



La Sala blanca de Meteorítica y Retorno de Muestras del Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC).
(Excepto donde se indica, todas las imágenes son cortesía de los autores)

CARACTERIZANDO ASTEROIDES, COMETAS Y SUPERFICIES PLANETARIAS EN BASE AL ESTUDIO DE SUS METEORITOS

LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS METEORITOS, EN PARTICULAR SUS PROPIEDADES REFLECTIVAS Y MECÁNICAS, SON VALIOSAS PARA CONOCER MEJOR LAS SUPERFICIES ASTEROIDALES Y PLANETARIAS E INTERPRETAR TANTO LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y LA MINERALOGÍA DE ESOS CUERPOS COMO LOS PROCESOS QUE LOS HAN IDO ESCULPIENDO A LO LARGO DE LOS EONES. AQUÍ DESCRIBIMOS ALGUNAS DE LAS TÉCNICAS QUE ESTAMOS EMPLEANDO PARA ESTUDIAR METEORITOS Y OBTENER CLAVES SOBRE LA NATURALEZA Y COMPOSICIÓN DE LOS CUERPOS PROGENITORES DE ESAS ROCAS CAÍDAS DEL CIELO.

JOSEP M. TRIGO-RODRÍGUEZ, ELOY PEÑA-ASENSIO, ALBERT RIMOLA, JORDI LLORCA, J. IBÁÑEZ-INSA, JORDI SORT Y JACINTO ALONSO-AZCÁRATE

Las rocas y fragmentos de metal procedentes del medio interplanetario que son capaces de sobrevivir el frenado aerodinámico a velocidades supersónicas alcanzando la superficie terrestre se denominan meteoritos. El estudio de tales objetos nos permite profundizar en aspectos desconocidos de sus cuerpos progenitores, generalmente asteroides –y quizás cometas– pero también cuerpos planetarios como la Luna y Marte. Por si fuese poco, es posible datar los procesos que los formaron y esculpieron a partir de modernas técnicas de datación isotópica. De ese modo, la ciencia de los meteoritos consigue recopilar, pieza a pieza, algunos de los datos más relevantes para reconstruir el puzle del nacimiento de nuestro sistema planetario y los procesos que han permitido transferir esas rocas desde sus cuerpos progenitores hasta la Tierra.

Sucesos tan impresionantes como el superbólico acontecido por la fragmentación de un pequeño asteroide de unos 18 metros de diámetro han incrementado el interés del público por los meteoritos. Ese impresionante evento captado casualmente por decenas de cámaras el 15 de febrero de 2013 acabó con la recuperación de cientos de fragmentos del meteorito que cayeron en las proximidades de la localidad de Chelyabinsk, en Rusia. Aun así, todavía hoy, en muchos países no se reconoce la relevancia del estudio de los meteoritos. En España, el número de caídas de meteoritos recuperadas hasta la fecha (Tabla 1) señala una carencia muy significativa de hallazgos de nuevos ejemplares (Trigo-Ro-

dríguez *et al.*, 2014). En la península ibérica las estadísticas indican que anualmente cae un meteorito con una masa superior al kilogramo. Con este artículo, deseamos fomentar el estudio científico de estas rocas, dada la relevante información que contienen para comprender los cuerpos de los que proceden. Mejorar nuestra comprensión de sus propiedades fisicoquímicas puede ser también importante de cara a una necesidad eventual de desviar asteroides potencialmente peligrosos o, incluso, para la explotación futura de recursos minerales.

LAS CLASES ESPECTRALES DE LOS ASTEROIDES Y SU SEMEJANZA CON LOS METEORITOS

Es de sobra conocido que, tanto en el rango visible como en el infrarrojo próximo, los cuerpos del Sistema Solar no poseen luz propia, sino que reflejan la luz del Sol. En otras regiones del espectro electromagnético es diferente dado que, por ejemplo, en el infrarrojo reemiten parte de la energía recibida del astro rey. Dependiendo de la composición mineralógica de los materiales que cubren la superficie de asteroides y cometas, sus espectros de reflexión presentan ciertas regiones que se comportan de manera no especular, es decir, reflejan mucho menos la luz recibida del Sol. Para referirnos a ellas las denominamos bandas espectrales y su origen está en que los minerales constitutivos absorben la luz solar en esas regiones específicas. Podemos emplear ese comportamiento como una oportunidad para identificar sus componentes.

La caracterización de la composición superficial del material de un asteroide se basa en la interpretación de ciertas propiedades de diagnóstico que determinan la presencia y abundancia de los minerales que la conforman. Para comprender la respuesta de esos minerales se obtienen en los laboratorios espectros de transmisión y reflexión de multitud de minerales que pueden compararse con los espectros de meteoritos o, incluso, con los de asteroides y otros cuerpos, obtenidos de manera remota. Para que resulten útiles deben simularse diferentes ángulos de visión y de incidencia, a diferentes temperaturas, texturas y tamaño del grano, así como considerando diversos porcentajes de las fases minerales respectivas cuando se trata de mezclas. Las rocas son un conjunto de minerales que contribuirán al espectro de reflexión en función del porcentaje que cada mineral ocupe en ellas. Todas estas calibraciones previas ayudan a caracterizar el espectro de reflexión de meteoritos, asteroides, cometas y cuerpos planetarios de los que proceden.

La espectroscopia de reflexión desde el rango ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR) constituye la técnica indirecta más sensible y frecuentemente empleada para caracterizar la composición de los asteroides. El infrarrojo medio se emplea para identificar la presencia de bandas de absorción relacionadas con minerales hidratados y, por tanto, la presencia de agua en esos cuerpos. Las características de diagnóstico en estos espectros provienen de transiciones vibracionales y elec-

trónicas dentro de especies moleculares o minerales específicas, aunque también se emplean los valores de reflectividad relativa y la pendiente particular de cada espectro. En la Figura 1 se muestran los espectros de reflexión de algunos tipos espectrales de asteroides comparados con algunas clases de meteoritos que pueden considerarse buenos representantes de las superficies de los distintos asteroides.

Como podemos apreciar en esa figura, cada tipo de meteorito presenta características espectrales distintivas. Por ejemplo, el olivino presenta una banda ancha de absorción centrada en 1 μm , formada por la superposición de tres bandas individuales, mientras que el piroxeno muestra un par de absorciones cerca de 1 y 2 μm , cuya posición depende, entre otras cosas, del mayor o menor contenido de calcio y hierro del mineral. Dado que los asteroides son mezclas heterogéneas de diversos minerales, será el conjunto de los componentes que presentan tales bandas de absorción los que delimiten la forma final del espectro de reflexión del objeto. Otros factores también intervendrán como, por ejemplo, la geometría con la que observemos el objeto, la textura y grado de choque de la superficie, la presencia de material pulverizado o regolito, etc.

Los meteoritos pueden ser buenos símiles de los materiales que forman los asteroides. Sin embargo, esos cuerpos han estado sometidos a todo tipo de procesos y sus superficies han sido alteradas (Beitz *et al.*, 2016). Por ejemplo, los materiales de las superficies de los asteroides han

sufrido colosales impactos que indujeron la formación de brechas o incluso pulverizaron sus materiales superficiales. A su vez, esas superficies han sido alteradas por el llamado procesado espacial (*space weathering*). Por todo ello, los asteroides no producen espectros exactamente idénticos a los meteoritos que alcanzan la superficie terrestre. Recordemos que en la fase lumínica (conocida como meteoro o bólido) producida por el frenado hidrodinámico de esas rocas que llegan a la atmósfera a velocidades hipersónicas se pierde más del 90 % de su masa inicial. Así pues, aunque muchos meteoritos estén compuestos por mezclas similares de diversos minerales, no pueden reproducir las peculiaridades acontecidas por el efecto del procesado interplanetario.

LAS CLASES ESPECTRALES DE LOS ASTEROIDES

No entraremos aquí a describir el proceso de obtención del espectro de un asteroide a través de un telescopio. Para obtener el espectro de reflexión del asteroide observaremos una estrella de tipo solar, cuyo espectro electromagnético en el rango considerado será prácticamente idéntico al solar. Por ello, si deseamos calibrar el espectro de reflexión del asteroide dividiremos su espectro por el de la estrella análoga solar. De ese modo llegaríamos a un espectro como el de la Figura 2, un asteroide que procede de un cuerpo diferenciado. Se trata de un asteroide del tipo espectral V, compuesto principalmente por silicatos como el olivino y el piroxeno. Ambos minerales son diferentes tipos de si-

licatos de magnesio y hierro (los piroxenos también pueden contener calcio). Precisamente el piroxeno posee mínimos de absorción en la luz que refleja entre 0,9 y 1,9 μm , tal y como podemos apreciar en la Figura 2. De hecho, por la profundidad de esas bandas podemos aventurar que la relación olivino/feldespato es pequeña. Gracias a paquetes de software especializados, es posible cuantificar las proporciones minerales para obtener el mejor ajuste a los espectros y, de ese modo, tener una idea de los componentes de los asteroides (DeMeo *et al.*, 2009).

Así pues, comparando el espectro de reflexión de cualquier asteroide con las diferentes clases espectrales que se conocen podremos determinar cualitativamente la composición superficial del objeto. Se pueden entonces identificar los principales minerales que conforman un asteroide de manera remota. Un ejemplo de las formas típicas de esos diferentes grupos de asteroides se muestra en la Figura 3, donde se representan los espectros típicos desde el ultravioleta en 0,4 micras hasta el infrarrojo próximo en 2,5 micras. De esta forma se pueden distinguir familias C (a la izquierda) y S (a la derecha), presentando múltiples subclases. Además, los asteroides tipo V (por Vesta) poseen dos bandas de absorción características (0,9 y 2 micras) debidas a la presencia de piroxeno (silicato). Los asteroides tipo A tienen también una banda, centrada a 1 micra, que se debe al olivino. Los asteroides tipo D poseen una pendiente muy pronunciada hacia el infrarrojo, asociada a la presencia de compuestos car-

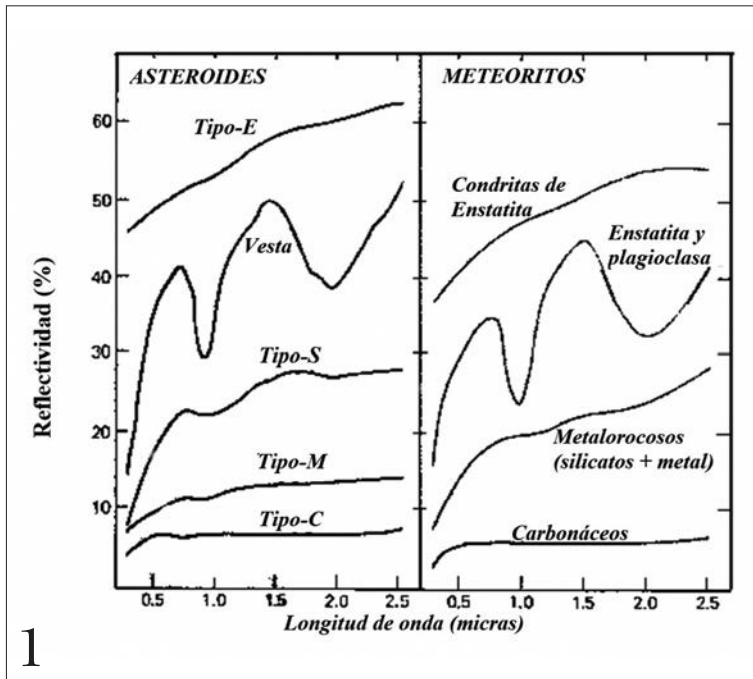


FIGURA 1. Espectros de reflexión de varios tipos de asteroides y meteoritos. Imagen adaptada de McSween (1999).

FIGURA 2. En azul podemos ver el espectro de un asteroide Vestoides comparado con la forma promedio de los asteroides tipo V.

FIGURA 3. Formas típicas de las clases taxonómicas de los distintos asteroides. El eje de abscisas indica la longitud de onda para cada espectro típico entre 0,4 y 2,4 micras. (DeMeo et al., 2009)



bonáceos. Aquellos de tipo B tienen una pendiente azul (la B viene de blue), y todavía no se sabe muy bien qué materiales producen estos espectros. Los diferentes tipos de espectros asteroidales se proporcionan en la Figura 3.

NUESTRA BÚSQUEDA DE CUERPOS PROGENITORES DE LOS METEORITOS

Nuestra experiencia en el estudio de bólidos nos sugiere que muchos de ellos, producidos por meteoroides frágiles, pueden acabar con masas terminales no nulas. El hecho de tener acceso a los meteoritos Antárticos de la NASA (el Instituto de Ciencias del Espacio del CSIC es repositorio internacional) nos permite disponer de todo tipo de materiales primigenios. Llevamos ya una década identificando meteoritos de relevancia con la intención de poder asociarlos a sus respectivos asteroides.

Entre los trabajos realizados encontramos un raro espécimen prístino del grupo de condritas carbonáceas ricas en metal, clasificado como CH3. Es el meteorito *Pecora Escarpment* (PCA) 91467, recuperado por el programa de búsqueda y catalogación *Antarctic Search for Meteorites* (ANSMET) en 1991. Cuando es-

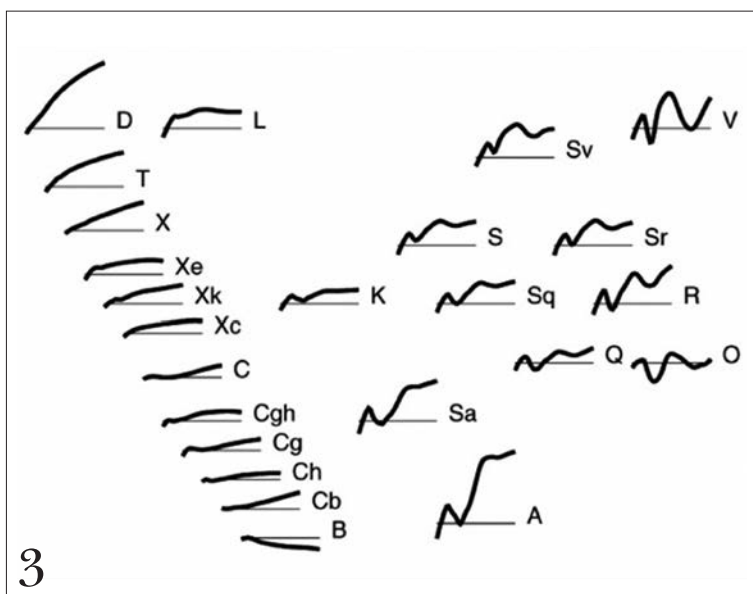


TABLA 1. CAÍDAS ACONTECIDAS EN ESPAÑA RECONOCIDAS POR LA METEORITICAL SOCIETY

Meteorito	Año	Comunidad	Tipo	Masa (g)
Oliva-Gandía	1520	C. Valenciana	Rocoso sin clas.	-
Barcelona	1704	Catalunya	OC	-
Sena	1773	Aragón	H4	4000
Berlanguillas	1811	Castilla y León	L6	1440
Barea	1842	La Rioja	Mesosiderita, A1	3200
Nulles	1851	Catalunya	H6	5000
Oviedo	1856	Asturias	H5	205
Molina	1858	C. Murcia	H5	144 000
Cañellas	1861	Catalunya	H4	945
Sevilla	1862	Andalucía	LL4	180
Cangas de Onís	1866	Asturias	H5	34 000
Cabeza de Mayo	1870	Murcia	L/LL6	25 000
Roda	1871	Aragón	Diogenita	400
Guareña	1892	Extremadura	H6	39 000
Los Martínez	1894	C. Valenciana	L6	25
Madrid	1896	C. Madrid	L6	400
Quesa	1898	C. Valenciana	Metálico, IAB	10 750
Olivenza	1924	Extremadura	LL5	150 000
Ojuelos Altos	1926	Andalucía	L6	5850
Olmedilla de Alarcón	1929	Castilla-La Mancha	H5	40 000
Ardón	1931	Castilla y León	L6	5,5
Reliegos	1947	Castilla y León	L5	17 300
Villalbeta de la Peña	2004	Castilla y León	L6	3500
Puerto Lápice	2007	Castilla-La Mancha	Eucrita-br	500

Es de remarcar la relativa ausencia de caídas durante el siglo XX. En particular pasaron 57 años entre la caída de Reliegos y la de Villalbeta de la Peña.

tudiamos en detalle su espectro de reflexión comprobamos que su comportamiento espectral en diferentes bandas podría ser representativo del asteroide (21) Lutetia (Figura 4).

En otro estudio reciente descubrimos que dos condritas carbonáceas sin agrupar, es decir, inusuales y sin que tengamos suficientes especímenes en las colecciones de meteoritos como para asociarlas a un grupo concreto, poseen un espectro de reflexión muy parecido al del cometa 2P/Encke. En un trabajo reciente pudimos asociarlo a ese tipo de cometas periódicos (Tanbakaoui *et al.*, 2020). La Figu-

ra 5 muestra una comparativa del espectro de 2P/Encke con la de ambas condritas carbonáceas, las únicas entre decenas de condritas comparadas que muestran similitud con el cometa. Interpretamos esa similitud como resultado de los procesos de brechificación de un cometa de periodo corto, sometido a los impactos de pequeños proyectiles que excavan y modifican su superficie (Figura 6).

De hecho, en asteroides condriticos los efectos de las colisiones pueden llegar a cambiar las propiedades reflectivas (Moyano-Camero *et al.*, 2017b). Los impactos crean sobrepresiones

que volatilizan ciertos elementos y crean venas de fundido que atraviesan y penetran en los minerales (Figura 7). La interacción de las ondas con las grietas y los poros proporciona información sobre la heterogeneidad de la presión localizada y la temperatura en las rocas formativas. Sin embargo, no podemos más que especular sobre la porosidad de un meteorito previa al evento de choque. Si el cuerpo progenitor contiene grietas de varios centímetros de ancho u otras heterogeneidades de una escala relativamente grande, el período caótico inicial durante el que se equilibran las presiones puede ser de cientos de microsegundos, lo que puede conllevar la creación de venas de fusión de mayor tamaño durante los eventos de choque, según análisis aproximados (Sharp y DeCarli, 2006). Ese tipo de procesos da lugar a una reducción de la capacidad reflectiva de los minerales por el incremento de materiales opacos, siendo, por tanto, un proceso natural que contribuye a oscurecer asteroides potencialmente peligrosos (Moyano-Camero *et al.*, 2017). Un proceso similar ocurre como consecuencia de la alteración acuosa de los minerales formativos de ciertas condritas que poseen cantidades de agua muy significativas (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2019)

LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS METEORITOS EN BASE A NANOINDENTACIÓN

Una de las técnicas que hemos aplicado satisfactoriamente y de manera pionera a los meteoritos es la nanoindentación, que permite obtener sus propiedades mecánicas con asombrosa preci-

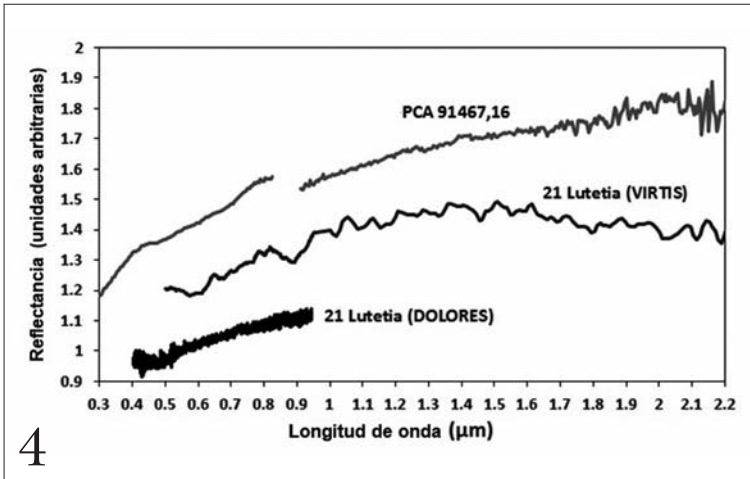


FIGURA 4. Ejemplo de espectros de la condrita carbonácea PCA91467. Los espectros se han desplazado 0,2 unidades para facilitar su comparación y corroborar su similitud. (Adaptada de Moyano-Cambero *et al.*, 2017).

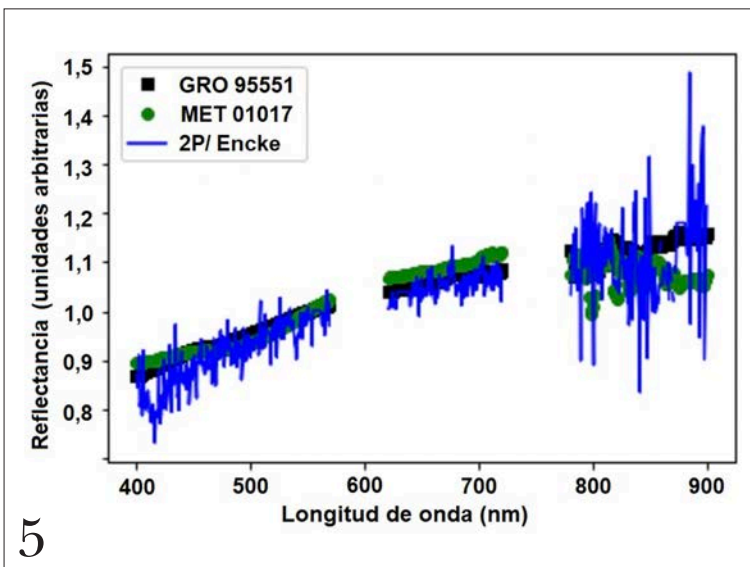


FIGURA 5. Los espectros de reflexión de las condritas carbonáceas GRO 95551 y MET 01017 comparados con el del cometa 2P/Encke. (Adaptado de Tanbakouei *et al.*, 2020).

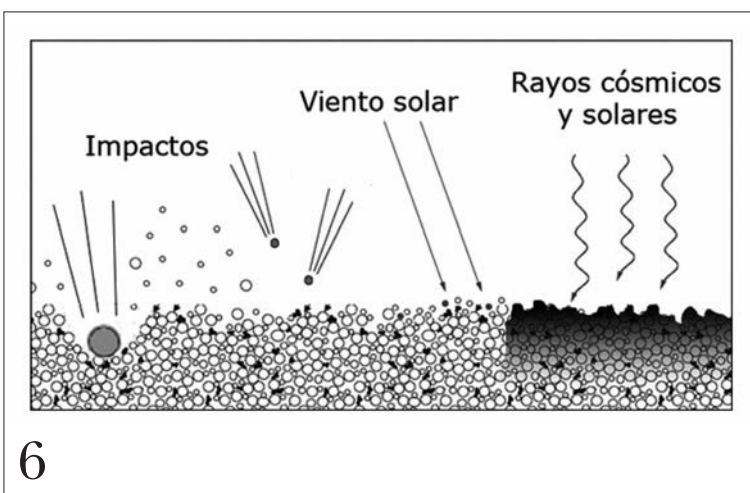


FIGURA 6. Algunos de los procesos físicos que alteran las superficies de cuerpos sin atmósfera.

sión y, además, garantizando resultados sistemáticos y reproducibles. Estos experimentos son realizados mediante un instrumento conocido como nanoindentador. Consta de un pequeño pistón acabado en una punta de diamante de tamaño micrométrico que realiza una presión predefinida (aplicando fuerzas en el rango 0,2-500 mN) y genera pequeñas muescas en el material, al tiempo que mide tanto la profundidad alcanzada como la recuperación plástica del material durante la descarga (Figura 8). Posteriormente toda esa información se recopila y se asocia con las diferentes regiones analizadas. De ese modo se pueden cuantificar las propiedades de cada mineral y también del conjunto de la roca estudiada, dependiendo de la fuerza aplicada durante el experimento. Así resulta posible determinar parámetros claves para la comprensión de la respuesta de esos materiales como son la resistencia a la fractura, la dureza, la recuperación elástica o el módulo de Young (Moyano-Cambero *et al.*, 2017).

Estos experimentos resultan de mucho interés para obtener las propiedades mecánicas de

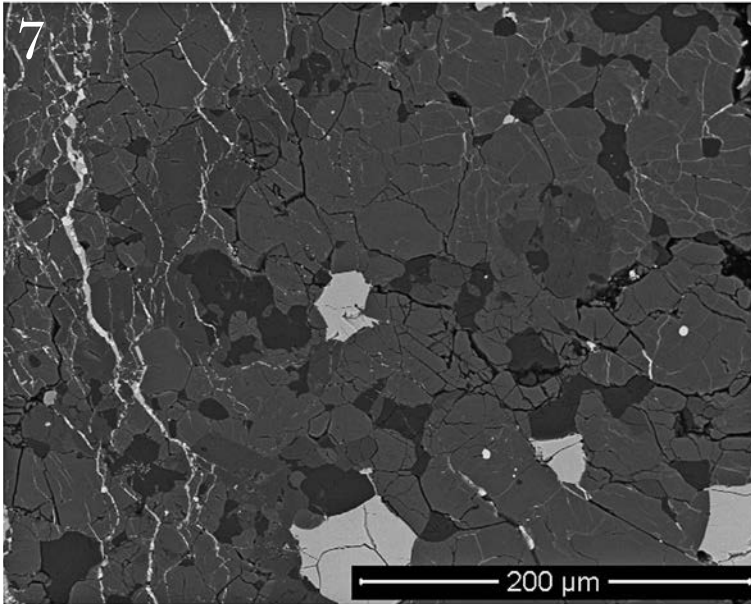
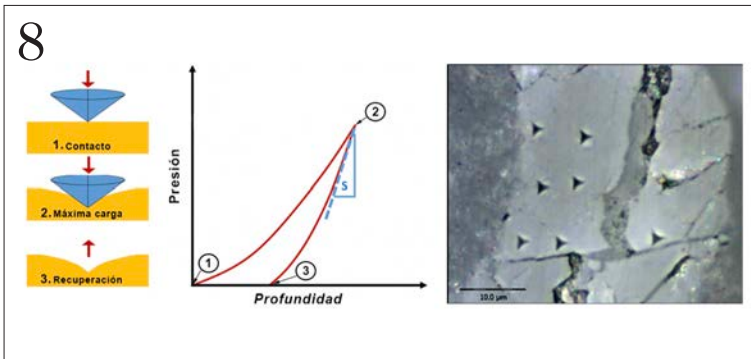


FIGURA 7. Imagen de microscopio electrónico en la que se aprecian diferentes efectos producidos por el choque en una sección delgada del meteorito Chelyábinsk, caído en Rusia el 15 de febrero de 2013 tras provocar un impresionante superbólide. En esta imagen de la condrita de tipo LL5, con un grado de choque de S4, se observan múltiples fracturas producidas por choque (gris oscuro o negro), así como venas de grosor variable de material fundido y recristalizado (entre gris claro y blanco).

FIGURA 8. Diagrama de las fases de la nanoindentación, la típica curva de carga y las marcas dejadas por la punta piramidal en un mineral. (ROSCOSMOS y NASA) y *EnVision* (ESA). (ISRO, ROSCOSMOS, ESA)



siones espaciales han conseguido el hito científico-tecnológico de recuperar los materiales formativos de dos asteroides: 162173 Ryugu y 101955 Bennu, respectivamente. Poder estudiar y comparar esos materiales con los que conforman los diferentes grupos de condritas carbonáceas resulta de vital importancia para hacer frente a la futura exploración de esos objetos y también comprender sus propiedades fisicoquímicas mejorando la eficacia a la hora de paliar un futuro impacto.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se enmarca en el campo del Proyecto de Investigación (PGC2018-097374-B-I00, PI: JMT-R), financiado por FEDER/Ministerio de Ciencia e Innovación–Agencia Estatal de Investigación. Agradecemos al *Antarctic Search for Meteorites* (ANSMET) y al Johnson Space Center por proporcionarnos los meteoritos bajo estudio en el Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC). También se agradece financiación por parte de la Generalitat de Catalun-

materiales condriticos como los que forman el asteroide binario 65803 Didymos. Precisamente la misión *Double Asteroid Redirection Test* (DART) de la NASA tiene previsto impactar en 2022 en el satélite de ese sistema, llamado Dimorphos. Nuestros estudios de las propiedades mecánicas del regolito del asteroide 25143 Itokawa traído por la sonda *Hayabusa* de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) resultan de interés para planificar el impacto de DART. Esto es así dado que la sonda DART conseguirá una transferencia de momento más eficiente y, por tanto, mayor des-

vío de Dimorphos, cuanto mayor cantidad de material sea excavado y eyectado de la superficie de Dimorphos (Tanbakouei *et al.*, 2019). Conociendo con precisión las propiedades mecánicas de los materiales que conforman estos asteroides podemos predecir mejor la respuesta a un impacto cinético como el que planea la misión DART.

En un futuro próximo esperamos poder continuar estos estudios para comprender mejor los materiales formativos de los dos asteroides estudiados por las sondas *Hayabusa 2* de JAXA y *OSIRIS-REx* de la NASA. Ambas mi-

ya (2017-SGR-292 y 2017-SGR-1323). Algunos de estos trabajos se enmarcan en el trabajo experimental de la misión *Double Asteroid Redirection Test* (DART). (A)

Referencias:

— Beitz, E., Blum, J., Parisi, M. G., y Trigo-Rodríguez, J. M. (2016). «The collisional evolution of undifferentiated asteroids and the formation of chondritic meteoroids», *Astrophysical Journal* 824, art.id.12, 29 pp.
 — DeMeo, F. E.; Binzel, R. P.; Slivan, S. M.; Bus, S. J., (2009). «An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared», *Icarus* 202, 160-180.
 — Moyano-Cambero, C. E., Trigo-Rodríguez, J. M., Llorca, J., Fornasier, S., Barucci, M. A., y Rimola, A. (2016). «A plausible link between the asteroid 21 Lutetia and CH carbonaceous chondrites», *Meteoritics & Planetary Science* 51, 1795-1812.
 — Moyano-Cambero, C. E., Pellicer, E.,

Trigo-Rodríguez, J. M., Williams, I. P., Blum, J., Michel, P., Küppers, M., Martínez-Jiménez, M., Llorca, I., y Sort, J. (2017). «Nanoindenting the Chelyabinsk meteorite to learn about impact deflection effects in asteroids», *Astrophysical Journal* 835, art. id.157, 9 pp.
 — Tanbakouei, S., Trigo-Rodríguez, J. M., Sort, J., Michel, P., Blum, J., Nakamura, T. y Williams, I. (2019). «Mechanical properties of particles from the surface of asteroid 25143 Itokawa», *Astronomy & Astrophysics* 669, A119, 5 pp.
 — Tanbakouei, S., Trigo-Rodríguez, J. M., Blum, J., Williams, I.P., y Llorca, J. (2020). «Comparing the reflectivity of ungrouped carbonaceous chondrites with that of short period comets like 2P/Encke», *Astronomy & Astrophysics* 641, A58, 7 pp.
 — Trigo-Rodríguez, J. M., Rimola, A., Tanbakouei, S., Cabedo-Soto, V., y Lee, M. R. (2019). «Accretion of water in carbonaceous chondrites: current evidence and implications for the delivery of water to early Earth», *Space Science Reviews* 215:18, 27 pp.

— Trigo-Rodríguez, J. M., Llorca, J., Weyrauch, M., Bischoff, A., Moyano-Cambero, C. E., Keil, K., Laubenstein, M., Pack, A., Madiedo, J. M., Alonso-Azcárate, J., Riebe, M., Wieler, R., Ott, U., Tapia, M. y Mestres, N. (2014). «The Ardón L6 ordinary chondrite: A long-hidden Spanish meteorite fall», *Meteoritics & Planetary Science*, 49, 1475-1484.

Josep M. Trigo-Rodríguez^{1,2}, Eloy Peña-Asensio^{1,2,3}, Albert Rimola^{2,3}, Jordi Llorca⁴, J. Ibáñez-Insa⁵, Jordi Sort^{3,6} y Jacinto Alonso-Azcárate⁷.

¹Grupo de Meteoritos, Cuerpos Menores y Ciencias Planetarias, Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC) (trigo@ice.csic.es), ²Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), ³Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), ⁴Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), ⁵Geosciences Barcelona (GE03BCN-CSIC), ⁶Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), ⁷Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).



ENFOCADOR / ROTADOR Seletek Limpet

- ✓ con conexión **Wifi** y **USB**
- ✓ muy pequeño y ligero
- ✓ con orificio central para una fijación fácil y segura
- ✓ con sensor externo de temperatura opcional
- ✓ enfoque desde su **teléfono móvil**
- ✓ compatible con ASCOM, INDIGO e INDiLib

Disponible el

CONJUNTO COMPLETO ENFOCADOR LIMPET

POR SÓLO 220€

Incluye:

- controlador LIMPET
- motor paso a paso
- acople a medida y
- cable de conexión a motor

149€

WIFI + batería* = Enfoque SIN CABLES

*(no incluida)



tienda.lunatico.es

info@lunatico.es

91 859 55 67



