros de conservación en el plazo requerido para concluir los trabajos. Este es el procedimiento de los principales museos en todo el Mundo y también de la propia NASA. Los meteoritos proporcionan una oportunidad científica, muchas veces irreplicable, para abordar preguntas claves sobre los procesos físico-químicos acaecidos desde los mismos orígenes del Sistema Solar en los cuerpos de los que proceden. Los meteoritos que estamos recuperando en España gracias al esfuerzo de los integrantes de la *Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (www.spmn.uji.es)* quedan a la disposición de museos y de centros de investigación españoles que actúan ante la llamada *Meteoritical Society* como *hosting institutions* para que otros investigadores puedan estudiarlos. Los meteoritos no estaban legislados en España hasta 2007, año en el que conseguimos que se incluyesen tanto los caídos como los encontrados en territorio español como patrimonio geológico y que, por tanto, su comercio futuro quedase prohibido (Ley 45-2007 de Patrimonio Geológico).

Fig. 6. Proceso de catalogado inicial de un meteorito encontrado en Miller Range durante la campaña 2011-2012. Imagen cortesía Antarctic Search for Meteorites Program (ANSMET)/ Katherine Joy.



TIPOS DE METEORITOS

Ya desde el nacimiento mismo de la Meteorítica se hizo una sencilla distinción entre los meteoritos llegados a la Tierra dado que se observó que llegaban meteoritos rocosos, metálicos y metalorocosos. Esta distinción puede todavía emplearse de manera somera pero podrán comprobar del contenido de los diferentes artículos de este volumen que nuestro nivel de conocimiento se ha ampliado enormemente y que los grupos establecidos se basan en criterios químicos y mineralógicos (Fig. 7). Precisamente para los meteoritos rocosos y metálicos existían respectivamente otras denominaciones que resultan hoy en día obsoletas como, por ejemplo: aerolitos ó siderolitos.

Una clasificación bastante más coherente con el conocimiento actual sobre meteoritos parte de la base de identificarlos de acuerdo a su grado de procesado en el cuerpo progenitor. Denominamos meteoritos *no diferenciados* a todos aquellos que proceden de cuerpos de pocos cientos de kilómetro de diámetro y que, por tanto, no han sufrido diferenciación química. En general tales meteoritos se denominan *condritas*. Esa denominación procede del hecho de que en su estructura encontramos mayoritariamente una amalgama de esférulas vítreas de naturaleza ígnea que se denominan *cóndrulos*, junto con otros tipos de partículas de origen diverso. Todas esos componentes agregados en las condritas formaron parte del denominado *disco protoplanetario* mucho antes de que se formasen los planetas o los cuerpos menores del sistema solar. Usando un símil terrestre, podríamos considerar a las condritas como un tipo de rocas sedimentarias del río de materiales que orbitaba alrededor del joven Sol y que, a la postre, daría origen por agregación progresiva a los planetas y cuerpos menores: asteroides y cometas. Así pues, los asteroides condriticos son aquellos que, dado su pequeño diámetro, no sufrieron diferenciación y constituyen auténticos bloques fósiles de la historia temprana del sistema solar.

Por otro lado encontramos en el lado derecho del diagrama de la Fig. 7 todos los meteoritos que proceden de cuerpos planetarios diferenciados. Podemos distinguir tres tipos principales: rocosos (o acondritas), metalorocosos y metálicos. Sus componentes son fruto de procesos metamórficos ocurridos en cuerpos de miles de kilómetros de diámetro. Aunque puedan retener firmas químicas e isotópicas de los minerales primigenios, sus materiales están formados por minerales secundarios, creados por el procesado metamórfico de sus cuerpos planetarios progenitores. De hecho, las fuentes más importantes de acondritas son: la Luna, Marte y Vesta como se describe en el artículo de este mo-

nográfico liderado por Carles Moyano. Diferentes líneas de evidencia, como por ejemplo la existencia de acondritas que no parecen poder asociarse a los grupos anteriormente indicados, indican que deben de existir acondritas como restos de cuerpos planetarios destruidos en el pasado o que todavía no hemos caracterizado. No es de extrañar dada la ausencia de misiones de retorno de muestras que nos permitan delimitar las firmas químicas peculiares de objetos distantes.

Otros meteoritos proceden de regiones del manto interno de cuerpos diferenciados que necesariamente debieron ser excavados en grandes impactos. Este el caso de los meteoritos metalorocosos y metálicos. Los meteoritos metalorocosos más comunes son las *palasitas* que, al ser cortadas y pulidas, revelan ser una preciosa mezcla de cristales de olivino que parecen estar engarzados en una aleación de hierro-níquel (véase Fig. 8).



Fig. 8. Un corte en sección de la palasita Esquel (J.M.Trigo/CSIC-IEEC). El cubo aparece como escala y representa un cm³.

Los meteoritos metálicos llegan a la Tierra procedentes de núcleos de cuerpos planetarios destruidos en grandes impactos. De ese modo, esos meteoritos constituyen los materiales más densos a los que tenemos acceso y pueden considerarse representativos de los que forman el núcleo de la Tierra. En cualquier caso, su descripción detallada corresponde al artículo de este monográfico escrito por Rafael Lozano.

EL VALOR INTRINSECO DE LA RECUPERACIÓN DE METEORITOS

Los meteoritos son muestras de otros mundos que, a similitud de las rocas terrestres, pueden darnos innumerable información acerca de su origen y sus tiempos de formación. Hoy en día sabemos que unos 15 asteroides no diferenciados y unos 80 diferenciados son los que están aportando meteoritos a la Tierra (Eugster et al., 2006). Veremos en algunas contribuciones de este monográfico que los

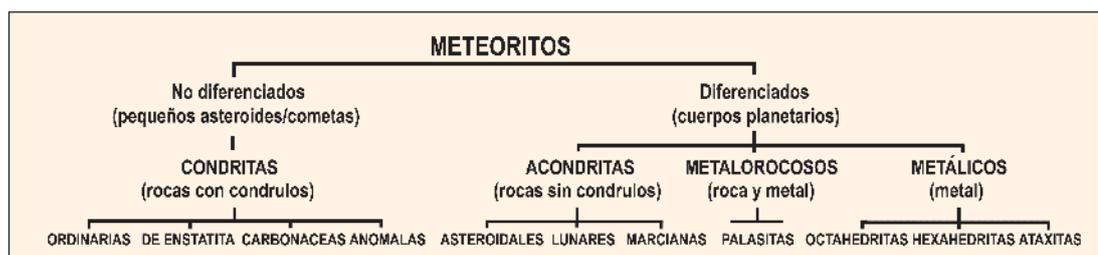


Fig. 7. Esquema de las principales clases de meteoritos (Trigo-Rodríguez, 2012a).

cuerpos no diferenciados están representados por las condritas y albergan los materiales que formaban el disco protoplanetario entre 4.565 y 4.568 Ma atrás en el tiempo. Estos materiales llegan a la Tierra como condritas (Fig. 9) pero también en forma de partículas de polvo interplanetario que se recuperan en la estratosfera con aviones dotados de celdas de captura especiales (Fig. 10).

Recientemente se han añadido a nuestra colección de materiales primigenios las partículas recuperadas por la sonda *Stardust* al atravesar la coma del cometa 81P/Wild 2 (Brownlee et al., 2006) o por la sonda Hayabusa al posarse sobre el asteroide Itokawa (Nakamura et al., 2012). Por el contrario, todos los días llegan meteoritos a la Tierra aunque solo su registro en fase de bólido al entrar en la atmósfera o su captación por medio de métodos radar permite definir su región de origen en el Sistema Solar.

La mayoría de los meteoritos llegados a la Tierra lo hacen sobre zonas remotas y deshabitadas por lo que raramente son observados en su caída y mucho menos queda un registro fotográfico o vídeo del cual obtener información precisa de su trayectoria atmosférica y mucho menos permite extraer información sobre su órbita en el Sistema Solar. Ello nos motivó a crear a raíz de completar mi tesis doctoral la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (Red SPMN: www.spmn.uji.es).

No cabe duda que la recuperación de meteoritos constituye hoy en día un campo de oportunidad en el estudio de las ciencias planetarias. Tanto los meteoritos más primitivos como aquellos que proceden de otros cuerpos planetarios diferenciados nos proporcionan valiosa información sobre los procesos físico-químicos ocurridos durante la formación y

evolución de esas rocas y, por ende, de los cuerpos de los que proceden. Por poner un ejemplo, la recuperación de la eucrita Puerto Lápice, una roca procedente del asteroide Vesta (Llorca et al., 2009) tras haber estimado su trayectoria y rango de posibles órbitas en el Sistema Solar (Trigo-Rodríguez et al., 2009) ha proporcionado valiosa información sobre la formación de la corteza basáltica de este que es el segundo asteroide más masivo tras Ceres.

Los mecanismos de transporte de estas rocas desde sus cuerpos progenitores hasta la Tierra no son, ni mucho menos, tan rápidos como podríamos pensar. Por término medio, desde que son desprendidas tras colosales impactos de la superficie de sus cuerpos progenitores, suelen pasar varias decenas de millones de años en el espacio interplanetario. Esto lo sabemos puesto que en la superficie de estas rocas quedan implantados gases nobles que son emitidos constantemente desde el Sol, formando parte del viento solar. Una serie de carambolas cósmicas permitirán que estas rocas encuentren a nuestro planeta en su camino y, sólo en aquellas condiciones geométricas más favorables, la velocidad y ángulo de incidencia serán adecuadas para permitir la supervivencia de restos que alcanzarán la superficie terrestre en forma de meteoritos. Por término general, más de un 97% de la masa de estas rocas en el espacio se perderá en la fase 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.

Los primeros programas fotográficos de registro de bolas de fuego fueron iniciados en la República Checa por el pionero Znedek Ceplecha del Observatorio de Ondřejov. Todo partió de unas fotografías obtenidas de un gran bólido del que se recuperaría el meteorito Příbram en 1959 (Ceplecha, 1961). A partir de las imágenes obtenidas desde varias estaciones se pudo obtener la órbita en el Sistema Solar del meteorito progenitor. Ese éxito sin precedentes movió al célebre Smithsonian Astrophysical Observatory a crear la llamada Red Prairie en los Estados Unidos de América que consistía en dieciséis estaciones fotográficas que monitorizaron el firmamento para identificar grandes bólidos productores de meteoritos alrededor del estado de Nebraska. El 3 de enero de 1970 una gran bola de fuego fue registrada sobre Oklahoma y la reconstrucción de su trayectoria permitió la recuperación del meteorito Lost City (McCrosky et al., 1971). En total se recuperaron 4 fragmentos, totalizando 17 kg de condritas ordinarias de clase H5 pero la financiación del proyecto llegó a su fin años después. Sería una red fotográfica canadiense liderada por I. Halliday quien recuperase en 1977 el meteorito Innisfree (Halliday et al., 1978).

Queda pues fehaciente que las redes de bólidos requieren años de trabajo para conseguir la recuperación de meteoritos dado que no siempre las caídas ocurren en los lugares más favorables. Hasta la actualidad, las órbitas precisas de una quincena de meteoritos han sido obtenidas en base a la reconstrucción de sus trayectorias en base a registros casuales de sus bolas de fuego (Tabla IV). En el caso de España, conseguimos obtener la órbita heliocéntrica de la condrita ordinaria Villalbeto de la Peña

Fig. 9. Un ejemplar con masa próxima al kg de la condrita carbonácea Murchison de la Leonard Collection de UCLA. A simple vista pueden verse las inclusiones refractarias y los cóndrulos entre la matriz carbonácea (Imagen: J.M.Trigo/CSIC-IEEC).

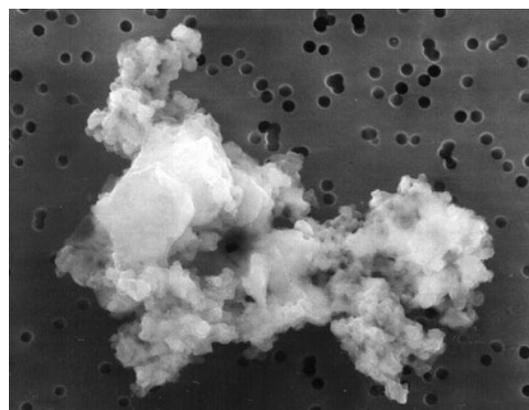


Fig. 10. Partícula de polvo interplanetario ó IDP (Don Brownlee/ NASA).

METEORITO	CLASE	Año	ELEMENTOS ORBITALES		
			a (AU)	e	i (°)
Pribram	CO (H5)	1959	2.401±0.002	0.6711±0.0003	10.482±0.004
Lost City	CO (H5)	1970	1.66±0.01	0.417±0.001	12.0±0.1
Innisfree	CO (L5)	1977	1.872±0.001	0.4732±0.0001	12.27±0.01
Peekskill	CO (H6)	1992	1.49±0.03	0.41±0.01	4.9±0.2
Tagish Lake	CC	2000	2.1±0.2	0.57±0.05	1.4±0.9
Moravka	CO (H5-6)	2000	1.85±0.07	0.47±0.02	32.2±0.5
Neuschwanstein	CE (EL 6)	2000	2.40±0.02	0.670±0.002	11.41±0.03
Park Forest	CO (L5)	2003	2.53±0.19	0.680±0.023	3.2±0.3
Villalbeto de la Peña	CO (L6)	2004	2.3±0.2	0.63±0.04	0.0±0.2
Bunburra	Eucrita	2007	0.8514±0.0009	0.245±0.0013	9.07±0.07
Almahata Sitta	Ureilita	2008	1.308201 ±0.000009	0.312065 ±0.000003	2.54220 ±0.00004
Maribo	CC (CM2)	2009	2.23	0.8	0.26
Grimsby	CO (H5)	2009	2.04±0.05	0.518±0.011	28.07±0.28
Jesenice	CO (L6)	2009	1.75±0.07	0.431±0.023	9.6±0.5
Mason Gully	CO (H5)	2010	2.47±0.004	0.6023±0.0007	0.832±0.013
Chelyabinsk	CO (L5-6)	2013	1.72±0.02	0.571±0.006	4.98±0.12

Tabla IV. Elementos orbitales de caídas de meteoritos recopilada por Konovalova et al. (2013) aunque se incluye también los datos recientes de Chelyabinsk (Borovička et al., 2013). Allí se facilita una lista completa de referencias. CO significa condrita ordinaria del subgrupo indicado, CC significa condrita carbonácea y CE condrita de enstatita. Las siglas a, e, i son, respectivamente, abreviaturas del semieje mayor, la excentricidad y la inclinación.

caída en el municipio palentino del mismo nombre el 4 de enero de 2004 (Llorca et al., 2005; Trigo-Rodríguez et al., 2006). También, en nuestro afán de obtener la mayor información posible de cada caída de un meteorito en España en el marco de la Red SPMN restringimos en base a fotografías el rango de órbitas posibles para la caída de la eucrita Puerto Lápice (Trigo-Rodríguez et al., 2009).

En general los programas fotográficos de detección de bolas de fuego han ido quedando obsoletos y están dando paso a programas de monitorización continua del firmamento en base a cámaras CCD y de vídeo detección en las que la Red SPMN ha sido pionera (Trigo-Rodríguez et al., 2004; Madiedo y Trigo-Rodríguez, 2008; Madiedo et al., 2013). En este sentido, los modelos de sus trayectorias atmosféricas que se obtienen y el estudio de las imágenes de modo secuencial permiten seguir la fragmentación y deriva de los diversos fragmentos resultantes para conocer en más detalle los procesos de fragmentación de los meteoritos llegados a la Tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- Anguita F. y G. Castilla (2003) Crónicas del Sistema Solar, Equipo Sirius, Madrid.
- Borovička J. et al. (2013) The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor, *Nature* 503, 235-237.
- Brownlee D. (2001) The origin and properties of dust impacting the Earth. En *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's history*, Peucker-Ehrenbrink B. y Schmitz B. (eds.), Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, págs. 1-12.
- Brownlee D. et al. (2006) Comet 81P/Wild 2 Under a Microscope, *Science* 314, 1711-1716.
- Ceplecha Z. 1961. Multiple fall of Pribram meteorites photographed. *Bull. Astron. Inst. Czech.* 12:21-47.
- Eugster, O., Herzog, G.F., Marti, K. y Caffee, M.W. (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, 829-851.
- Halliday I., Blackwell A. T. & Griffin A. A. 1978. The Innisfree meteorite and the Canadian camera network. *J. Roy. Astron. Soc. Canada.* 72:15-39.
- Hughes D.W. (1993) Meteoroids: an overview. En *Meteoroids and their parent bodies*, Proceedings of the International Astronomical Symposium held at Smolenice, Slovakia, July 6-12, 1992, Bratislava: Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, 1993, editado por J. Stohl and I.P. Williams, p.15-28.
- Jenniskens P. (2006) Meteor showers and their parent comets. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 790 págs.
- Konovalova N., Madiedo J.M. y Trigo-Rodríguez J.M. (2013) The Tajikistan superbolide of July 23, 2008. I. Trajectory, orbit and preliminary fall data. *Meteoritics & Planetary Science* 12, 2469-2479.
- Llorca J., J.M. Trigo-Rodríguez, J.L. Ortiz, J.A. Docobo, J. Garcia-Guinea, A.J. Castro-Tirado, A.E. Rubin, O. Eugster, W. Edwards, M. Laubenstein and I. Casanova (2005) The Villalbeto de la Peña meteorite fall: I. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field and petrography. *Meteoritics & Planetary Science* 40, 795-804.
- Llorca J., I. Casanova, J. M. Trigo-Rodríguez, J. M. Madiedo, J. Roszjar, A. Bischoff, U. Ott, I. A. Franchi, R. C. Greenwood, M. Laubenstein (2009) The Puerto Lápice eucrite. *Meteoritics and Planetary Science* 44, 159-174.
- Madiedo J.M., y J.M. Trigo-Rodríguez (2008) "Multi-station video orbits of minor meteor showers", *Earth Moon and Planets* 102, 133-139.
- Madiedo J.M., Trigo-Rodríguez J.M.; Ortiz J.L.; Castro-Tirado A. J., Pastor S., de los Reyes, J.A. y Cabrera-Cañó J. (2013) Spectroscopy and orbital analysis of bright bolides observed over the Iberian Peninsula from 2010 to 2012. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 433, 560-570.
- McCrosky R.E., Posen A., Schwartz G. & Shao C.-Y. 1971. Lost city meteorite: its recovery and a comparison with other fireballs. *J. Geophys. Res.* 76:4090-4108.

McSween H.Y. (1999) Meteorites and their parent bodies. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

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.

Rendtel J., Arlt R. y McBeath A. (1995) Handbook for Visual Meteor Observers, International Meteor Organization Publication, Antwerp, Bélgica.

Trigo-Rodríguez J.M. (2002) Análisis espectroscópico de fragmentos cometarios y asteroidales durante su entrada a la atmósfera terrestre. Tesis doctoral, Universidad de València: <http://hdl.handle.net/10803/9481>.

Trigo-Rodríguez J.M., A. Castro-Tirado, J. Llorca, J. Fabregat, V. J. Martínez, V. Reglero, M. Jelínek, P. Kubánek, T. Mateo and A. de Ugarte Postigo (2004) The development of the Spanish Fireball Network using a new all-sky CCD system. Earth, Moon Planets 95, 553-567.

Trigo-Rodríguez J.M., J. Borovička, P. Spurný, J.L. Ortiz, J.A. Docobo, A.J. Castro-Tirado, and J. Llorca (2006) The Vilalbeto de la Peña meteorite fall: II. Determination of the atmospheric trajectory and orbit. Meteoritics & Planetary Science 41, 505-517.

Trigo-Rodríguez J.M., J. Borovička, J. Llorca, J. M. Madiedo, J. Zamorano, and J. Izquierdo (2009) "Puerto Lápice eucrite fall: strewn field, physical description, probable fireball trajectory, and orbit", Meteoritics and Planetary Science 44, 175-186.

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., Madiedo J.M., Williams I.P., Dergham J., Cortes J., Castro-Tirado A.J., Ortiz J.L., Zamorano J., Ocaña F., Izquierdo J., Sánchez de Miguel A., Alonso-Azcárate J., Rodríguez D., Tapia M., Pujols P., Lacruz J., Pruneda F. Oliva A., Pastor Erades J., and Francisco Marín A. (2013) "The 2011 October Draconids outburst. I. Orbital elements, meteoroid fluxes and 21P/Giacobini-Zinner delivered mass to Earth", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 433, 560-570.

Yoshida M. et al. (1971) Discovery of meteorites near Yamato mountains, East Antarctica. Japanese Antarctic Record 39, 62-65.

RECURSOS EN INTERNET

Listado de bólidos sobre España de la Red SPMN: <http://www.spmn.uji.es/ESP/SPMNlist.html>

Meteor Data Center: <http://www.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007/>

Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos: www.spmn.uji.es ■

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