

Las condritas y sus componentes primigenios

Chondrites and their primordial components

JOSEP M. TRIGO-RODRÍGUEZ Y MARINA MARTÍNEZ-JIMÉNEZ

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; mmartinez@ice.csic.es

Resumen Pese a los numerosos estudios dedicados al origen del Sistema Solar, las teorías sobre los procesos y secuencias temporales de aquel período siguen siendo motivo de discrepancias. Por ello, la reconstrucción del entorno en que nuestro Sistema Solar nació sigue siendo un tema lleno de enigmas pero de una importancia caudal. Los materiales más primitivos datados hasta ahora son las inclusiones ricas en Calcio y Aluminio (también llamadas CAIs) que han sido datadas entre 4.568 y 4.567 millones de años (Ma). A esta época corresponde la supervivencia de los primeros sólidos que se entiende como el origen mismo del Sistema Solar. Posteriormente, entre 1,5 y 2 Ma después se formarían los cóndrulos que finalmente compactarían formando los auténticos sedimentos de la creación que denominamos planetesimales. Se formarían planetesimales diferenciados y no diferenciados dependiendo de su tamaño aunque serían estos últimos los que son un auténtico legado fósil de los componentes del disco protoplanetario. En cualquier caso, los planetesimales serían los bloques constitutivos de los embriones planetarios hace unos 4.550 Ma. Finalmente, hace 4.500 Ma los planetas terrestre nacerían de la colisión de tales embriones. La exploración de asteroides pequeños y cometas, afortunadamente preservados en diversas regiones de nuestro sistema planetario, constituye una oportunidad científica para comprender mejor nuestro origen en el Cosmos. No es de extrañar que diversas misiones de exploración y retorno de muestras tengan como objetivo tales objetos primigenios.

Palabras clave: Disco protoplanetario, condritas, cóndrulos, inclusiones refractarias.

Abstract *Despite the numerous studies dedicated to the origin of the solar system, the theories about the processes and their temporal sequence are still cause for discrepancies. For this reason that the reconstruction of the environment in which our Solar system was born remains a topic full of enigmas, but it is of principal concern. The oldest materials dated so far are Ca- and Al-rich inclusions (also know by their acronym: CAIs) which have been dated between 4,568 and 4,567 million years (Ma). This time corresponds to the survival of the first solids, which is taken as the origin of the Solar System itself. Subsequently, between 1.5 and 2 Ma after that time the so-called chondrules were formed. The aggregation of chondrules and CAIs formed actual sediments of creation called planetesimals. Differentiated and undifferentiated planetesimals were formed depending on their sizes, the latter ones being those that can be considered an authentic fossil legacy of the components of the protoplanetary disk. Planetary embryos were formed from these blocks about 4,550 Ma ago. Finally, about 4,500 Ma ago the terrestrial planets were formed from these embryos. The exploration of small asteroids and comets, fortunately preserved in various regions of our planetary system, constitutes a scientific opportunity to better understand our origin in the Cosmos. It is not surprising that various missions of exploration and sample return have aimed at such primitive objects..*

Keywords: *Protoplanetary disk, chondrites, chondrules, refractory inclusions.*

INTRODUCCIÓN: MATERIALES PRIMITIVOS Y NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR.

En este artículo nos vamos a concentrar en el estudio de los componentes que formaron el disco protoplanetario a partir del estudio de meteoritos primitivos. La secuencia espacial y temporal del

proceso de agregación de tales materiales primigenios para formar los planetesimales todavía no es conocida en todo detalle. Sin embargo, décadas de estudio de los meteoritos más primitivos llegados a la Tierra nos permiten esbozar ciertas fases fundamentales. Entre tales meteoritos destacan las denominadas condritas que proceden de asteroi-

des no diferenciados y que muestrean los materiales que formaban parte de ese disco de materiales primigenios.

Nuestra galaxia no sólo contiene estrellas. Innumerables nubes de gas, denominadas nebulosas, se encuentran ampliamente distribuidas entre los brazos espirales. Entre tales nubes cabe destacar unas que se denominan nubes moleculares puesto que con los radiotelescopios se detecta que presentan complejas moléculas en su interior. Precisamente nuestro Sol nacería del colapso gravitatorio local de una de esas nubes moleculares de nuestra galaxia hace unos 4.600 millones de años (de ahora en adelante abreviado como Ma). Debido a ese colapso de la nebulosa primigenia el gas se calentaría lo suficiente como para no permitir la condensación de pequeñas partículas desde la fase vapor en un principio. Posteriormente, conforme la mayor parte del gas se asentó en el Sol disminuyendo la densidad del medio circundante y la temperatura disminuyese, tendría lugar la condensación de pequeñas partículas minerales. Dado que la nebulosa giraba, éstas irían cayendo en el plano ecuatorial para formar lo que conocemos como disco protoplanetario (Fig. 1)

Los materiales del disco eran muy variados y a partir de ellos se formarían por agregación hace 4.565 Ma los asteroides y cometas de los que proceden los fascinantes meteoritos conocidos como condritas. Los asteroides (y quizás algún cometa) de los que proceden estos grupos de condritas sufrieron casi todos cierto grado de metamorfismo térmico y/o de alteración acuosa en el asteroide o cometa del cual procedían. Previamente, sus materiales formativos fueron parcialmente procesados en el llamado disco protoplanetario (Fig. 1). El estudio de las condritas está estrechamente ligado al origen y las condiciones físico-químicas del Sistema Solar puesto que sus componentes minerales contienen las claves para datar los procesos de formación de los primeros planetesimales. Además un determinado grupo de condritas puede considerarse un estándar de la composición del Sol (Fig. 2). Básicamente sus materiales primigenios eran diversos y pasarían a formar las diversas partes de las condritas: matriz, cóndrulos, inclusiones refractarias y granos metálicos. Veamos los principales componentes que podemos ver en una condrita:

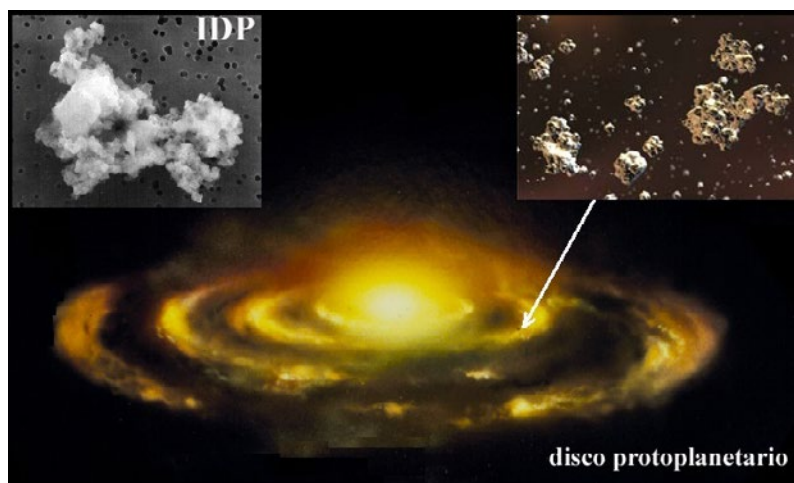
- **Matriz:** formada por partículas minerales de grano fino (polvo) de la nebulosa compuestas por una mezcla de muy diversos componentes: fragmentos de cóndrulos, granos metálicos, óxidos refractarios, materia orgánica, etc. En general, las matrices primitivas de las condritas carbonáceas suelen poseer una composición muy similar a la inferida del Sol y, en particular, a un grupo de condritas carbonáceas llamado CI. También la composición química suele ser complementaria del resto de componentes de las condritas por lo que en buena medida se produjo por el procesamiento del resto de componentes que ahora enumeraremos.

- **Cóndrulos:** esférulas ígneas que son el componente principal de las condritas y, de hecho, de ellas procede su nombre. Distinguimos entre dos tipos: el tipo I es rico en óxido de hierro (FeO) mientras que el tipo II es pobre en él. Posiblemente se formasen en condiciones muy diferentes del disco protoplanetario. Los cóndrulos tienen características muy variadas, algunos son simplemente mezclas de granos de olivino y piroxeno, mientras que otros poseen en su interior inclusiones de óxidos, metales y sulfuros.

- **Inclusiones refractarias:** las más importantes son las inclusiones ricas en Ca y Al (conocidas como CAIs, acrónimo de *Ca- and Al- rich Inclusions*), formadas por minerales refractarios como por ejemplo la espinela, melilita y hibonita, condensados a partir de un gas. El modelo más aceptado para explicar su formación (Shu et al., 2001) sugiere que son el producto de calentar agregados de polvo de composición solar que se agregaron en forma arracimada (Fig. 2). Estas inclusiones son nuestros fósiles de la creación misma del Sistema Solar dado que contienen gran variedad de anomalías isotópicas y permiten la datación de los primeros sólidos del SS, es decir, el tiempo cero de la formación del SS: $t_0 = 4.568$ Ma (Amelin et al., 2002; Moynier et al., 2007).

- **Granos metálicos y sulfuros:** También en el disco protoplanetario existían granos metálicos condensados en condiciones altamente reductoras. Mayoritariamente estos granos son aleaciones en proporciones diversas de Fe-Ni. Asimismo, son comunes sulfuros de Fe tales como troilita (FeS).

Fig.1. El disco protoplanetario que rodeó al joven Sol. Los agregados primigenios (recuadro superior izqdo.) vienen representados por esta imagen de un IDP de unas diez micras cortesía de Donald Brownlee. Mientras, los materiales procesados en el disco a escala centimétrica, forman cóndrulos y se amalgaman para ir formando planetesimales. Imagen J.M. Trigo (CSIC-IEEC).



MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA
Piroxeno ¹	$XY(Si,Al)_2O_6$
Olivino ²	$(Mg,Fe)_2SiO_4$
Plagioclasa ³	$NaAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8$
Cromita	$(Fe, Mg)Cr_2O_4$
Magnetita	$Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$
Troilita	FeS

Tabla I. Principales minerales hallados en condritas. 1X representa comúnmente Ca, Na, Fe²⁺ o Mg; Y suele ser Cr, Al, Fe³⁺, Mg, Mn, Sc, Ti, V o Fe²⁺. Augita, pigeonita, hiperstena, diópsido o enstatita son minerales que pertenecen a esta categoría. 2Se clasifica según esté más próximo a la forsterita (Mg₂SiO₄) o a la fayalita (Fe₂SiO₄). 3Se clasifica según esté más próximo a la anortita (CaAl₂Si₂O₈) o a la albita (NaAlSi₃O₈).

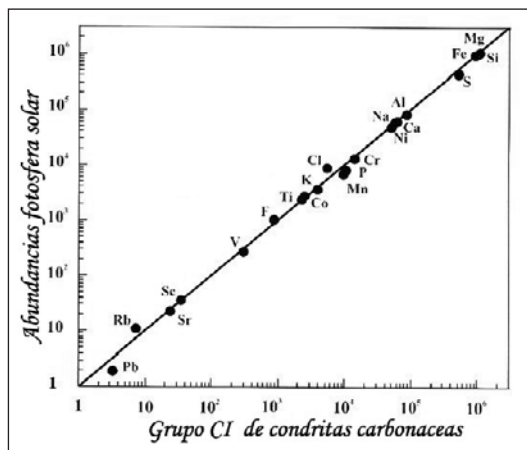


Fig.2. Abundancia en escala logarítmica de los elementos en el grupo CI de condritas carbonáceas (Condritas tipo Ivuna) frente a la abundancia deducida en la fotosfera solar. La mayoría de los elementos, excepto los altamente volátiles, se ajustan a una línea diagonal. Un claro ejemplo de que las condritas carbonáceas son representativas de los materiales que formaron el Sol. Figura adaptada de Hutchison (2004) en base a datos de Anders y Grevesse (1989).

EL ORIGEN DE LOS CÓNDRULOS Y DE LAS CONDRIAS.

La teoría más aceptada del origen de los cóndrulos es la teoría nebular, que se basa en su formación a partir de la fusión parcial de sólidos dispersos (llamados *dustballs* o bolas de polvo) que fueron calentados por diversos procesos formando gotitas líquidas en el disco protoplanetario. Tales gotitas tendrían principalmente composiciones máficas y dieron lugar al enfriarse a los denominados cóndrulos. Los cóndrulos constituyen el componente omnipresente en la mayoría de grupos de condritas conocidos. Las teorías actuales que pretenden explicar su creación sugieren que la interacción del gas con las primeras partículas minerales generó ondas de choque debido al material que cae hacia el interior del disco protoplanetario. Estas ondas son un mecanismo de fusión de los cóndrulos causadas por la formación de una especie de brazos espirales de materiales sólidos con el gas nebular (Hood & Horanyi 1991; Wood 1996; Boss 2000). La inestabilidad gravitacional produce ondas espirales de manera natural y éstas parecen ser un medio inevitable para el procesamiento térmico de los cóndrulos durante el tiempo en que el gas en el interior del disco se mantuvo (Boss y Durisen, 2005). Existen otros escenarios para la formación de los cóndrulos. También hay investigadores que proponen que los cóndrulos surgieron en grandes colisiones, aunque no sea un escenario ampliamente reconocido (véase p.e. Sears, 2004).

A partir de los sistemas de datación isotópica se conoce a ciencia cierta que antes de los propios cóndrulos se formaron las inclusiones refractarias. Shu et al. (2001) propusieron un modelo de procesamiento en el disco protoplanetario mayoritariamente aceptado donde separan los elementos refractarios y los moderadamente volátiles en cóndrulos y CAIs. Entienden pues que los se-

gundos se formaron como residuos evaporíticos de mezclas cósmicas de agregados esféricos de polvo (*dustballs*). En un disco protoplanetario en rotación tales agregados serían frenados progresivamente por el abundante gas que envolvió al sistema solar durante los primeros 3 Ma. Entonces, los agregados caerían hacia el Sol en escalas temporales de pocos siglos aunque quedarían sometidos a la acción del intenso campo magnético del Sol en su nacimiento (fase T-Tauri). En el modelo de Shu et al. (2001), la nueva zona de procesamiento para los CAIs cerca del proto-Sol sería el denominado anillo de reconexión, una región en forma toroidal (Fig. 3) donde las partículas son fuertemente calentadas y bombardeadas por partículas del viento solar para ser más tarde transportadas por el intenso viento estelar del protosol a las regiones externas de consolidación de asteroides y cometas (Lee et al. 1998).

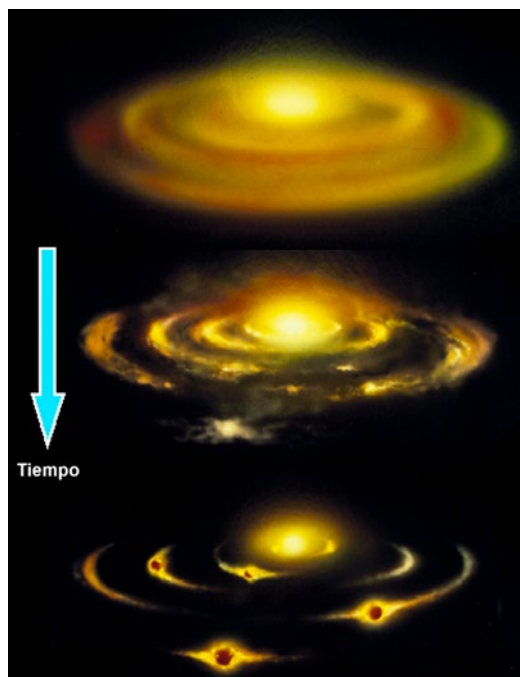


Fig.3. La envoltura magnética del Sol (magnetosfera) en su fase activa primigenia: T-Tauri. Los materiales del disco protoplanetario irían cayendo frenados por el gas hasta alcanzar la zona de reconexión de las líneas del campo para formar allí una región de formación de CAIs. Figura adaptada en base a Camenzind (1990).

Para las teorías nebulares, la variabilidad de relaciones entre elementos refractarios y moderadamente volátiles es la causa subyacente de la formación de CAIs y cóndrulos cuando los agregados primigenios son calentados a diferentes picos de temperatura por diversos procesos. Al parecer esto ocurrió durante la fase temprana de formación de nuestra estrella por lo que las partículas residuales estarían bajo el influjo del campo magnético y después serían arrojadas a órbitas planetarias por el viento estelar X, una versión mucho más intensa del viento solar. Parece obvio que tales fluctuaciones deben partir de procesos de calentamiento de los materiales primigenios bastante diversos. La opinión convencional es que los agregados de polvo de la nebulosa fueron rápidamente calentados y convertidos en gotitas de material fundido por el calentamiento inducido por llamaradas solares o por procesos de fricción e inducción de carga eléctrica entre materiales. En los primeros tiempos se han concebido ondas de choque generadas por procesos de fricción entre el gas y los materiales en regiones densas

del disco (Zook, 1981; Lugmair y Shukolyukov, 2001; Sanders y Taylor, 2005; Libourel y Krot, 2007). Por el contrario, (Bischoff et al., 2006; Sokol et al., 2007; Scott y Sanders, 2009) proponen que buena parte del material que formó los cóndrulos primero estuvo almacenado en planetesimales refractarios entre 1,5 y 5 Ma tras t_0 , antes de ser devueltos nuevamente a la nebulosa en forma de pequeños fragmentos originados por impactos.

La datación de los primeros materiales que forman las condritas también indica que la formación de los cóndrulos precedió o fue simultánea a la acreción de los cuerpos progenitores de las condritas carbonáceas. Algunos de los minerales predominantes en las condritas aparecen recopilados en la Tabla I. Hay evidencias de que el material se iba reciclando en múltiples eventos de formación de cóndrulos (Alexander, 1996). La posibilidad que presentan Sanders y Taylor (2005) es que los cóndrulos se formaron durante los 2 primeros Ma después de la formación del Sistema Solar (t_0) y a medida que se generaban se agregaban formando los planetesimales. La desintegración de elementos radioactivos de corta vida, el más relevante de los cuales es el ^{26}Al , contribuía a fundir su interior. Dado que la vida media de este isótopo es de 0,73 Ma, su capacidad de fundir los materiales de los planetesimales se redujo drásticamente pasados 1,5 o 2 Ma desde el t_0 , tiempo tras el cual los nuevos cuerpos que se seguían formando pudieron escapar de las temperaturas capaces de fundir sus materiales. Por tanto, los cóndrulos que se hallaban en su interior empezaron a sobrevivir, constituyendo los propiamente llamados cuerpos progenitores de las condritas.

Así pues, durante los primeros 2 Ma, los planetesimales se hallaban bajo un proceso constante de acreción, calentamiento, fragmentación por impactos (los restos producidos se mezclaban con polvo no procesado) y re-acreción en nuevos planetesimales. Los cóndrulos y la matriz se formaron en la misma región nebular (Bland et al., 2005; Scott y Krot, 2005) pero la matriz acogía a los volátiles que se iban perdiendo durante la formación de los cóndrulos, resultando la química conjunta final similar a la inicial (llamada composición solar primitiva), donde los cóndrulos pobres en Mn y la matriz rica en Mn se “complementaban” (Palme y Klerner, 2000). Todo este escenario de reciclaje de material primario hasta la formación de los cuerpos progenitores de las condritas carbonáceas sucede en un sistema cerrado que no modificó la isócrona inicial (4568 ± 1 Ma), es decir, se piensa que el fraccionamiento del Mn-Cr sólo ocurrió una vez en el principio.

FORMACIÓN DE LOS CÓNDRULOS Y PLANETESIMALES

El rol del calentamiento primigenio de ^{26}Al y ^{60}Fe .

Los diversos estudios realizados hasta la fecha de los componentes de las condritas parecen llegar a la conclusión de que durante el inicio del Sistema Solar los elementos radiogénicos estaban distribuidos de forma más o menos homogénea en la región interior del disco protoplanetario. Durante los primeros 1,5 Ma desde la formación de los primeros

sólidos (ver Thrane et al., 2006), el ^{26}Al produjo suficiente calor al desintegrarse en los materiales que formaron los planetesimales progenitores de las condritas carbonáceas. Como consecuencia, el interior de los cuerpos rocosos con un radio superior a unos 20 km se fundiría y segregaría químicamente (Hevey y Sanders, 2006) para dar lugar a núcleos metálicos. Sabemos que tales cuerpos diferenciados que se desintegraron en los primeros tiempos se encuentran representados entre los meteoritos metálicos gracias a los valores de $\epsilon^{182}\text{W}$ que se deducen en ellos (Burkhardt et al., 2008; Qin et al., 2008).

En el primer millón de años se produjo un fuerte fraccionamiento entre el Mn y el Cr. En realidad ambos elementos poseen temperaturas de condensación similares (1.190 K y 1.277 K respectivamente) (Palme y Jones, 2004; Wasson 1985), pero sin embargo se aprecian grandes diferencias en sus fraccionamiento en los distintos grupos de condritas. Los primeros sólidos que condensaron tenían una relación baja en Mn/Cr ya que después de que el Mg, Si y Fe condensaran en forsterita y Fe-Ni metálico, el cromo condensó con el Fe-Ni. El Cr, Mg, Si y Fe tienen temperaturas de condensación del 50% similares, entre el mayor y el menor hay tan sólo 50K de diferencia (1.340 – 1.290 K). Para alcanzar el 50% de la temperatura de condensación del Mn hay que disminuir 100 K más, y puede demostrarse de los modelos que en una disminución de la temperatura de 100 K se produce un incremento de diez veces la condensación de sólidos. Es decir, la condensación para formar forsterita y el Fe-Ni metálico donde estos cuatro elementos condensaron fue suficientemente importante como para descartar luego la formación de $(\text{Mg,Mn})_2\text{SiO}_4$ y $(\text{Mg,Mn})\text{SiO}_3$ (Wai y Wasson, 1977; Lodders, 2003). Además, la acreción de la forsterita y el Fe-Ni en planetesimales probablemente se dio rápidamente cuando la temperatura aún estaba por encima de la T de condensación del Mn. Estas razones podrían explicar por qué existe tanta diferencia entre el Mn y el Cr.

La importancia de la isócrona del Mn-Cr

Gracias a los sistemas isotópicos de datación como el del Pb-Pb o al asociado al de isótopos de vida corta como el Al-Mg (Kurahashi et al., 2008) se ha determinado, teniendo en cuenta la propagación de los errores posibles, que el fraccionamiento de Mn-Cr entre condritas carbonáceas predice la formación de sus cóndrulos y, por lo tanto, su agregación en, al menos, 0,4 Ma desde su fraccionamiento y probablemente más de 1,5-3 Ma después del fraccionamiento del Mn-Cr (es decir, entre 1,5 y 5 Ma después del t_0 de formación de las CAIs).

Así pues, se puede trazar una isócrona porque el material inicial de la nebulosa primitiva era un gas uniforme con la composición química de las condritas carbonáceas del grupo CI y, a partir de esos materiales nebulares, se puede considerar que comenzaron a generarse distintos reservorios químicos debido a que los elementos tienen diferente comportamiento en diferentes condiciones de temperatura y bajo diferentes tasas de choque. Es probable que tales regiones de formación de los asteroides

condríticos fuesen restringidas en un determinado momento formando anillos del disco protoplanetario pero partiendo de materiales procesados de manera similar. Es decir, existe evidencia que muestra que las abundancias químicas de todos estos reservorios partirían de un mismo cociente isotópico $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ inicial.

Aun así, nos podríamos plantear cuestiones acerca de cómo pudo preservarse la relación de Mn/Cr en los distintos reservorios durante los 1,5 Ma que separaron la formación de las CAIs y de los cóndrulos. De algún modo la isócrona sobrevivió en los materiales formativos de los asteroides y cometas de los que proceden las condritas carbonáceas. Una explicación es que tales objetos se agregasen rápidamente y, de ese modo, se convertirían en sistemas isotópicamente cerrados en una edad temprana sin permitir el procesamiento excesivo de sus materiales formativos en el disco protoplanetario.

El papel de los planetesimales en la preservación del fraccionamiento del Mn/Cr

Los planetesimales fueron cuerpos que actuaron como buenos reservorios para los isótopos (Mn/Cr), impidiendo intercambios con el polvo de la nebulosa. Los granos refractarios formados durante los primeros estadios de fraccionamiento de Mn/Cr enseguida fueron almacenados en planetesimales y permanecieron allí encerrados y aislados del polvo primitivo de composición CI. Asumimos que los planetesimales y el polvo de composición solar empezaron ambos con la misma relación $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$, es decir, parten de la misma isócrona (Scott y Sanders, 2009).

Entre 1 y 5 Ma después del t_0 , algunos de los planetesimales fueron fragmentados y rotos por impactos. Esta mezcla de *debris* y polvo, junto con el polvo más primitivo y no procesado, se agregó para dar lugar a una nueva generación de planetesimales: los cuerpos progenitores de las condritas carbonáceas. Consideramos que durante el proceso de impactos, aunque los restos y el gas nebular se mezclaran e intercambiaran constantemente elementos, el sistema global permanecía cerrado, por lo tanto los nuevos cuerpos progenitores mantendrían la misma isócrona, proveniente de los materiales refractarios de la generación anterior y que reflejaría una edad de $4568 \pm 1\text{Ma}$.

EL LEGADO DE LA CREACIÓN: LAS PRINCIPALES CLASES Y GRUPOS DE CONDRITAS.

Como ya se ha mencionado, las condritas son los meteoritos procedentes de cuerpos no diferenciados que albergan los materiales sólidos existentes en el disco protoplanetario hace unos 4.565 Ma. Hoy sa-

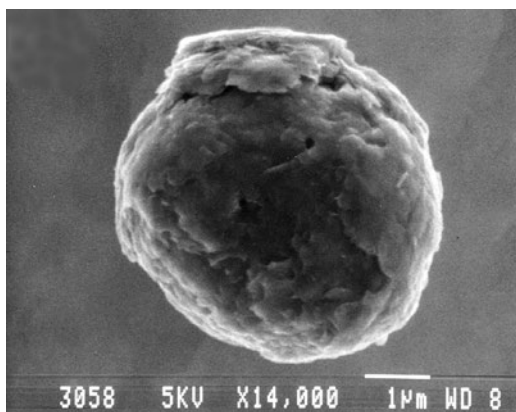


Fig.4. Grano presolar de grafito extraído de la matriz interna del meteorito Murchison. Cortesía Sachiko Amari.

bemos que también preservan en su interior materiales más antiguos y granos estelares de formación anterior o contemporánea al Sol (Fig. 4). En la Fig. 5. se presenta un diagrama de las cuatro clases principales de condritas que se conocen en la actualidad. La clasificación de las condritas en las diversas clases y grupos corrió a cargo a mediados del siglo veinte por el grupo del Prof. John Wasson perteneciente al Instituto de Geofísica y Física Planetaria (IGPP) de la Universidad de California Los Angeles (UCLA).

Las omnipresentes condritas ordinarias.

Las condritas ordinarias proceden de asteroides moderadamente grandes, dotados de diámetros de varios cientos de kilómetros que sufrieron calentamiento por metamorfismo. Sus materiales constituyentes fueron calentados sin llegar a fundirse como consecuencia del calor generado en la desintegración de los isótopos radiactivos primordiales. Esta clase de condritas son las más comunes y representan un 74% de las caídas de meteoritos (Grady, 2000).

Entre las condritas ordinarias encontramos tres grupos H, L y LL. Éstos varían ampliamente en su contenido en hierro y en la distribución de este elemento entre la fase metálica y los silicatos que los componen. Esto se traduce en que el cociente de hierro presente en forma reducida formando granos metálicos varía respecto al que está presente en forma oxidada (es decir como: FeO) en el resto del meteorito. Así la clase H posee mucho más Fe metálico que la L y esta, a su vez, que la LL como se ejemplifica en la Tabla II. El 6 de julio de 2007 tuvo lugar en Cali (Colombia) una histórica caída de una condrita ordinaria a medio camino entre las de los grupos H/L como sugería su contenido molar en fayalita (véase Fig. 3 de Trigo-Rodríguez et al., 2009a). Las secciones delgadas del meteorito muestran que ha sufrido cierto metamorfismo térmico con sus cóndrulos homogeneizados sobre la matriz. Por lo general también el tamaño de los cóndrulos se incrementa de la clase H a la LL. Además, un grupo recientemente descubierto, representado por el me-

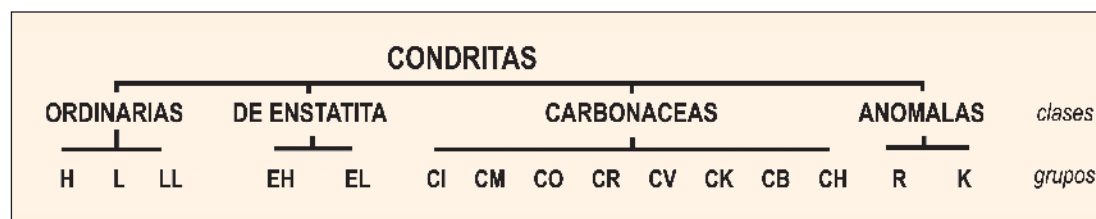


Fig.5. Las clases y los principales grupos de condritas identificados hasta la fecha. Sus firmas químicas sugieren que, teniendo en cuenta también las condritas sin agrupar, podrían proceder de una veintena de cuerpos progenitores (Trigo Rodríguez, 2012b).

GRUPO ->	H	L	LL
Fe ^o /FeO	0,58	0,29	0,11

Tabla II. Valores del cociente de Fe metálico frente a oxidado en los componentes de las condritas ordinarias permite distinguir tres grupos principales (Weisberg et al., 2006)

teorito Renazzo que da nombre al grupo: R, posee afinidades químicas a las condritas ordinarias pero rangos distintivos de isótopos de oxígeno.

Las condritas de enstatita: bloques formativos de la Tierra.

Las condritas de enstatita reciben su nombre del mineral que integra su composición denominado *enstatita* (MgSiO₃). Sus componentes minerales se formaron (condensaron) en un entorno mucho más reducido, es decir, en ausencia de oxígeno en fase gaseosa. Las condritas de enstatita se dividen en dos grupos principales denominados EH y EL dependiendo de si poseen respectivamente un contenido de aproximadamente el 30% o el 25% de su peso en Fe. Estas condritas se formaron en condiciones altamente reductoras comparadas con el resto de grupos de condritas y esa es precisamente la razón por la que heredaron su peculiar composición química y mineralógica. Por esa razón contienen silicatos pobres en hierro, presentan Si en fase metálica y contienen sulfuros, metales y nitruros bastante inusuales en otros meteoritos. Se piensa que se consolidaron en la región interna de formación de los planetas terrestres. Así se corrobora también por su composición química y sus cocientes de isótopos de oxígeno similares a las rocas terrestres lo que sitúa a las condritas de enstatita como posibles bloques precursores mayoritarios de los materiales que formaron la Tierra (Wasson, 1985; Trigo-Rodríguez, 2012a,b).

Las condritas de enstatita se dividen en dos grupos principales, denotados abreviadamente como EH y EL. Precisamente la composición del mineral conocido como *niningerita* (MgS) permite diferenciarlas con claridad. Las EH son más reducidas si cabe que las EL, presentan más Si en la fase metálica (entre un 2-3% en masa) y, además, contienen *niningerita* y diversos sulfuros alcalinos poco comunes. Por otro lado, existen ciertos minerales como la *alabandita* [(Mn,Fe)S] o aspectos relacionados con su composición química (contenido en Si < 1% en masa) que permiten distinguir las condritas de enstatita del grupo EL.

Las condritas carbonáceas: llegadas desde los confines del sistema solar.

Estos meteoritos tienen parte de culpa de nuestra fascinación por la química del Cosmos. Las rocas conocidas como condritas carbonáceas son los agregados consolidados en las regiones externas del disco protoplanetario y poseen anomalías isotópicas que las asocian al mismo medio interestelar. Quedaron almacenadas en asteroides pequeños consolidados en regiones más externas. El término carbonácea se refiere a la presencia de compuestos de carbono (materia orgánica) que está presente en su matriz mineral en concentraciones no demasiado grandes. De hecho, algunos grupos solo poseen en torno a un 1% en masa de carbono, mientras que los más ricos llegan sólo al 4%. Sus secciones delgadas evidencian claramente la matriz rica en carbono (Fig. 6)

Diferentes líneas de evidencia indican que los cuerpos progenitores de las condritas carbonáceas

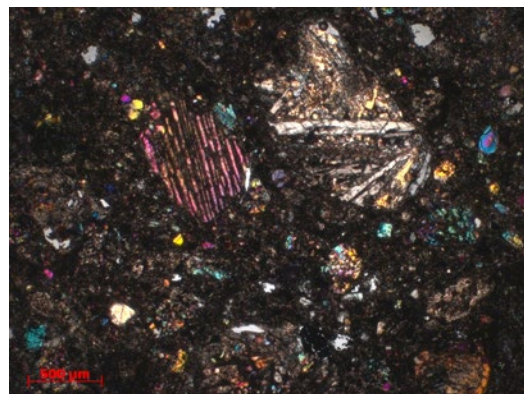


Fig.6. Imagen petrográfica en luz transmitida de una sección delgada de la condrita carbonácea Antártica EET 96026. Diversos cóndrulos aparecen fracturados. Imagen J.M. Trigo-Rodríguez (CSIC-IEEC).

poseían diámetros entre 40 y 100 km. Varias razones demuestran que fueron cuerpos de pocos cientos de kilómetros de diámetro, por ejemplo el hecho de que entre los diferentes grupos condriticos existe una correlación inversa entre la edad de los cóndrulos y la temperatura de máximo metamorfismo del grupo (Scott, 2007). Es decir, los cuerpos progenitores de condritas eran suficientemente grandes como para producir calor por desintegración de ²⁶Al y su acreción se dio a partir de 1,5 Ma des de la formación de los CAIs, momento en que ya no quedaba suficiente ²⁶Al para causar fusión (Sanders y Taylor, 2005). Tal como se describe en Trigo-Rodríguez y Martínez-Jiménez (2013, en este mismo monográfico) que los asteroides o cometas progenitores de las condritas carbonáceas han sufrido colisiones a lo largo de los eones que los han ido desintegrando en cuerpos más pequeños. Esto hace que los fragmentos sean dinámicamente inestables, evolucionando por procesos no gravitatorios hacia rutas de colisión con la Tierra.

Entre las condritas carbonáceas más primitivas encontramos miembros del grupo CO (asociado al primer reconocido: Ornans) Allan Hills 77307 cuya composición prístina demuestra que no todos los asteroides carbonáceos sufrieron metamorfismo ni fueron extensivamente alterados por agua. Ya vimos una imagen de microscopio electrónico en la Fig. 4 pero una imagen en falso color de microsonda de rayos X con el patrón: rojo (Mg), Verde (Ca) y Azul (Al) permite diferenciar bien sus componentes, particularmente los cóndrulos omnipresentes (véase Fig. 7). Las COs se caracterizan por un volumen de matriz pequeño lo que hace que posean un contenido más bajo de materia orgánica como se aprecia en la susodicha figura.

Precisamente la materia orgánica ha sido desde hace casi dos siglos la causa de la fascinación de la comunidad científica por las condritas carbonáceas. Todo surgió a partir de la caída en 1808 del meteorito *Alais* en el pueblo francés del mismo nombre. Cabe recordar que los meteoritos suelen ser nombrarse en base a su lugar de caída o a aquel en que fueron encontrados cuando la caída no fue observada. Al ser estudiado el meteorito *Alais* en 1834 por el químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) descubrió que albergaba en su interior materia or-

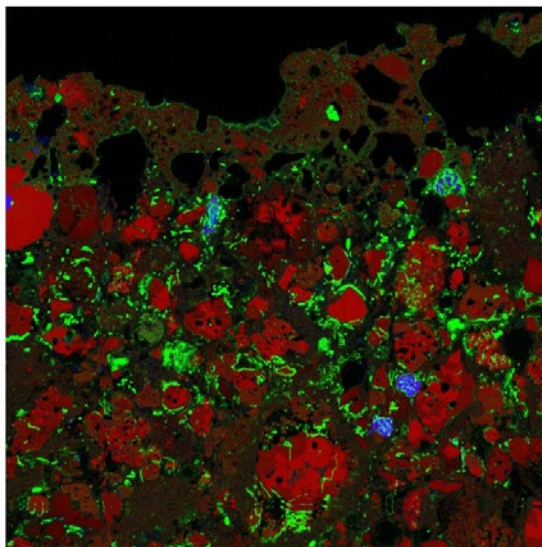
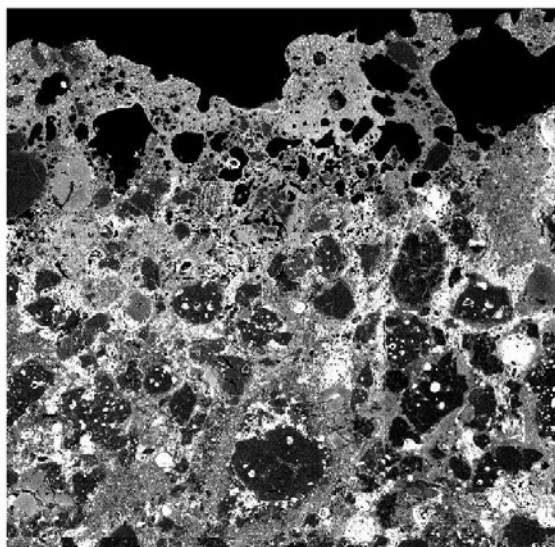


Fig.7. Imagen de 1 mm² de una sección delgada de la condrita carbonácea Antártica Allan Hills (ALH A77307). Izqda.) Imagen de microscopio electrónico donde se aprecia en la parte superior la porosa corteza de fusión de magnetita con un grosor en torno a 200-300 μm. Por debajo de ella el meteorito permanece intacto ejemplificando la baja conductividad térmica de estas rocas. Dcha.) Vista al microscopio de rayos X para cada elemento químico Mg-Ca-Al (rojo-verde-azul). Se aprecia que los cóndrulos son esencialmente máficos (por tanto, de color rojo) y ciertas inclusiones refractarias (CAIs) son fácilmente distinguibles en color violeta (Ca+Al) en el borde inferior derecho. Imagen J.M. Trigo-Rodríguez (CSIC-IEEC).

gánica. Las especulaciones se sucedieron aunque se pensó que podía haber estado contaminado. En cualquier caso, Berzelius describió la primera condrita carbonácea de la historia, cuya composición despertaría enorme interés en los círculos científicos. La confirmación vendría años más tarde cuando el químico alemán Friedrich Wöhler (1800-1882) identificase materia orgánica en el meteorito *Kaba* caído en Hungría el 15 de abril de 1857 y en otro caído en Sudáfrica llamado *Cold Bokkeveld*. Estos meteoritos, recién caídos y que presentaban sólo una matriz rica en carbono, confirmaban que la materia orgánica debía proceder del espacio exterior. Sin embargo, todavía quedaba la duda del grado de contaminación sufrido por las muestras.

Para resolver las dudas sobre la posible contaminación de las muestras tuvieron lugar en el siglo XX otras dos caídas de condritas carbonáceas el mismo año de 1969 en el que los astronautas de la NASA pisaban la Luna. Esta casualidad hizo que los laboratorios limpios que se habían creado para el estudio de las muestras lunares fueran probados con estas condritas únicas. La primera caída ocurrió el 8 de febrero de 1969 cuando varias toneladas de una condrita carbonácea del grupo CV cayeron sobre una remota aldea mexicana llamada *Pueblito de Allende*. Medio año más tarde, concretamente el 28 de septiembre de 1969 cayeron 82 kg de otra condrita carbonácea sobre *Murchison*, un pueblo en el estado de Victoria (Australia). En este segundo caso la condrita pertenecía al grupo CM. Ambas caídas proporcionaron cientos de especímenes de un valioso material, fresco e inalterado por su estancia en la Tierra, para su estudio científico. Todavía hoy en día son meteoritos ampliamente estudiados y disponibles en la mayoría de colecciones como, por ejemplo, la del Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC).

Desde esos primeros descubrimientos se han podido reconocer ocho grupos de condritas carbonáceas y varios sin agrupar (posiblemente de otros cuerpos no tan bien representados). Tales grupos y los meteoritos tipo que les proporcionan el acrónimo por el que son conocidos aparecen recopilados en la Tabla III. Ya nos sorprende que la mayoría de grupos hayan sido hidratados y también contienen abun-

dancias significativas de carbono que forma materia orgánica de la matriz que compacta la estructura. Eso sugiere que muchos de estos meteoritos proceden de cuerpos consolidados en una región fría en donde la materia orgánica y los hielos eran estables. Así pues, presumiblemente se formaron mucho más allá de la línea de hielos pero contienen una mezcla de minerales de alta temperatura junto a esos materiales de menor temperatura. Por consiguiente durante la agregación de materiales en esas regiones externas junto a los minerales más refractarios se incorporaron partículas de hielo en su estructura y, de manera más puntual, raros minerales hidratados que se diesan en el disco protoplanetario. La inclusión de cantidades importantes de agua en su estructura tendría implicaciones fundamentales para su evolución posterior.

Criterios químicos y mineralógicos indican que los asteroides condriticos estuvieron sometidos a cierto grado de metamorfismo y/o alteración acuosa que varió de un cuerpo progenitor (de un grupo) a otro (véase diagrama de la Fig. 8). Por otro lado la alteración acuosa experimentada por algunos grupos permite delimitar, en base a los minerales creados en esas etapas, las condiciones de temperatura y acidez (pH) a las que han estado sometidas. En la actualidad se ha estudiado y caracterizado la alteración acuosa en muchos grupos de condritas carbonáceas (Zolensky y McSween, 1988). La acción del agua empapando los cuerpos progenitores resultó implacable y alteró los minerales primigenios (Young et al., 1999). Por ello, la intromisión del agua dio lugar a minerales secundarios tales como: arcillas, óxidos, carbonatos, etc... Hoy en día conocemos que ciertos grupos como las condritas CM presentan

Tabla III. Grupos de condritas carbonáceas y el meteorito tipo que da origen a la segunda letra del acrónimo del grupo.

GRUPO	METEORITO TIPO (PAÍS); FECHA CAÍDA	PAÍS	FECHA DE CAÍDA
CI	Ivuna	Tanzania	16 Dic. 1938
CM	Mighei	Ucrania	18 Jun. 1889
CO	Ornans	Francia	11 Jul. 1868
CV	Vigarano	Italia	22 En. 1910
CR	Renazzo	Italia	15 En. 1824
CH	ALH 85085 (la H del grupo proviene de High in metal (rico en metal))	Antártida	encontrado
CB	Bencubbin	Australia	
CK	Karoonda	Australia	25 Nov. 1930

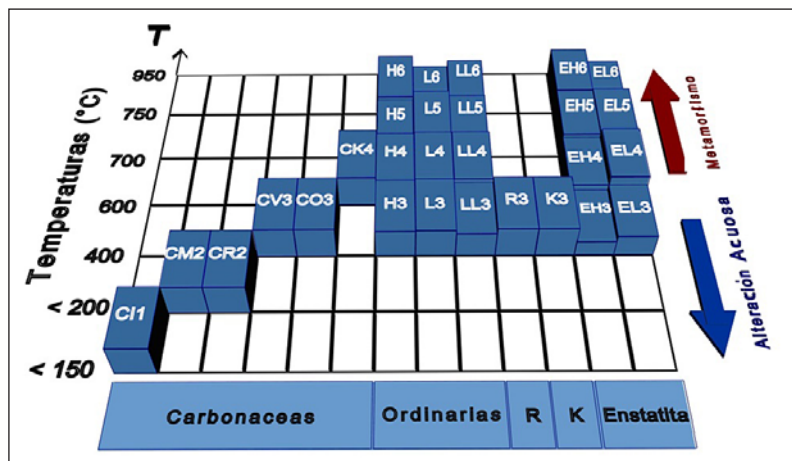


Fig.8. Los subtipos petrológicos con que se definen los diferentes meteoritos dan noción de la alteración metamórfica (térmica) o la de origen acuoso. Las condritas más primitivas e inalteradas por ambos procesos poseen un subgrupo petrológico 3. Respecto al metamorfismo, grados superiores a 3 se indican con un número creciente, desde 4 hasta 7. Finalmente, la alteración acuosa se contempla con el grado 2 (moderado) o 1 (extremo). Imagen adaptada cortesía de Elisabetta Dotto.

miembros que han experimentado diversos grados de alteración por agua (Trigo-Rodríguez et al., 2006; Rubin et al., 2007).

En cualquier caso, la incorporación de agua en su estructura, bien en forma de hielo bien enlazada en diversos minerales hidratados, resultó ser crucial para su evolución posterior. Si bien el calor generado no fue tan extremo como en los asteroides de mayor tamaño, sí resultó ser suficiente para fundir esos hielos y permitir que el agua empapase y modificase los minerales. Todavía seguimos aprendiendo del estudio de la materia orgánica contenida en las condritas carbonáceas. Por ejemplo, el meteorito Grave Nunataks (GRA) 95229 del grupo CR posee una abundancia de aminoácidos y otros compuestos orgánicos muy superior al propio Murchison (Pizzarello et al., 2011). Posteriormente ha demostrado que dentro del material kerógeno que forma la materia orgánica insoluble de esa y otras condritas carbonáceas se aloja gran cantidad de nitrógeno que bajo tratamiento hidrotermal a temperaturas de unos 300° C y una presión de 100 MPa es emitido como amoníaco (Pizzarello y Williams, 2012). Esto posee una gran relevancia dado que esa fuente de amoníaco podría haber sido relevante para explicar el contenido en nitrógeno desde una edad temprana de la atmósfera terrestre y la accesibilidad de este elemento biogénico a la materia viva (Trigo-Rodríguez, 2012b).

SORPRESAS PRIMORDIALES CONTENIDAS EN LAS CONDITAS: GRANOS ESTELARES.

Del estudio de los componentes de las condritas, particularmente mediante Nano-SIMS (*Secondary Ion Mass Spectrometer*) se pueden identificar en sus matrices granos estelares con anomalías isotópicas marcadamente ajenas a nuestro sistema planetario, formadas en las envolturas de otras estrellas (Zinner, 2003). También se denominan *granos presolares* (Fig. 1) y constituyen un auténtico muestreo de los procesos estelares e interestelares ocurridos en torno a la formación del Sol (Trigo-Rodríguez et al., 2009).

Hoy en día conocemos que las anomalías isotópicas retenidas en las fases minerales de los granos estelares son un claro indicador del entorno estelar del que proceden. Algunos de esos granos proceden de una estrella supernova y, por ello, se pensó que

ese tipo de estrellas podrían haber dado lugar al colapso gravitatorio del que surgiría nuestro sistema planetario (Zinner, 2003). Sin embargo, para explicar las anomalías isotópicas contenidas en meteoritos, se propuso que el Sol ha debido formarse en una asociación de estrellas entre las cuales se encontraría una con masa superior a 4 masas solares situada en el estadio evolutivo de las estrellas AGB de la Rama Asintótica de las Gigantes (Trigo-Rodríguez et al., 2009). Obviamente, estas partículas han estado sometidas a procesos químicos en el medio interestelar que les hacen poseer peculiaridades únicas (Brownlee et al., 2006; Rimola et al., 2012). Los escenarios están todavía abiertos y requieren una mejor tasación del grado de supervivencia de granos estelares en las condritas y en los cometas así como una mejor comprensión de los materiales condensados en entornos estelares fuera del equilibrio químico.

Podríamos decir que los granos estelares que han llegado hasta nuestros laboratorios tanto en meteoritos primitivos como en partículas de polvo interplanetario han sobrevivido a diferentes procesos que han participado sesgando su número y, en ciertos casos, sus propiedades (Trigo-Rodríguez y Blum, 2009). También en la Tierra las condritas carbonáceas más primitivas sufren ciertos procesos de alteración acuosa (otra buena razón para recuperarlas en plazo breve y preservarlas adecuadamente, Fig. 9). Primeramente, desde que se formaron en los entornos de estrellas de nuestra galaxia hasta que fueron incorporados a los meteoritos viajaron por el medio interestelar y por el disco protoplanetario donde estuvieron sometidos a radiación, rayos cósmicos y a procesos químicos del medio interestelar. Posteriormente en los pequeños asteroides de los que proceden los meteoritos también sufrieron procesos de compactación, calentamiento moderado y alteración acuosa. Finalmente, en el laboratorio pueden ser sometidos a diferentes tratamientos, bien con ácidos para separar a los granos estelares

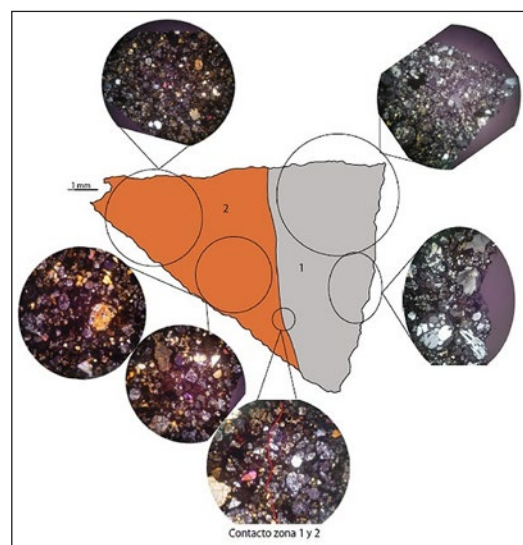


Fig.9. Sección esquemática del meteorito ALHA 77003 analizada con el microscopio petrográfico para la localización de distintas partes. Nótese las diferencias en los colores de interferencia entre la parte con alteración terrestre más pronunciada, y la otra menos afectada.

de los materiales del meteorito o bien al sufrir el calentamiento con los haces electrónicos o iónicos de diferentes instrumentos para así indagar su composición química e isotópica. Ambos procesos son parcialmente destructivos y pueden llegar a alterar la composición de los granos.

CONCLUSIONES

Los meteoritos denominados condritas poseen entre sus constituyentes las claves de los procesos astrofísicos acaecidos en el disco protoplanetario. Gracias a determinados sistemas isotópicos como el ^{26}Al y el ^{60}Fe , podemos datar en base a los sólidos preservados en cuerpos no diferenciados los primeros sólidos preservados: las inclusiones refractarias ricas en Ca y Al (CAIs), las cuales nos permiten datar el origen del sistema solar hace unos 4568 Ma (t_0). Así pues, los cóndrulos se formaron posteriormente, entre 1,5 y 5 Ma después del t_0 , y preservaron claves sobre los procesos de homogeneización química del disco protoplanetario. La agregación de los planetesimales ocurrió posiblemente en varias fases de reciclaje de material y los futuros modelos astrofísicos deben responder a la evidencia preservada.

Nuestros estudios de condritas carbonáceas prístinas esperamos que permitan comprender mejor los estadios de acreción y sinterización de los primeros bloques constitutivos de los embriones planetarios. La comparación entre condritas de un mismo grupo deben ayudar a la comprensión de los procesos físicos del disco protoplanetario, aunque también se tiene que tener en cuenta la posterior alteración terrestre de las muestras. En definitiva, la Meteorítica es una fascinante ciencia de camino interdisciplinario con el que hay que seguir avanzando para la comprensión del origen del Sistema Solar gracias, en buena medida, a las condritas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, C. M. O'D. (1996) Recycling and volatile loss in chondrule formation. In Hewins, R. H., Jones, R. H. y Scott, E. R. D., eds., *En Chondrules and the Protoplanetary Disk*. Cambridge University Press, Cambridge, RU, pp. 233-241.
- Amelin Y., Krot A. N., Hutcheon I. D. y Ulyanov A. A. (2002) Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions. *Science* 297, 1678-1683.
- Anders E. Y Grevesse N. (1989) Abundances of the elements - Meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, 197-214.
- Bischoff A., Scott E.R.D., Metzler K. y Goodrich C.A. (2006) Nature and origins of meteoritic breccias. En *Meteorites and the Early Solar System II*, D. Lauretta, H.Y. McSween (eds.), The University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, pp. 679-712.
- Bland P. A., Alard O., Benedix G. K., Kearsley A. T., Menzies O. N., Watt L. E. y Rogers N. W. (2005) Volatile fractionation in the early solar system and chondrule/matrix complementarity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102, 13755-13760.
- Boss, A. P. (2000) Shock-Wave Heating and Clump Formation in a Minimum Mass Solar Nebula. 31st Lunar Planet. Sci. Conference, abstract #1084.
- Boss, A. P. & Durisen, R. H. (2005) Chondrule-forming Shock Fronts in the Solar Nebula: A Possible Unified Scenario for Planet and Chondrite Formation. *Ap. J. Lett.*, 621, L137-140.
- Brearely A. J. (1993) Matrix and fine-grained rims in the unequilibrated CO₃ chondrite, ALHA77307 - origins and evidence for diverse, primitive nebular dust components. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 1521-1550.
- Brearely, A. J., 1996. Compositional and mineralogical trends in fine-grained chondrule rims in CO chondrites. 27th Lunar Planet. Sci. Conference, pp. 157-158.
- Brearely, A.J. y Jones, R.H., 1998. Chondritic meteorites. En *Planetary Materials*, Papike, J.J. (ed.), Reviews in Mineralogy, vol. 36. Mineralogical Society of America, Washington, DC (Chapter 3).
- Brownlee D. et al. (2006) Comet 81P/Wild 2 Under a Microscope. *Science* 314, 1711-1716.
- Burkhardt C., Kleine T., Bourdon B., Palme H., Zipfel J., Friedrich J. y Ebel D. (2008) Hf-W mineral isochron for Ca,Al-rich inclusions: age of the solar system and the timing of core formation in planetesimals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 6177-6197.
- Camenzind M. (1990) Magnetized Disk-Winds and the Origin of Bipolar Outflows. *Rev. Modern Astron.* 3, 234-265.
- Chizmadia, L.J., Rubin, A.E., Wasson, J.T., 2002. Mineralogy and petrology of amoeboid olivine inclusions in CO₃ chondrites: Relationship to parent-body aqueous alteration. *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 1781-1796.
- Connolly, H. C., Jr., Desch, S. J., Ash, R. D., & Jones, R. H. (2006) Transient heating events in the protoplanetary nebula. En *Meteorites and the Early Solar System II*, ed. D. S. Lauretta & H. Y. McSween (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 383-397.
- Grady M. 2000. *Catalogue of Meteorites*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 690 pp.
- Hevey P. J. and Sanders I. S. (2006): *A model for planetesimal meltdown by ^{26}Al and its implications for meteorite parent bodies*. *Meteorit. Planet. Sci.* 41, 95-106.
- Hood, L. L., y Horanyi, M. (1991) Gas dynamic heating of chondrule precursor grains in the solar nebula. *Icarus* 93, 259.
- Hutchison R. (2004) *Meteorites: A petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge University Press, Cambridge, RU, 506 pp.
- Ikeda, Y., 1982. *Petrology of the ALH-77003 chondrite (C3)*. *Proc. Symp. Antarct. Meteorites* 7, 34-65.
- Kurahashi E., Kita N. T., Nagahara H. y Morishita Y. (2008) ^{26}Al - ^{26}Mg systematics of chondrules in a primitive CO chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 3865-3882.
- Lee, T., Shu, F. H., Shang, H., Glassgold, A. E., s Rehm, K. E. (1998) rotostellar Cosmic Rays and Extinct Radioactivities in Meteorites. *Ap. J.* 506, 898-912.
- Libourel G. y Krot A. N. (2007): Evidence for the presence of planetesimal material among the precursors of magnesian chondrules of nebular origin. *Earth Planet. Sci. Lett.* 254, 1-8.
- Lodders K. (2003) Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *Astrophys. J.* 591, 1220-1247.
- Lugmair G. W. and Shukolyukov A. (2001) Early solar system events and timescales. *Meteorit. Planet. Sci.* 36, 1017-1026.
- Moynier F., Yin Q.-Z. and Jacobsen B. (2007) Dating the first stage of planet formation. *Astrophys. J.* 671, L181-L183.
- Palme H. y Klerner S. (2000) Formation of chondrules and matrix in carbonaceous chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.* 35, A124.

- Palme H. y Jones A. (2004) *Solar system abundances of the elements*. En *Meteorites, Comets and Planets* (ed. A. M. Davis), vol. 1. Treatise on Geochemistry (eds. H. D. Holland and K. K. Turekian), pp. 41–61. Elsevier, Oxford.
- Pizzarello, S. et al. (2011) From the Cover: Abundant ammonia in primitive asteroids and the case for a possible exobiology, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108, 4303–4306.
- Pizzarello, S.; Williams, L. B. (2012) Ammonia in the Early Solar System: An Account from Carbonaceous Meteorites. *The Astrophysical Journal* 749, article id. 161, 6 pp.
- Qin L., Dauphas N., Wadhwa M., Masarik J. y Janney P. E. (2008) Rapid accretion and differentiation of iron meteorite parent bodies inferred from ^{182}Hf - ^{182}W chronometry and thermal modeling. *Earth Planet. Sci. Lett.* 273, 94–104.
- Rimola A., Sodupe M. Y Ugliengo P. (2012) Computational study of interstellar glycine formation occurring at radical surfaces of water-ice dust particles. *Astroph. J.* 754: 24 (10 pp.).
- Rubin A.E., Trigo-Rodríguez J.M., Huber H. y Wasson J.T. (2007) Progressive aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites. *Geoch. et Cosmoch. Acta* 71, 2361–2382.
- Russell, S.S., Huss, G.R., Fahey, A.J., Greenwood, R.C., Hutchison, R., y Wasserburg, G.J. (1998) An isotopic and petrologic study of calcium–aluminum-rich inclusions from CO₃ meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62, 689–714.
- Sanders I. S. y Taylor G. J. (2005) Implications of ^{26}Al in nebular dust: formation of chondrules by disruption of molten planetesimals. En *Chondrites and the Protoplanetary Disk* (eds. A. N. Krot, E. R. D. Scott and B. Reipurth), ASP Conference Series, vol. 341. Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, EUA, pp. 915–932.
- Scott E.R.D. (2007) Chondrites and the protoplanetary disk. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 35, 577–620.
- Scott E. R. D. y Jones R. H. (1990) Disentangling nebular and asteroidal features of CO₃ carbonaceous chondrite meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 2485–2502.
- Scott E. R. D. y Krot A. N. (2005) Thermal processing of silicate dust in the solar nebula: clues from primitive chondrite matrices. *Astrophys. J.* 623, 571–578.
- Scott, E. R. D., y Sanders, I. S. (2009). Implications of the carbonaceous chondrite Mn-Cr isochron for the formation of early refractory planetesimals and chondrules. *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 5137–5149.
- Sears D.W.G. (2004) The origin of chondrules and chondrites. Cambridge University Press, Cambridge, RU, 209 pp.
- Shu, F. H., Shang, H., Gounelle, M., Glassgold, A. E., Lee, T. (2001) The Origin of Chondrules and Refractory Inclusions in Chondritic Meteorites. *Astrophys. J.* 548: 1029–1050, 2001.
- Sokol A.K., Bischoff A., Marhas K.K., Mezger K., and Zinner E. (2007) Late accretion and lithification of chondritic parent bodies: Mg isotope studies on fragments from primitive chondrites and chondritic breccias. *Meteorit. Planet. Sci.* 42, 1291–1308.
- Thrane K., Bizzarro M. and Baker J. A. (2006) Extremely brief formation interval for refractory inclusions and uniform distribution of ^{26}Al in the early solar system. *Astrophys. J.* 646, L159–L162.
- Trigo-Rodríguez J.M. (2008) La misión Stardust: Implacaciones astrofísicas de las muestras analizadas del cometa 81P/Wild 2. *Rev. Iberoamericana Física* 4, 23–30.
- 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., Rubin A.E. and J.T. Wasson (2006) Non-nebular origin of dark mantles around chondrules and inclusions in CM chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 1271–1290.
- Trigo-Rodríguez J.M. y J. Blum (2009) The effect of aqueous alteration and metamorphism in the survival of presolar silicate grains in chondrites. *Publ. Astronomical Society of Australia* 26(3), 289–296.
- Trigo-Rodríguez J.M., D.A. García-Hernández, M. Lugaro, A. Karakas, M. van Raai, García Lario P., y Manchado A. (2009) The role of massive AGB stars in the early solar system composition. *Meteorit. Planet. Sci.* 44, 627–641.
- Wai C. M. and Wasson J. T. (1977) Nebular condensation of moderately volatile elements and their abundances in ordinary chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 36, 1–13.
- Wasson J. T. (1985) Meteorites: Their Record of Early Solar System History. W.H. Freeman, p.250.
- Weisberg, M.K., McCoy, T.J. y Krot, A.N. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification. En *Meteorites and the Early Solar System II*, 19–52.
- Wood, J. A. (1996) Processing of chondritic and planetary material in spiral density waves in the nebula. *Meteorit. Planet. Sci.*, 31, 641.
- Young E.D., Ash R.D. England P. Y Rumble D. III (1999) Fluid flow in chondritic parent bodies: deciphering the compositions of planetesimals. *Science* 286, 1331–1335.
- Zinner E. (2003) Presolar grains. En *Treatise on Geochemistry*, A.Davis (ed.), vol. 1, Meteorites, Planets and Comets. Oxford, Elsevier-Pergamon, 17–39.
- Zolensky M. and McSween H.Y. (1988) Aqueous alteration. En *Meteorites and the early solar system*, University of Arizona, Tucson, AZ, EUA, 114–143.
- Zook H. (1981) On a new model for the generation of chondrites. *Lunar Planet. Sci.* 12, 1242–1244. ■

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