

El origen del Sistema Solar revelado del estudio de meteoritos primitivos y partículas cometarias

Josep M. Trigo Rodríguez

trigo@ieec.uab.es

Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC).

Barcelona, España.

Los materiales primigenios preservados en meteoritos condriticos y en partículas cometarias contienen una pléyade de información sobre el origen del Sistema Solar. Auténticas muestras del disco protoplanetario, los materiales procedentes de asteroides y cometas de pequeño tamaño pudieron irradiar eficientemente al espacio el calor desprendido de sus componentes radioactivos, escapando así de la diferenciación química que moldeó los cuerpos planetarios. Se describen aquellas evidencias meteoríticas que revelan el entorno en que se formó nuestro sistema planetario. También se describe el momento clave de la exploración del sistema solar que vivimos frente al próximo desarrollo de misiones de recuperación de muestras desde objetos primitivos. Una oportunidad científica de tal calibre y con tantas implicaciones en el desarrollo tecnológico que nuestros países deberían no desaprovechar.

1. Introducción: materiales primitivos y nucleosíntesis

Todos los planetas, sus satélites y los pequeños cuerpos que denominamos asteroides y cometas nacieron tras una fase de agregación de pequeñas partículas sólidas que mayoritariamente condensaron de la fase gaseosa en la llamada nebulosa solar pero que también contendría granos de polvo formados en las envolturas de otras estrellas (Zinner, 2003). Estos últimos se suelen denominar *granos presolares* dado que suelen preceder a la formación del Sistema Solar aunque muchos preferimos el término *granos estelares* (Fig. 1). El estudio de estos componentes permite un auténtico muestreo de los procesos estelares e interestelares ocurridos en torno a la formación del Sol (Zinner, 2003, Nittler, 2008). Entre los condensados formados en el sistema solar podríamos citar granos metálicos, silicatos y óxidos refractarios en el interior del disco protoplanetario (véase Fig. 2) que vendrían acompañados de materia orgánica y hielos en la región exterior. Dada su región de formación, la abundancia de tales componentes y los procesos peculiares que tendrían lugar sobre los primeros cuerpos agregados de

ese disco delimitaron los diferentes grupos de *condritas* que conocemos. Tales meteoritos primitivos son denominados de esa manera dado que contienen mayoritariamente unas esférulas vítreas que se denominan *cóndrulos*. Recientemente hemos aprendido que las *condritas carbonáceas*, rocas desprendidas de asteroides primitivos almacenados en la región exterior del llamado *cinturón principal de asteroides* localizado entre Marte y Júpiter, poseen una composición muy similar a las partículas que se desprenden de cometas como el 81P/Wild 2 (Brownlee et al., 2006), si bien estas últimas parecen haber sufrido mucha menor compactación por impactos (Trigo-Rodríguez y Blum, 2009).

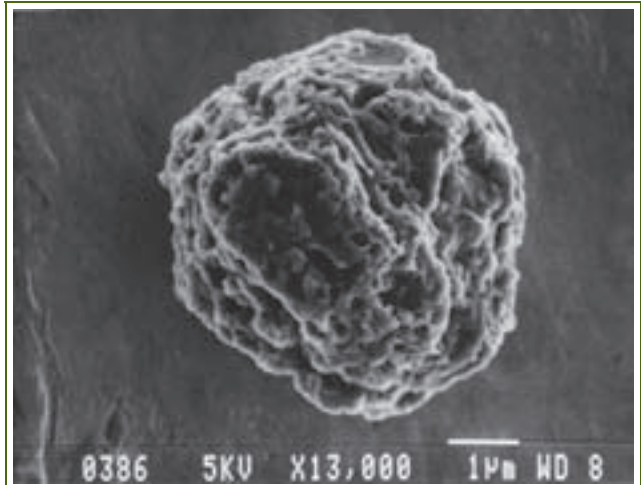


Figura 1. Grano presolar de carburo de silicio (SiC). Aproximadamente el 93% de estos granos proceden de estrellas de la Rama Asintótica de las Gigantes (AGB) de entre 1 a 3 masas solares. Cortesía Sachiko Amari.



Figura 2. Representación del disco protoplanetario en el que se forman los primeros bloques sólidos que tendrían una composición condritica. Imagen cortesía Gabriel Pérez Díaz. Servicio Multimedia (IAC).

Hoy en día está establecido que todos los elementos de la Tabla Periódica a partir del carbono (C) se formaron en el interior de las estrellas, a través de la llamada nucleosíntesis estelar (Meyer & Zinner, 2006). El Universo primitivo estaba compuesto básicamente de hidrógeno (H) y Helio (He) con pequeñas cantidades (trazas) de litio (Li), berilio (Be) y boro (B) que se sintetizaron en las primeras fases de la expansión en la denominada nucleosíntesis primordial. Así pues, la composición primordial de las estrellas fueron el H y el He, los elementos a partir de los que la alquimia estelar ha permitido sintetizar los presentes en la tabla periódica a partir de reacciones nucleares de fusión de núcleos atómicos.

La masa con la que nacen las estrellas vendrá a definir su evolución y su tiempo de vida luminosa. Parece ser que las primeras estrellas que se formaron en el Universo, llamadas de primera generación, fueron mayoritariamente masivas y evolucionaron rápidamente. Tales estrellas nacieron y murieron en unos pocos millones de años, para producir en sus últimos estertores casi todos los elementos químicos pesados (Umeda y Nomoto., 2003). Esto lo conseguirían mediante diversos procesos nucleares acontecidos en su interior. Incluso en su impresionante final en el que explotaron como supernovas tuvo lugar una única síntesis de elementos que se denomina *nucleosíntesis explosiva*. La destrucción de tales estrellas resultó clave pues toda esa química fue sembrada en el Universo y de ella nacerían otras estrellas, planetas terrestres y seres como nosotros. Entre las nuevas estrellas formadas a continuación, algunas serían masivas pero otras adquirirían masas inferiores a unas 8 veces la masa de nuestro Sol con lo cual seguirían una evolución muy diferente. Para estas estrellas de masa inferior la fusión del H y He en otros elementos es mucho más lenta y progresiva dado que las temperaturas que alcanzan son muy inferiores. Como consecuencia, necesitarán cientos o miles de millones de años en transformar todo su H y He en otros elementos, teniendo como producto final el carbono (C) y el oxígeno (O). Estas estrellas que representarían nuestro propio Sol acabarían sus días en forma de enanas blancas de C y O. Esto ocurre dado que estas estrellas acumulan estos dos elementos mayoritariamente en sus núcleos y que en las fases finales de nucleosíntesis del H y He pierden sus capas exteriores formando las llamadas nebulosas planetarias. Por supuesto, tales estrellas también emiten C y O al medio interestelar. Tales procesos de enriquecimiento del contenido galáctico a partir de los materiales sintetizados en estrellas masivas y poco masivas resultan claves para la posterior formación de estrellas, la formación de planetas de tipo terrestre y la aparición de organismos vivos como nosotros, basados en la química del carbono, también llamada orgánica. No entraré en mayor detalle sobre evolución estelar ni la síntesis de elementos químicos

pero el lector interesado encontrará una amplia revisión de los diferentes tipos de nucleosíntesis y los procesos que los forman en Cortina Gil y Martínez Pinedo (2008).

2. La nebulosa solar y los minerales primigenios

En base a las abundancias solares deducidas remotamente y las medidas en laboratorio de los materiales más semejantes: las condritas carbonáceas del grupo CI (Fig. 3), podríamos decir que nuestro Sol es una estrella de tercera generación. Nació cuando en la Vía Láctea habían muerto estrellas de generaciones anteriores que finalizaron su existencia con masivas emisiones de nuevos elementos químicos al medio interestelar. Hoy en día todavía tiene lugar abundante formación estelar en los brazos galácticos en donde se encuentran las nubes moleculares. Estas son inmensas nubes de gas y pequeñas partículas minerales que denominamos polvo interestelar. Tal polvo está integrado por pequeñas partículas de tamaño micrométrico constituido por minerales condensados a lo largo de las diferentes fases evolutivas de las estrellas. De un fragmento de una de esas nubes moleculares que denominaremos *nebulosa solar* tuvo lugar hace unos 4.567 millones de años la formación de los primeros condensados sólidos de nuestro Sistema Solar (Amelin et al., 2002). Tal edad se extrae con gran precisión de la datación isotópica de las inclusiones refractarias, unas partículas presentes

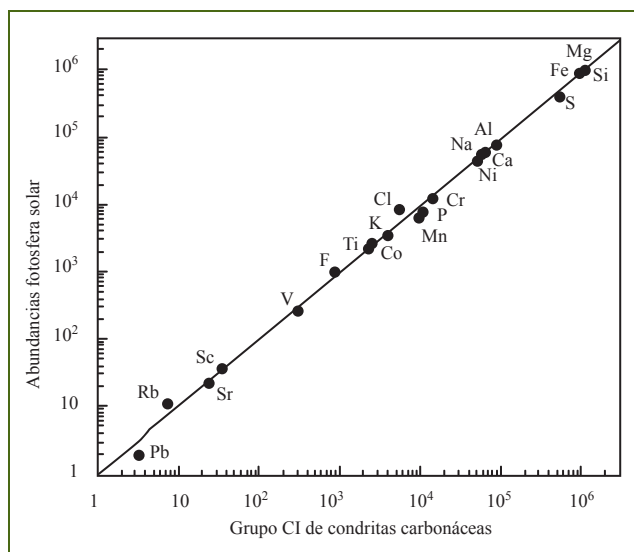


Figura 3. Gráfica de ejes logarítmicos en el que se muestran las abundancias deducidas de la fotosfera solar y la medida en laboratorio de las condritas carbonáceas del grupo CI. Se muestran los cocientes atómicos relativos a un millón de átomos de Si. El ajuste lineal revela una extraordinaria similitud entre ambas composiciones. Adaptada de Hutchison (2004).

Tabla 1. Principales elementos radioactivos presentes en los componentes primarios de las condritas y su probable origen estelar. Para una estimación de los isótopos producidos por AGB masivas puede consultarse (García Hernández et al., 2006; Trigo-Rodríguez et al., 2009).

Isótopo padre	Isótopo hijo	Componente en el que se ha detectado	Vida media (10 ⁶ años)	Probables fuentes estelares ó procesos
¹⁰ Be	¹⁰ B	CAIs (McKeegan et al., 2000)	1,5	Reacción de espalación en el Sistema Solar
²⁶ Al	²⁶ Mg	CAIs (Lee et al., 1976) y cóndrulos ricos en Al (Galy et al. 2000)	0,73	Supernovas, AGB masivas
⁴¹ Ca	⁴¹ K	CAIs (Srinivasan et al., 1994)	0,1	AGBs
⁵³ Mn	⁵³ Cr	CAIs (Birk and Allègre, 1985), cóndrulos, etc	3,7	AGBs
⁶⁰ Fe	⁶⁰ Ni	CAIs, eucritas (Shukolyukov and Lugmair, 1993)	1,5	Supernovas, AGB masivas
⁸⁷ Rb	⁸⁷ Sr	Cóndrulos, CAIs (Evensen et al., 1979)	48.800	AGB masivas

en las condritas que están formadas mayoritariamente por óxidos de calcio (Ca) y aluminio (Al) (Grossman, 1972). Dados los procesos ininterrumpidos de nucleosíntesis estelar acaecidos en el seno de la Vía Láctea y al flujo de los nuevos elementos al medio interestelar, la nebulosa solar no sólo albergaba el H y He primordiales sino también elementos más pesados ya descritos en la introducción. Aquel caldo nebular poseería los ingredientes químicos necesarios para formar planetas e incluso vida. No tenemos duda de ello puesto que estamos aquí escribiendo y leyendo estas líneas sobre un planeta rocoso en el que ha aflorado la vida en base a la química del C (Macià y Hernández, 1995). Esta es la fundamental herencia que las estrellas nos dejaron dado que tales elementos con número atómico superior a 5 son la parte mayoritaria tanto de los seres vivos como de nuestro planeta (Altschuler, 2001; Trigo-Rodríguez, 2001, 2001b).

Las teorías de formación de los planetas por agregación de cuerpos más pequeños pueden ser corroboradas a partir del estudio de los meteoritos más primitivos, auténticas rocas sedimentarias de la creación del Sistema Solar. Éstos fueron los primeros bloques sólidos consolidados en el disco protoplanetario y de su agregación surgieron los cuerpos planetarios. Los asteroides mayores y los cuerpos planetarios sufrieron diferenciación química, entendiendo por ella la fusión, mezcla y recristalización de sus componentes primordiales para dar origen a nuevos minerales. Sin embargo, los asteroides más

pequeños y los cometas que sobrevivieron a esa fase de agregación como objetos con un diámetro inferior a unos 60 km pudieron mantener sus materiales formativos con una mínima alteración de sus minerales primigenios (Yoshino et al., 2003). La razón de ello es que los cuerpos con un diámetro superior al anteriormente mencionado comienzan a sufrir el calentamiento de su interior debido al calor producido en la desintegración de los elementos radioactivos (principalmente ²⁶Al y ⁶⁰Fe, véase Tabla 1), retenido muy eficientemente (Yoshino et al., 2003). De ese modo se generan temperaturas en el interior de estos cuerpos planetarios suficientes para fundir los materiales y comenzar la diferenciación de tales cuerpos. Por ello los objetos primitivos serán el objetivo de futuras misiones espaciales para trazar la evolución química y mineralógica de las primeras baldosas constitutivas de los planetas. En tal categoría entran los meteoritos llamados condritas.

3. Los fascinantes componentes de las condritas

Anteriormente introduje que las condritas contienen granos estelares producidos en estrellas anteriores o contemporáneas a la formación de nuestro Sol. Sin embargo, estos componentes estelares son minoritarios, típicamente ocupando menos de unas 100 partes por millón

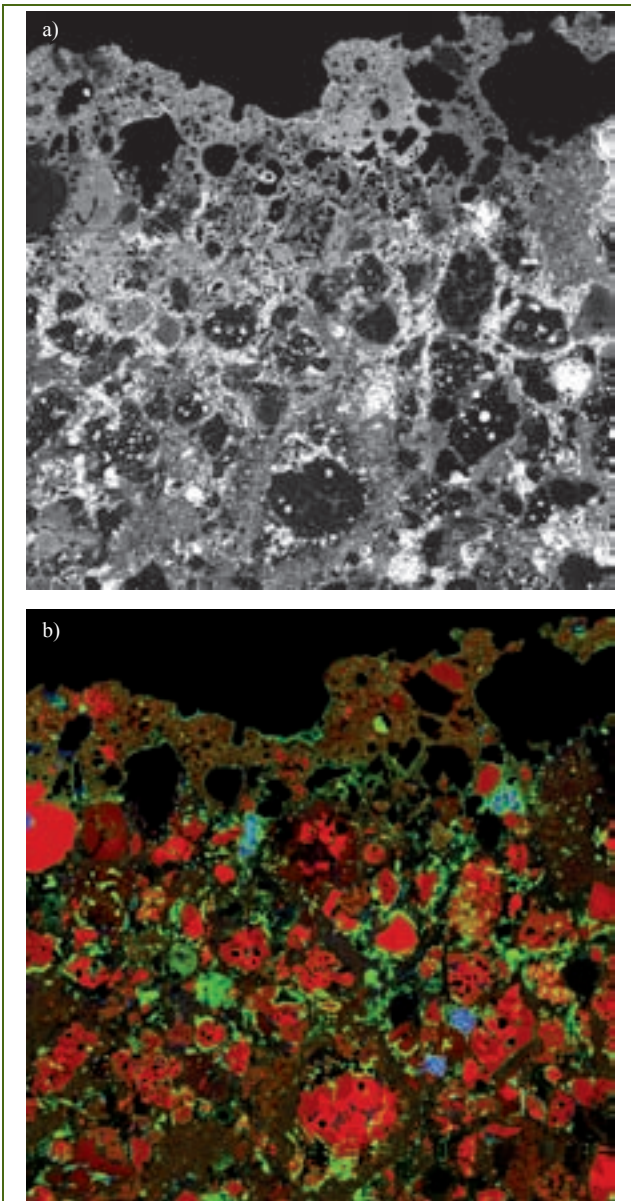


Figura 4. Ventana de 1 mm² de una sección delgada de la condrita carbonácea ALHA77307, una de las más primitivas estudiadas hasta la fecha (Trigo-Rodríguez & Blum, 2009). a) Imagen SEM a través de microscopio electrónico y b) Superposición de 3 imágenes de rayos X obtenidas con microsonda electrónica de la misma área para poder identificar la mineralogía esencial de los diferentes cóndrulos e inclusiones. En la imagen el rojo correspondería a una fase mineral rica en Mg, el verde a Ca y el azul a Al. Nótese que en la parte superior aparece la delgada corteza de fusión del meteorito, única zona alterada térmicamente durante su entrada en la atmósfera. Imágenes J.M. Trigo.

en los pequeños materiales que forman la denominada *matriz* (Fig. 4). Otros componentes importantes que se estima fueron los primeros condensados aparecidos al descender la temperatura del gas nebular se denominan

Tabla 2. Principales fases minerales primarias que forman las Inclusiones de Ca y Al (*CAIs*) analizadas en condritas. Por “primario” entendemos la composición primordial del material en el disco sin sufrir el posterior procesado metamórfico o acuoso en el asteroide progenitor. En todo caso, las *CAIs* sufrieron fenómenos de calentamiento en el disco. Recopilado de MacPherson (2003)

Fase mineral	Composición mayoritaria
Espinela	MgAl ₂ O ₄ y FeAl ₂ O ₄
Melilita	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ y Ca ₂ MgSi ₂ O ₇
Perovskita	CaTiO ₃
Hibonita	CaAl ₁₂ O ₁₉
Fasaita	CaMgSi ₂ O ₆ -CaAl ₂ SiO ₆ (a veces con Ti en estructura)
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
Forsterita	Mg ₂ SiO ₄

inclusiones de calcio y aluminio pero se citan generalmente por su acrónimo inglés *CAIs* (de *Ca-Al rich Inclusions*). Las *CAIs* experimentaron variables y prolongadas fases de reacción con el gas nebular lo que indica que fueron fundidas repetidamente por procesos muy energéticos quizás asociados a la fase T-Tauri del joven Sol. Como consecuencia, tales inclusiones se encuentran formadas por minerales altamente refractarios (Tabla 2). Los isótopos de larga vida preservados en esos minerales han permitido datar tales inclusiones en 4.567 M.A. (Amelin et al., 2003). Sin embargo, los componentes mayoritarios de las condritas son esférulas vítreas de tamaño típicamente milimétrico que se denominan cóndrulos y que se formaron uno o dos millones de años más tarde. Dada su complementariedad química con la composición de la *matriz*, su formación tuvo lugar a partir de diminutos agregados presentes en el disco, puntualmente fundidos por diversos fenómenos energéticos como, por ejemplo, fulguraciones solares u ondas de choque. Los cóndrulos muestran una altamente variable mineralogía integrada mayoritariamente por silicatos: olivinos o piroxenos ricos en Mg y plagioclasa. Al ser los componentes más abundantes han hecho que este tipo de meteoritos se denominen condritas.

4. El valor intrínseco de recuperar meteoritos

Así pues, para profundizar en el origen del Sistema Solar necesitamos estudiar los cuerpos más pequeños y primi-

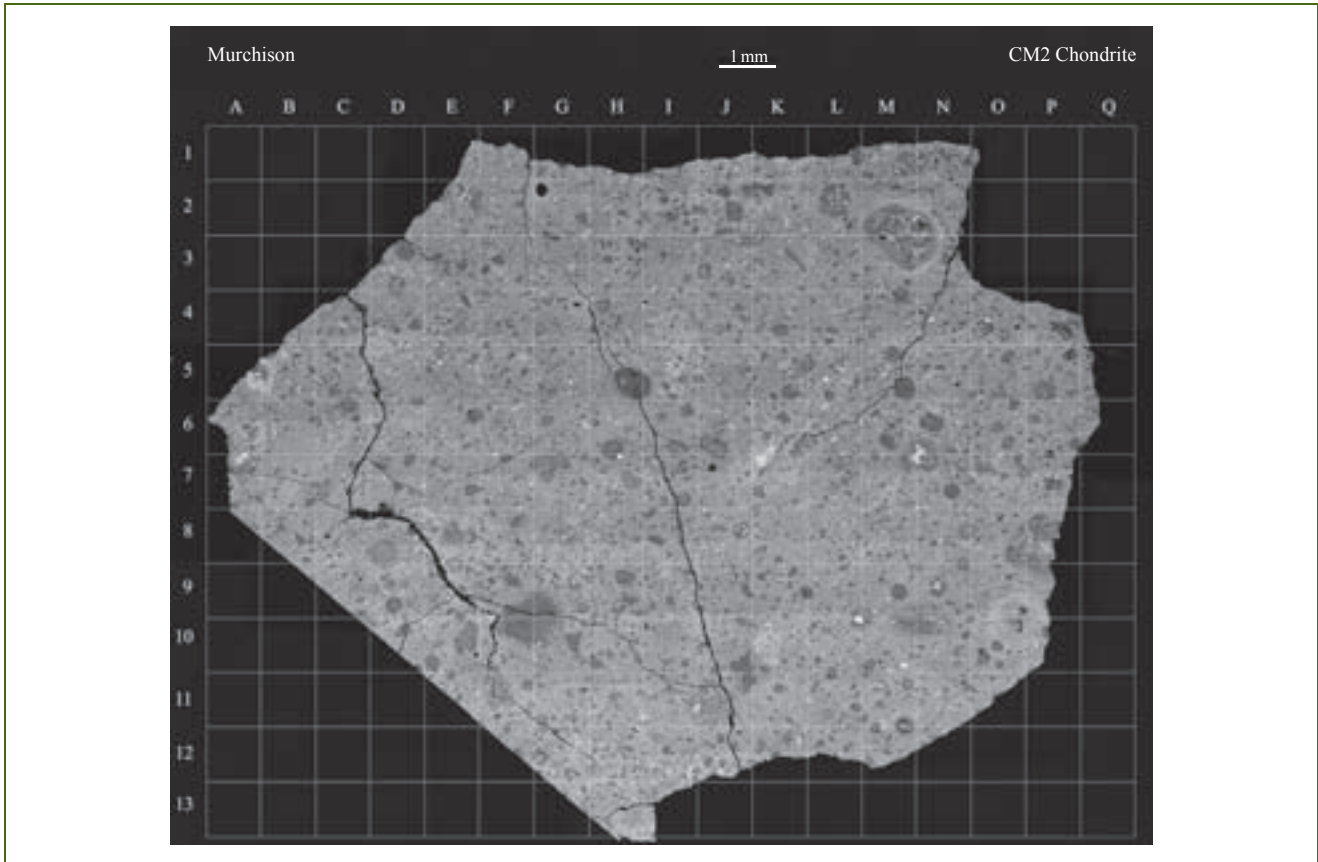


Figura 5. Sección delgada del meteorito Murchison vista al microscopio electrónico. Los cóndrulos de mayor tamaño resultan fácilmente identificables. Nótese que superponiendo una rejilla milimétrica se facilita la identificación y análisis químico de sus diferentes componentes. Imagen J.M. Trigo.

tivos: los cometas y ciertos asteroides. Esos materiales primigenios llegan a la Tierra en forma de meteoritos condriticos (Fig. 5) así como de diminutas partículas de polvo interplanetario, también conocidas como IDPs por su acrónimo anglosajón (Fig. 6). 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 (Trigo-Rodríguez, 2008). A pesar de que la cantidad de masa de este cometa que incidió en el aerogel del colector en forma de panal fue de tan sólo unos 0.3 miligramos (Hörz et al., 2006) este material es especialmente relevante dado que su recuperación *in situ* permite establecer sin género de duda el cuerpo progenitor. Sin embargo, la complejidad y el coste de tales misiones, hace que a fecha de hoy sólo se haya podido recuperar rocas de la Luna y del cometa anteriormente mencionado.

Afortunadamente todos los días llegan meteoritos a la Tierra aunque, la mayoría de ellos, lo hace cayendo sobre el océano o sobre zonas remotas y deshabitadas. Dado 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, generalmente perdemos valiosa información sobre su evolución dinámica en el Sistema Solar. En la actualidad sólo se conocen las órbitas en el

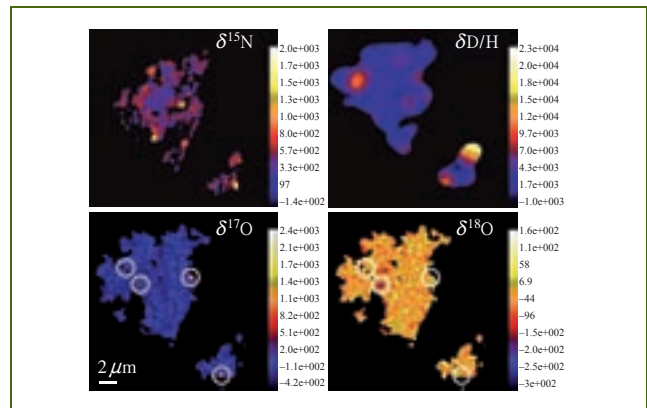


Figura 6. Este IDP recuperado en la estratosfera muy probablemente procede del cometa 26P/Grigg-Skjellerup. Algunos isótopos son utilizados como trazadores de la presencia de granos estelares primigenios. Imagen cortesía Ann Nguyen. (Nguyen et al., 2007).

Sistema Solar de una decena de meteoritos (Fig. 7) y todavía se desconoce si, por ejemplo, algunos de ellos pueden proceder de cometas procesados. Por ello existe un interés creciente en la recuperación de meteoritos y se están creando en todo el mundo redes de seguimiento y estudio de las nuevas caídas. La *Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos* (www.spmn.uji.es), constituye en España un grupo interdisciplinario que pretende fomentar el estudio y la recuperación de meteoritos. En ese marco se recuperaron las dos últimas caídas identificadas en España: Villalbeto de la Peña (2004) y Puerto Lápice (2007). Tales caídas no sólo quedaron atestiguadas por que cientos de testimonios observaron e incluso unos pocos fotografiaron su bólido luminoso o sus estelas persistentes (Trigo-Rodríguez et al., 2006; 2009b) sino también por contener abundancias significativas de isótopos de corta vida producidos en procesos de espalación en el medio interplanetario y que sólo pueden

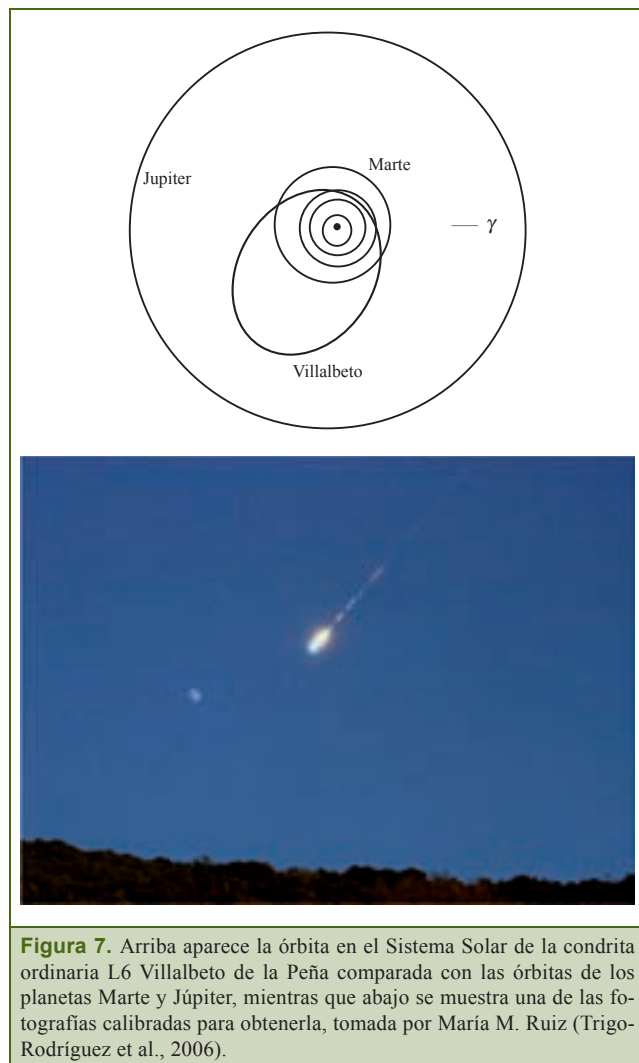


Figura 7. Arriba aparece la órbita en el Sistema Solar de la condrita ordinaria L6 Villalbeto de la Peña comparada con las órbitas de los planetas Marte y Júpiter, mientras que abajo se muestra una de las fotografías calibradas para obtenerla, tomada por María M. Ruiz (Trigo-Rodríguez et al., 2006).

medirse en meteoritos de caídas recientes (Llorca et al., 2005, 2009). La recuperación de meteoritos constituye hoy en día un campo de oportunidad en el estudio de las ciencias planetarias. Tanto los más primitivos como aquellos que proceden de otros cuerpos planetarios diferenciados proporcionan valiosa información sobre los procesos físico-químicos acaecidos durante la formación y evolución de esas rocas y, por ende, de los cuerpos de los que proceden. Tales éxitos nos motivan a seguir trabajando en pro de la recuperación en España y otros países Latinoamericanos (Trigo-Rodríguez et al., 2009c; 2010) de estas auténticas *pedras Rosetta* de la ciencia (Llorca, 2004).

Referencias

- [1] ALTSCHULER, D.R. (2001) *Hijos de las estrellas: nuestro origen, evolución y futuro*. Cambridge University Press, Madrid.
- [2] AMELIN Y., A.N. KROT, I.D. HUTCHISON Y A.A. ULYANOV (2002) *Lead Isotopic Ages of Chondrules and Calcium-Aluminum-Rich Inclusions*. *Science* **297**, 1678-1683.
- [3] BIRCK, J.-L. Y ALLÈGRE, C.J. (1985) *Evidence for the presence of Mn-53 in the early solar system*. *Geophysical Research Letters* **12**, 745-748.
- [4] CORTINA GIL D. Y MARTÍNEZ PINEDO, G. (2008) *Núcleos en el Universo*. *Revista Española de Física* **22** (1), 14-21.
- [5] EVENSEN N.M., CARTER, S.R., HAMILTON, P.J., O'NIONS, R.K. Y RIDLEY, W.I. (1979) *A combined chemical-petrological study of separated chondrules from the Richardton meteorite*. *Earth and Planetary Science Letters* **42**, 223-236.
- [6] GALY A., YOUNG, E.D., ASH, R.D., O'NIONS, R.K. (2000) *The Formation of Chondrules at High Gas Pressures in the Solar Nebula*. *Science* **290**, 1751-1754.
- [7] GARCÍA-HERNÁNDEZ, D.A., GARCÍA-LARIO, P., PLEZ, B., D'ANTONA, F., MANCHADO, A., Y TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M. (2006) *Rb-rich Asymptotic Giant Branch Stars*, *Science* **314**, 1711-1716.
- [8] GROSSMAN, L. (1972) *Condensation in the primitive solar nebula*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **36**: 597-619.
- [9] HÖRZ, F. ET AL. [incluyendo J.M. TRIGO-RODRÍGUEZ] (2006) *Stardust implications for Wild 2 coma dust*. *Science* **314**, 1716-1719.
- [10] HUTCHISON, R. (2004) *Meteorites: a Petrologic, Chemical and isotopic Síntesis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [11] LEE, T., PAPANASTASSIOU, D.A., Y WASSERBURG, G.J. (1976) *Demonstration of ²⁶Mg excess in Allende and evidence for ²⁶Al*. *Geophys. Res. Lett.* **3**, 109-112.
- [12] LLORCA, J. (2004) *Meteoritos y cráteres: fragmentos de otros mundos que caen a la Tierra*. Ed. Milenio, Lleida.
- [13] LLORCA, J., TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M., ORTIZ, J.L., DOCOBO, J.A., GARCÍA-GUINEA, J., CASTRO-TIRADO, A.J., RUBIN, A.E., EUGSTER, O., EDWARDS, W., LAUBENSTEIN, M. AND CASANOVA, I. (2005) *The Villalbeto de la Peña meteorite fall: I. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field and petrography*. *Meteoritics & Planetary Science* **40**, 795-804.
- [14] LLORCA, J., CASANOVA, I., TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M., MADIEDO, J.M., ROSZJAR, J., BISCHOFF, A., OTT, U., FRANCHI, I.A., GREENWOOD, R.C., LAUBENSTEIN, M. (2008) *The Puerto Lápice eucrite*, *Meteoritics and Planetary Science* **44**, 159-174.

- [15] MACPHERSON, G.J. (2003) *Calcium-Aluminum-rich Inclusions in chondritic meteorites*. In Meteorites, Planets and Comets, Ed. A. Davis, vol. 1 of Treatise on Geochemistry, Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 201-246.
- [16] MACIÀ, E. Y HERNÁNDEZ, M.V. (1995) *Implicaciones astrofísicas en el origen de la vida*. Rev. Española de Física **9** (3), 28-32.
- [17] McKEEGAN, K., CHAUSSIDON, M. Y ROBERT, F. (2000) *Incorporation of Short-Lived ^{10}Be in a Calcium-Aluminum-Rich Inclusion from the Allende Meteorite*. Science **289**, 1334-1337.
- [18] MCSWEEN, H.Y. (1999). *Meteorites and their parent planets*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [19] MADIEDO J.M., AND TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M. (2008) *Multi-station video orbits of minor meteor showers*, Earth Moon and Planets **102**, 133-139.
- [20] MEYER, B.S. Y ZINNER, E. (2006) Nucleosynthesis. En *Meteorites and the Early Solar System II* (D.S. Lauretta y H.Y. McSween, eds.), pp. 69-108. Arizona Univ. Press, Tucson, EUA.
- [21] NITTLER L. (2008) *Presolar grains in the Solar System: Connections to stellar and interstellar organics*. Organic Matter in Space, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, vol. **251**, pág. 343-344.
- [22] NGUYEN, A.N., BUSEMANN, H. Y NITTLER, L.R. (2007) *Remarkably High Abundance of Presolar Grains in Interplanetary Dust Particles Collected from the Comet Grigg-Skjellerup Dust Stream*. Lunar Planet. Sci. **38**, abstract #1338, Lunar & Planetary Institute, Houston.
- [23] SHUKOLYUKOV, A. Y LUGMAIR, G.W. (1993) *Iron-60 in eucrites*. Earth Planet. Sci. Lett. **119**, 154-166.
- [24] SRINIVASAN, G., ULYANOV, A.A., GOSWAMI, J.N. (1994) *Ca-41 in the early solar system*. Astrophysical Journal **431**, L67-L70.
- [25] TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M. (2001) *Nosotros en el Universo*. Editorial Complutense, Madrid.
- [26] TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M. (2001b) *El origen del sistema solar*. Editorial Complutense, Madrid.
- [27] TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M. Y BLUM, J. (2009) *The effect of aqueous alteration and metamorphism in the survival of presolar silicate grains in chondrites*. Publications of the Astronomical Society of Australia **26**(3), 289-296.
- [28] TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M., CASTRO-TIRADO, A., LLORCA, J., FABREGAT, J., MARTÍNEZ, V.J., REGLERO, V., JELÍNEK, M., KUBÁNEK, P., MATEO, T. AND DE UGARTE POSTIGO, A. (2004) *The development of the Spanish Fireball Network using a new all-sky CCD system*. Earth, Moon Planets **95**, 553-567.
- [29] TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M., BOROVIČKA, J., SPURNÝ, P., ORTIZ, J.L., DOCOBO, J.A., CASTRO-TIRADO, A.J., AND LLORCA, J. (2006) *The Villalbeta de la Peña meteorite fall: II. Determination of the atmospheric trajectory and orbit*, Meteoritics & Planetary Science **41**, 505-517.
- [30] TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M. (2008) *La misión Stardust: Implicaciones astrofísicas de las muestras analizadas del cometa 81P/Wild 2*. Revista Iberoamericana de Física **4** (1), 23-30.
- [31] TRIGO-RODRÍGUEZ J.M., GARCÍA-HERNÁNDEZ, D.A., LUGARO, M., KARAKAS, A., VAN RAAL, M., GARCÍA LARIO, P., Y MANCHADO, A. (2009) *The role of massive AGB stars in the early solar system composition*. Meteoritics & Planetary Science **44**, 627-641.
- [32] TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M., BOROVIČKA, J., LLORCA, J., MADIEDO, J.M., ZAMORANO, J., AND IZQUIERDO, J. (2009b) *Puerto Lápice eucrite fall: strewn field, physical description, probable fireball trajectory, and orbit*. Meteoritics and Planetary Science **44**, 175-186.
- [33] TRIGO-RODRÍGUEZ, J.M., LLORCA, J., RUBIN, A.E., GROSSMAN, J.N., SEARS, D.W.G., NARANJO, M., BRETZIUS, S., TAPIA, M., AND GUARÍN Sepúlveda, M.H. (2009c) *The Cali meteorite fall: A new H/L ordinary chondrite*, Meteoritics and Planetary Science **44**, 211-220.
- [34] TRIGO-RODRÍGUEZ J.M., LLORCA, J., MADIEDO, J.M., TANCREDI, G., EDWARDS, W.N., RUBIN, A.E., AND WEBER, P. (2010) *The Berduc L6 chondrite fall: meteorite characterization, trajectory, and orbital elements*, Meteoritics and Planetary Science **45**, en prensa.
- [35] UMEDA, H. Y NOMOTO, K. (2003) *First generation black-hole forming supernovae and the metal abundance pattern of a very iron-poor star*. Nature **422**, 871-873.
- [36] YOSHINO, T., WALTER, M. Y KATSURA, T. (2003) *Core formation in planetesimals triggered by permeable flow*. Nature **422**, 154-157.
- [37] ZINNER, E. (2003) Presolar grains. In *Meteorites, Planets and Comets*, Ed. A. Davis, vol. 1 of Treatise on Geochemistry, Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 17-39.

LIBROS Y PUBLICACIONES RECIBIDOS

- **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**. Vol. 149, Part. 1, Part. 2. July/September 2010.
- **Métode**. Revista de la difusión de la investigación. Verano 2010.
- **Revista Brasileira de Ensino de Física**. Vol. 31, nº3. Jul-sep 2009.
- **Radioprotección**. Revista de la Sociedad Española de Protección Radiológica. Nº 64. Vol. VVII. 2010.
- **La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española**. Vol. 13 nº 3. 2010.
- **Gazeta de Física**. Sociedad Portuguesa de Física. Vol. 33 nº 1, 2, 2010.
- **Monografías de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza**. Nº 31, 32. 2009
- **Progress of Theoretical Physics**. Vol. 123, Nº, 5, 6. June 2010.
- **Progress of Theoretical Physics Supplement**. Num. 183. 2010.
- **Nuclear España**. Revista de la Sociedad Nuclear Española. Nº 309, Julio-Agosto 2010.
- **Vértices**. La revista del Ciemat. Nº 11. Septiembre 2010.
- **Journal of the Korean Physical Society**. Vol. 56, No. 5, No. 5 (Pt I), No. 6. NO. 6 (Pt. I)
- **AENOR**. Asociación Española de Normalización y Certificación. Nº 251. Julio-Agosto 2010.
- **Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona**. Tercera época. Núm. 1022 y 1023. Vol. LXIV núm. 5 y 6.
- **Brazilian Journal of Physics**. Vol. 40 nº 2. June 2010.
- **UNE, la Revista de AENOR**. Julio-Agosto 2010. Nº 251.
- **Nuclear España**. Nº 308. Junio 2010.