

31

Marco Polo-R

Recopilando nuevas claves sobre el origen de la vida a partir del estudio de un NEO progenitor de las condritas carbonáceas

Josep M. Trigo-Rodríguez

6 junio 2012



El grupo de investigación que dirijo se encuentra especializado en el estudio de los primeros materiales formados en el Sistema Solar. Junto a otros tres científicos españoles y una veintena de investigadores europeos y cinco norteamericanos he presentado a la Agencia Espacial Europea (European Space Agency, ESA) el proyecto de la misión Marco Polo-R para traer a la Tierra material de un asteroide próximo a la Tierra. De hacerse realidad sería una oportunidad única para la exploración del espacio y un motivo de renombre para la ESA respecto a otras agencias espaciales.

Gracias a los astronautas que recogieron las primeras muestras de rocas lunares se ha podido avanzar muchísimo en la investigación lunar, datando los cráteres y las cuencas de impacto. Queremos convencer a los responsables de la ESA que el retorno de muestras desde un NEO es un objetivo de oportunidad científica que no debe desaprovechar Europa. Debemos recordar que solo han sido retornadas muestras de la Luna por las misiones tripuladas Apollo de la NASA y por las misiones robóticas Luna de la Agencia Espacial Rusa, junto a las retornadas en forma de diminutas partículas capturadas en un aerogel de dióxido de silicio del cometa 81P/Wild 2 por parte de la mi-

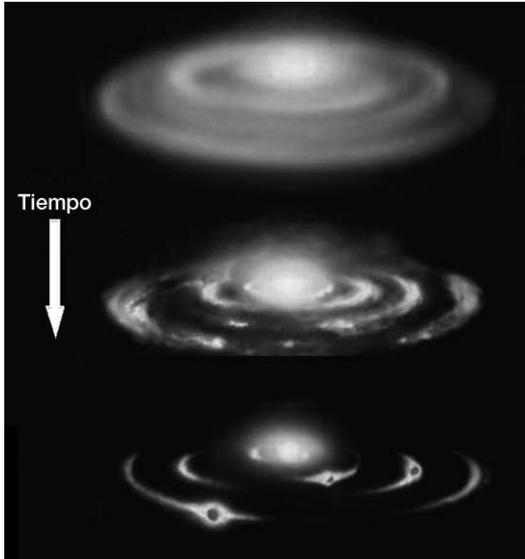


Fig. 1. Unos 10 millones de años después de la formación del disco tuvo lugar la disipación del gas y la acreción de los embriones de los planetas terrestres. (*Trigo-Rodríguez, 2012*).

sión Stardust de la NASA y las retornadas del asteroide Itokawa por la sonda Hayabusa de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA). Esa misión cartografió el asteroide Itokawa y tras tocarlo suavemente levantó motas de polvo que quedaron retenidas en un receptáculo de la cápsula de retorno a la Tierra. La composición de este asteroide no es tan interesante ya que se trata de condritas ordinarias (los meteoritos más comunes llegados a la Tierra) y no de condritas carbonáceas. (De ello hablaré más adelante).

Formación del sistema planetario

En la figura 1 queda reflejada la evolución del disco protoplanetario de nuestro Sistema Solar en los primeros cinco a diez millones de años. Una muestra de aquel proceso lo tenemos en la nebulosa M 42 de Orion en la que aparecen jóvenes discos protoplanetarios que, dada su riqueza en polvo, absorben la luz que hay detrás. Con el Telescopio Espacial Hubble (HST) se observan en la banda del infrarrojo y puede verse que en sus núcleos se está dando la formación de estrellas. Estudiando estos objetos que están naciendo estamos empezando a comprender como evolucionan los discos protoplanetarios, que son objetos extraordinariamente dinámicos formados mayoritariamente por pequeñas par-

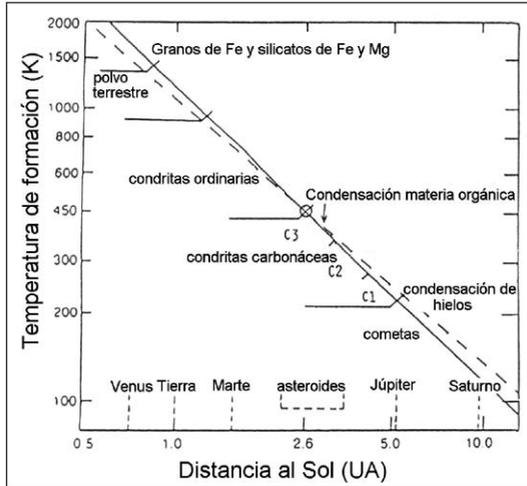


Fig. 2. Originariamente había una masa de gas y polvo muy caliente que rodeaba al Sol primigenio. Al enfriarse comenzaron a condensarse minerales de composición variable según la distancia al Sol. (*Adaptado de Delsemme (2000)*).

tículas de gas y polvo. La consolidación de objetos en su interior es fundamental para la posterior compactación o agregación de futuros planetas.

La idea es que los planetas gigantes de nuestro Sistema Solar se formaron mucho más allá de su posición actual, en zonas donde acretaron objetos integrados por pequeñas partículas y hielo. Se formaron y crecieron muy rápidamente en condiciones reductoras (bajo contenido en oxígeno) y lo fueron por objetos helados que se encontraban a bajas velocidades de impacto entre ellos.

En la región interna del Sistema Solar tendríamos formación de minerales a mayores temperaturas e impactos a superior velocidad relativa; por tanto unas colisiones fueron constructivas y otros destructivas debido a la energía de impacto, dando lugar a un conjunto de materiales de diferentes composiciones y tamaños. Éstos formarían los llamados planetesimales que engendrarían, al cabo de varias decenas de millones de años, a los embriones planetarios.

Alrededor de tres a cinco millones de años, el gas desapareció del disco protoplanetario debido a que el Sol comenzó a brillar con intensidad y su presión de radiación barrió el hidrógeno y el helio del disco. Obviamente, antes se formaron Júpiter y Saturno, porque en caso contrario no estarían

compuestos de hidrógeno y helio como lo están mayoritariamente.

Partiendo de las ideas de investigadores como Cameron reflejadas en la figura 2, en la que en un eje está representada la temperatura de formación y en el otro la distancia al Sol, sabemos que para los objetos que se encuentran más alejados del Sol la temperatura de formación decae. A la distancia donde hoy tenemos el cinturón principal de asteroides, entre Marte y Júpiter, tiene lugar la condensación de materia orgánica y en la posición más externa, cercana a Júpiter, acontece la condensación de hielos. Este modelo también depende de la densidad del gas, composición, etc.

Afortunadamente todo esto no se trata de una mera teoría y muchas de esas fases pueden verificarse y datarse gracias a los meteoritos más primitivos, denominados *condritas*. En nuestros laboratorios tenemos material preservado de aquellas épocas. No es un material como el que tenemos en la Tierra, que aunque contiene vestigios de su formación, no deja de ser rocas procesadas por metamorfismo y otros procesos geológicos. Los restos terrestres son rocas ígneas, formadas en procesos magmáticos, rocas que han pasado muchas veces por el procesado del ciclo tectónico, procesos que han provocado que varíen las composiciones químicas isotópicas de los materiales de los planetas comparativamente con los objetos más primitivos.

Insisto en la idea básica de cómo se han diferenciado los cuerpos planetarios como la Tierra, dependiendo de la estructura primordial del disco, su composición y otros factores. Un aspecto fundamental es el diámetro de los planetas, según demuestran numerosos trabajos publicados en la última década, como los de Yoshino et al. en la revista Nature en 2003, donde proponen unos modelos de cuerpos primigenios con un diámetro determinado. En función del diámetro asignan la cantidad de hierro 60 y aluminio 26 estimada en base al análisis de meteoritos. Recuerdo que estos dos isótopos son radiactivos y fueron muy abundantes entre los materiales formadores de meteoritos. ¿Cómo lo sabemos? Pues porque aunque son isótopos de vida muy corta, y hoy en día ya no existen, pero sí existen sus «hijos», los isótopos en los cuales decaen. Se trata también de isótopos del hierro, del aluminio o del magnesio. Por tanto, lo que se tiene es una indicación de que para los objetos con un diámetro superior a unos 100 km, la temperatura que provocó la desintegración de los isótopos radiactivos fue suficientemente elevada como para producir la segregación química, es decir, la diferenciación en capas: un núcleo de hierro, un manto de diversos óxidos de silicatos y una corteza de

materiales como silicatos ligeros y otros compuestos. Los objetos por debajo de 100 km de diámetro se mantuvieron esencialmente inalterados, mientras que los de más de 1.000 km ya los consideramos cuerpos planetarios y su diferenciación fue ya completa.

Las condritas proceden precisamente de esos cuerpos preservados que no han sufrido diferenciación química. Son como los sedimentos de la creación. Si tomásemos una cucharadita del material del que se formaron, sería como si fuésemos al río protoplanetario y tomásemos un puñado de las partículas que orbitaban alrededor del Sol.

Sabemos que la Tierra se formó de diversos embriones que, en general y con algunas excepciones, eran pobres en agua y en materia orgánica. Y que, a partir de una de las grandes colisiones sucedidas durante los primeros 100 millones de años, es como se formó la Luna. La diferenciación en planetas con un núcleo, como Venus o la Tierra, se dio de forma muy rápida, aproximadamente en unos 30 millones de años después de la formación del Sistema Solar.

Son bien conocidos los cinturones de Van Allen que forman la magnetosfera que envuelve la Tierra. Muchas veces se habla de la Luna como estabilizador del eje de rotación terrestre, pero la Luna también es un estabilizador del magnetismo terrestre. Su influencia hace que el interior de la Tierra se mantenga fluido debido al efecto gravitatorio, que es variable por la excentricidad de su órbita, y ha sido fundamental para el mantenimiento del campo magnético terrestre. Por tanto, la formación de la Luna, desde un punto de vista astrobiológico, también tiene una gran relevancia.

La formación de los planetas terrestres se produjo a partir de bloques rocosos (planetesimales) que contenían los núcleos radiactivos. La Tierra se formó de diversos embriones pobres en agua y materia orgánica a partir de colosales colisiones acontecidas durante los primeros 100 millones de años. Los núcleos metálicos de los planetas se formaron en unos 30 millones de años desde el origen del Sistema Solar, según proponen Halliday (2000) y Yin et al (2002).

Los meteoritos del grupo de las *condritas de estatita* son representativos del material que formó la Tierra: poseen cocientes de isótopos de oxígeno parecidos a los de las rocas terrestres. El oxígeno se presenta en la naturaleza en forma de tres isótopos: ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O , por lo que se pueden calcular los cocientes isotópicos relativos (por ejemplo la abundancia en un material de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) respecto a un estándar. Se compara el valor de ese cociente para

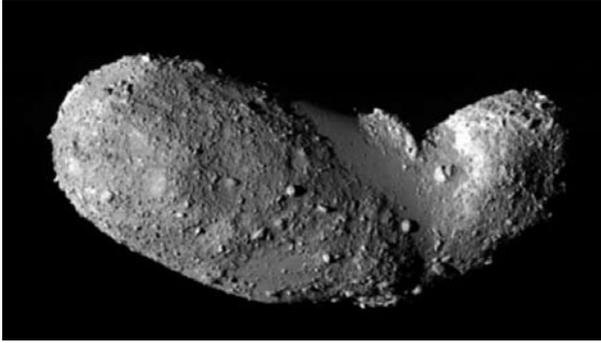


Fig. 3. El asteroide (25143) Itokawa fotografiado por la sonda Hayabusa. Es un magnífico ejemplo de una pila de escombros. Ésta ha sido la misión «estelar» de los últimos tiempos, y la guinda fue que la cápsula de retorno a la Tierra recuperada por los científicos japoneses contuvo pequeñas partículas de polvo de la superficie del asteroide. (Imagen: Misión Hayabusa (ISAS/JAXA)).

una roca o un meteorito en relación al valor dado en el oxígeno del agua del océano (SMOW, siglas en inglés de Standard Mean Ocean Water). Cada meteorito o cuerpo planetario se formó en una presencia de isótopos de oxígeno particular (variable según su distancia de formación al Sol y el instante concreto de condensación). Por ello, mediante este cociente es posible identificar el origen de estos meteoritos, es decir, si proceden de la Tierra, de Marte o de Vesta. Evidentemente todos estos cuerpos planetarios poseen anomalías químicas adicionales que permiten corroborarlo.

Hoy en día sabemos que la agregación terrestre ocurrió en diferentes fases y de poblaciones de objetos que variaron con el tiempo. Sabemos, por ejemplo, que el manto superior y la corteza quedan mejor representadas por otros grupos de condritas como son las ordinarias y carbonáceas. Los gases procedentes del manto terrestre también contienen firmas isotópicas de las condritas como demostraron Drake y Righter en una publicación en Nature de 2002.

Misiones espaciales

Hablaré ahora de las misiones espaciales dirigidas a los «padres» de los meteoritos. La misión NEAR Shoemaker fue bautizada con el nombre del investigador americano Eugene Shoemaker, uno de los pioneros en el estudio planetario y, en particular, de los impactos meteoríticos. Realizó estudios sobre la importancia de los impactos en la evolución de la Tierra. Esta misión fotografió la superficie del asteroide Eros.

La sonda Hayabusa fotografió la superficie del asteroide 25143 Itokawa, que parece una pila de escombros formada por la reagregación gravitacional de cuerpos más pequeños producidos tras un impacto catastrófico. (Figura 3). Se formó como consecuencia de continuos impactos que le han dado esta forma tan peculiar.

El cinturón principal de asteroides es el remanente de los cuerpos que no se dispersaron ni se agregaron en los planetas. Situado en la región entre Marte y Júpiter, contiene unos 320.000 asteroides numerados en el cinturón principal, de unos 750.000 estimados en total, aunque de pocas decenas de metros o más pequeños podrían haber millones que permanecen demasiado débiles para los programas de búsqueda. Entre ellos menciono como anécdota que en el boletín del Minor Planet Center del 6 de mayo de 2012 se nombró a un asteroide con mis apellidos, lo cual es un motivo de gran orgullo para mí. Se trata de un asteroide de alrededor de 5 km de diámetro, el 8325 Trigo-Rodriguez.

Los que se acercan a la Tierra se denominan *asteroides próximos a la Tierra* pero se conocen con el acrónimo anglosajón *NEOs*. Hasta el 1 de junio de 2012 se conocen 845 con un diámetro superior a 1 km, de entre un total de unos 9.000. De estos hay aproximadamente unos 1.309 que son potencialmente peligrosos para la Tierra y se les denomina *PHAs*, de los cuales unos 152 tienen más de 1 km. Entre un 80 y un 90% de estos objetos provienen del cinturón principal.

El investigador Daniel Kirkwood advirtió en el siglo XIX que hay unas regiones prohibidas para la presencia de los asteroides. Estaba realizando observaciones en diferentes regiones cuando se dio cuenta que había algunas zonas escasamente pobladas de asteroides. Hoy día sabemos que son regiones que harían inestable el movimiento de cualquier objeto porque coinciden con un múltiplo del periodo orbital de los planetas, produciendo resonancias y dominando el movimiento del cinturón principal; lo dominan bien porque están muy cerca o bien porque son muy masivos. Marte es pequeño, pero está relativamente cerca de la región interna del cinturón y es, por tanto, generador de ciertas resonancias interiores. Júpiter domina sobre todo y produce resonancias del movimiento medio como, por ejemplo, las resonancias 2:1 o 3:1. Quiere decir esto que un cuerpo en tales resonancias completaría dos o tres revoluciones alrededor del Sol mientras Júpiter haría exactamente una. Cuando ambos astros se encuentran relativamente próximos entre sí, Júpiter

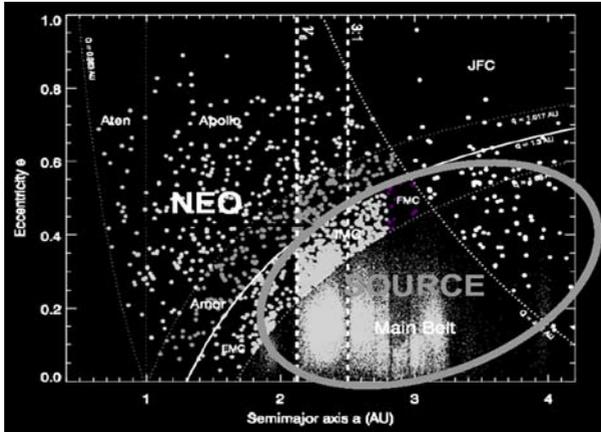


Fig. 4. Principales fuentes de NEOs. (A. Barucci (Marco Polo-R)).

aleja al asteroide hacia una región que no le moleste. La mayoría de NEOs provienen del cinturón principal impulsados por este tipo de resonancias.

En la figura 4 se muestran las principales fuentes de NEOs. En el eje horizontal se representa el semieje mayor de la órbita del objeto en unidades astronómicas (AU) y en el eje vertical, la excentricidad. Aparecen los tres tipos principales de NEOs: los Aten, los Apollo y los Amor, y las líneas de las resonancias 2:1 y 3:1, más la de Saturno; son resonancias que dispersan algunos de estos objetos y los envían a órbitas cercanas a la Tierra. Son objetos de peligro relativo pero también fuente de oportunidades ya que con ellos es posible estudiar asteroides relativamente primitivos o primordiales; al acercarse mucho a la Tierra el coste económico es menor.

En el Institut de Ciències de l'Espai (CSIC-IEEC) y en colaboración con el que fue mi director de tesis, el Dr. Jordi Llorca, de la Universitat Politècnica de Catalunya, realizamos la caracterización de meteoritos de España y de otros países. En particular en mi grupo de investigación tenemos como objetivos principales estudiar las fases iniciales de formación del Sistema Solar, identificar las principales fases de formación de planetas, asteroides y cometas, y determinar las fases minerales y el origen de los diferentes componentes preservados en estos fascinantes materiales.

Utilizamos en nuestros laboratorios una serie de técnicas instrumentales que nos permiten entre otras cosas estudiar la alteración acuosa de las condritas carbonáceas. Por ejemplo, estudiamos a través de microscopios pe-

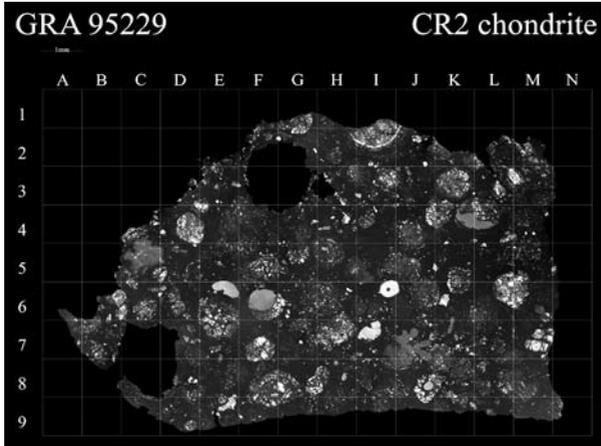


Fig. 5. Sección delgada del meteorito GRA95229, la condrita carbonácea del grupo CR con mayor contenido en aminoácidos. (Imagen: J.M. Trigo/M. Maurice (CSIC-IEEC)).

trográficos y electrónicos diversos meteoritos de la colección Antártica de la NASA que nos envían desde el Johnson Space Center. (Figura 5). Se aprecian los cóndrulos, que dan nombre a las condritas, las inclusiones refractarias (CAIs), granos metálicos y una matriz formada por granos muy finos de tamaño nanométrico. El que se muestra en la imagen es un meteorito muy primitivo y heterogéneo, pero si se toma un meteorito o un cometa y se calienta, lo que se hace es homogeneizar su contenido químico e isotópico, con lo cual se pierde mucha información sobre como se formó y sobre los materiales que tenía cuando estaba surcando el espacio alrededor del Sol.

Las condritas carbonáceas son objetos muy poco comunes en las colecciones de meteoritos; son extremadamente primitivos por lo que nos permiten ir mucho más lejos en el tiempo. Evidencian procesos muy energéticos ocurridos en el disco protoplanetario pues los propios cóndrulos o CAIs se formaron por el calentamiento y recristalización de agregados de diminutas partículas.

Entre los análisis que realizamos están las inclusiones de calcio y aluminio. Se efectúan con una microsonda electrónica de Rayos X que permite asignar un determinado color a cada uno de los elementos químicos, con lo cual conseguimos un perfil de la estructura y la composición que nos permite identificar las inclusiones más primitivas que encontramos en los meteoritos, en este caso los primeros sólidos preservados que se formaron en el disco

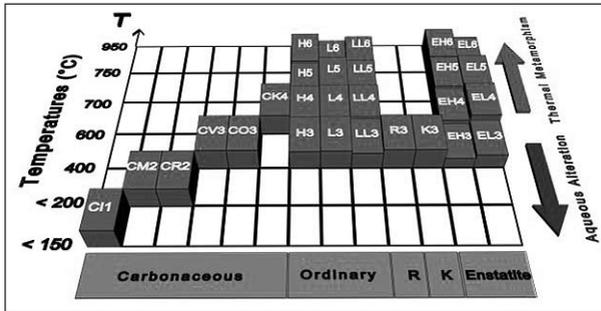


Fig. 6. Clasificación de condritas carbonáceas y su grado de alteración acuosa y metamorfismo térmico. (Cortesía: E. Dotto (INAF)).

protoplanetario, lo que nos ha permitido datar la formación de nuestro sistema planetario en 4.568 millones de años; entonces estos sólidos estaban surcando el espacio alrededor del Sol. Entre el resto de materiales tenemos que los cóndrulos son posteriores: alrededor de dos a tres millones de años posteriores a la formación de las inclusiones refractarias debido a las altas temperaturas que existían.

En la figura 6 están clasificados los materiales que sospechamos formaron la mayoría de cuerpos o bloques constitutivos del planeta Tierra. Son las condritas de enstatita, denominadas así porque mayoritariamente contienen este mineral junto a metal, formadas en un ambiente de alta temperatura y en ausencia de oxígeno. Son materiales metálicos muy reducidos, sin alteración acuosa, ya que el agua no existía. Y sospechamos que son el tipo de condritas que se formarían más cercanas al Sol, donde en la fase vapor no había tanto oxígeno.

En el gráfico también vemos los diferentes tipos de condritas, entre las que están las condritas carbonáceas, las condritas ordinarias y las del tipo R y K. Asimismo se indican las temperaturas que se han podido deducir a partir del análisis de sus minerales y de determinados patrones químicos.

El asteroide 253 Mathilde es uno de los objetos que sospechamos es progenitor de las condritas carbonáceas. Obviamente existen muchos otros, asociados a los diferentes grupos que conocemos pero también a otros que todavía no tenemos representados en las colecciones de meteoritos. Actualmente estamos estudiando condritas de la NASA, seleccionando meteoritos extraordinariamente pequeños. Estoy hablando de algunos que son del tamaño de una uña, de los que se obtienen secciones delgadas de un grosor micrométrico para estudiarlas al microscopio y ver todos estos materiales

primigenios.

Para estos estudios utilizamos espectrómetros que dirigen un haz de luz a la muestra y a un objeto de calibración, que en este caso es sulfato de bario, y que permite determinar la reflectividad de la luz. De esta forma podemos comparar en términos absolutos como reflejan la luz, pero no solo en el valor que denominamos «albedo», que es básicamente el porcentaje reflejado en todo el rango visible, sino obteniendo la reflectividad en diferentes longitudes de onda. De este modo podemos comparar estos espectros de meteoritos del laboratorio con los espectros de meteoritos u objetos que hay en el espacio exterior.

También utilizamos espectrómetros del rango infrarrojo. Se muelen las pequeñas muestras, aunque esto siempre resulta penoso, pero la cantidad de información que obtenemos es valiosísima. Enviamos un haz de luz infrarroja que atraviesa la muestra y después de ser dispersada se recoge en el detector, lo que permite obtener espectros en el infrarrojo muy interesantes. Para diversas condritas carbonáceas la banda de absorción alrededor de 3 micras nos indica la existencia de agua absorbida en filosilicatos (arcillas). Aunque trabajamos con rocas, en las primeras fases de su evolución han absorbido gran cantidad de agua y ésta ha quedado retenida en su estructura mineral. Obtenemos una gran información química sobre el contenido de la muestra, como la presencia de materia orgánica, filosilicatos, óxidos, etc.

Durante mi estancia en la Universidad de California, en Los Angeles (UCLA), tuve la fortuna de descubrir que en los asteroides también hubo flujos de agua (1). (Figura 7). Estudiando el grupo CM de las condritas carbonáceas aprendimos que el agua los empapó en algún momento de la historia más temprana de estos objetos, y que alteró los minerales. Esta evidencia es clara. Tenemos un material precipitado, formado por dióxido de silicio, óxido de magnesio y otros minerales precipitados de una disolución acuosa como, por ejemplo: óxidos metálicos, carbonatos, sulfatos, etc....

Hasta ahora nos preguntábamos ¿cómo es posible que los asteroides y cometas hayan traído el agua a la Tierra si el cociente D/H (deuterio/hidrógeno) en su relación con la del agua del mar es diferente a la del agua de los océanos? Pero se acaba de descubrir mediante el Observatorio Espacial Herschel (ESA) que existe al menos un cometa de la familia de Júpiter con

(1). **Trigo-Rodríguez J.M. and A.E. Rubin** (2006) Evidence for parent-body aqueous flow in the MET 01070 CM carbonaceous chondrite. XXXVII LPSC, *Lunar & Planetary Institute*, abstract No. 1104.

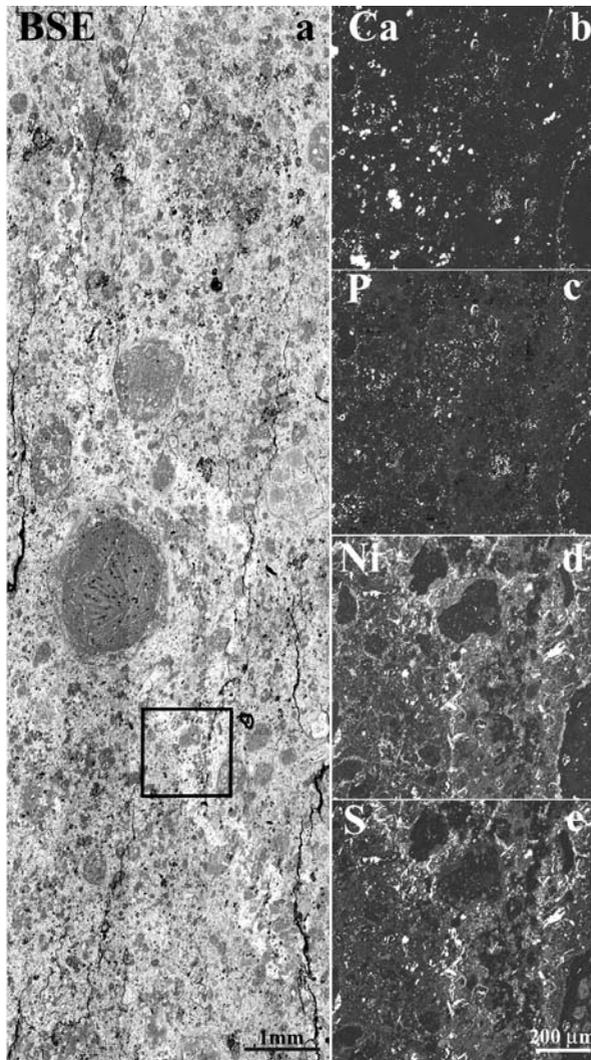


Fig. 7. Lente de minerales precipitados de una disolución acuosa en la que el agua movilizó el contenido en Fe, Ni, P, Ca y de otros elementos cuando empapó el asteroide progenitor de la condrita carbonácea Antártica MET 01070. En la imagen alargada izquierda se muestra vista con microscopio electrónico una de esas venas (técnica BSE), mientras que el pequeño recuadro de 1mm^2 se observa ampliado en las imágenes de la derecha visto con microsonda electrónica de Rayos X (EPMA) que muestra el contenido químico relativo de cada elemento. (*Trigo-Rodríguez & Rubin, 2006*).

una composición parecida denominado 103P/Hartley 2, y es posible que en la región exterior del cinturón principal, que es de donde sospechamos llegaron la mayoría de cuerpos que se dirigieron hacia la Tierra durante el Gran Bombardeo Tardío ocurrido hace 3.900 millones de años, sea donde encontremos objetos cuya composición es químicamente muy similar a la de la Tierra; también en isótopos de deuterio e hidrógeno.

Lo fascinante es que en los primeros tiempos de formación de esos primitivos cuerpos la presencia de agua, metales y filosilicatos pudo participar en la síntesis de compuestos orgánicos complejos al sufrir calentamientos no excesivamente grandes, estimados a partir de patrones mineralógicos sin haber sido superiores a unos cientos de grados centígrados. Ese procesado podría haber sido suficiente como para producir una auténtica química prebiótica ocurrida en momentos tan tempranos en que la misma Tierra aún no estaba presente. Recientemente en un meteorito, una condrita carbonácea CR de la Antártida, de acuerdo con los estudios de Sandra Pizzarello y colaboradores, se ha determinado que tiene abundancia en aminoácidos y bases nitrogenadas en orden de magnitud superior a la del meteorito Murchison, que cuando cayó en Australia en 1969 fue estudiado por científicos de la NASA. Esto nos abre todo un campo astrobiológico fascinante: ¿fueron las raíces de la vida sintetizadas antes que la misma Tierra?

La vida en la Tierra tiene unas peculiaridades. Ciertas moléculas orgánicas tienen propiedades quirales, que pueden ser dextrógiras o levógiras: cuando se miran en un espejo son idénticas, pero no se pueden superponer y llevan a una química completamente diferente de las moléculas esenciales. En la Tierra solo se dan formas levógiras, por ejemplo, en las proteínas o las enzimas. John Cronin y Sandra Pizzarello descubrieron que el meteorito de Murchison y otras condritas carbonáceas poseen excesos enantioméricos en aminoácidos similares a los terrestres, aunque en pequeñas cantidades. De ese modo parece que la química del espacio exterior, la de estos asteroides donde se formaron y caldearon estas moléculas orgánicas, de alguna forma ya tenían la misma firma isotópica, la misma predestinación como la vida que encontramos en la Tierra.

Una pregunta muy clásica es si estos objetos, que sufren colisiones y son lanzados en impactos, cuando entran a la atmósfera terrestre a velocidades de miles de km/s, ¿no sufren? ¿no se degradan? La respuesta es que el frente de choque altera la superficie del meteorito unos pocos cientos

de micras pero el interior llega intacto a la superficie. Esto ocurre, pues los meteoritos poseen una pobre conductividad térmica; la onda de calor no atraviesa el meteorito y por tanto los materiales internos quedan intactos. Podemos considerar que básicamente se mantienen como estaban en el asteroide o en el cometa progenitor.

La Misión Marco Polo-R

La Misión Marco Polo-R es una propuesta formulada a la Agencia Espacial Europea (ESA) y clasificada como de clase media (Barucci et al., 2012). Intervenimos cuatro investigadores españoles: Javier Licandro, del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC-CSIC), Luisa Lara, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), Adriano Campo, de la Universidad de Alicante y yo mismo implicando al Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC, www.ice.cat) y al Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), junto con otros diecisiete investigadores europeos y cinco investigadores americanos. La idea es precisamente estudiar los NEOs de naturaleza carbonácea, fragmentos de asteroides relativamente pequeños que nos pueden dar mucha información sobre las primeras etapas. El objetivo es traer material a la Tierra y obtener datos químicos e isotópicos sobre su estructura en nuestros laboratorios equipados con todos estos nuevos instrumentos basados en nano-ingeniería. Esto nos permitiría profundizar en muchos aspectos de la evolución del Sistema Solar, de la propia galaxia y de las estrellas que había en los alrededores de la Tierra, del origen de la vida... ¡todos aspectos sumamente interesantes como explico en mi nuevo libro «Las raíces cósmicas de la vida»!

Como conclusión y a modo de resumen, decir que el estudio de los asteroides de naturaleza carbonácea debería ser un objetivo astrobiológico prioritario. El objetivo es muestrear materiales primitivos, evitando el sesgo producido por las interferencias en la colisión durante su entrada en la atmósfera. Pensamos que estos meteoritos son claves para entender la vida en la Tierra y merecen todo nuestro esfuerzo.

Aprovecho la ocasión para comunicar que en los días 16 y 17 de enero de 2013 se realizará en Barcelona el *workshop* final de la misión Marco Polo-R que intentará averiguar las implicaciones astrobiológicas y cosmoquímicas que puede tener esa misión de ser finalmente aprobada por la Agencia Espacial Europea; y esperamos que pocas semanas más tarde esta agencia espacial se decante por la misión. Quienes tengan interés en el tema pueden colaborar manifestándose seguidores de la misión, tanto a través de la página oficial

de la misma o de nuestra página en Facebook, a la que les invito a sumarse y a preguntarnos acerca de esa misión. La información del congreso está en: http://www.ice.csic.es/research/Marco_Polo-R_2013/

Bibliografía

- Barucci M.A. et al.** (2012) Marco Polo-R near Earth asteroid sample return mission, *Experimental Astronomy* 33, 645-684.
- Delsemme A.** (2000) 1999 Kuiper Prize lecture: the cometary origin of the biosphere. *Icarus* 146, 313-325.
- Trigo-Rodríguez J.M.** (2012) Las raíces cósmicas de la vida. *Ediciones UAB, Colección El espejo y la lámpara*, Barcelona.
- Yoshino T. et al.** (2003) Core formation in planetesimals triggered by permeable flow. *Nature* 422, 154-157.

Coloquio

Preguntas. ¿El exceso de formas levóginas se dio en el experimento de Stanley Miller? ¿El tema de la quiralidad está resuelto?

Respuesta. Yo no he hablado del experimento de Stanley Miller. Sabemos que los organismos vivos terrestres poseen preferencias quirales. Por ejemplo, sus aminoácidos son levógiros, no dextrógiros. Curiosamente en las condritas carbonáceas que nos están llegando tenemos un pequeño exceso de la forma levógira de los aminoácidos. En ellas hay también formas dextróginas, pero hay un pequeño exceso de formas levóginas. Podría ser una firma del medio interestelar caldeado o irradiado por las estrellas que se formaban, o por algún proceso de alteración acuosa de materiales isotópicamente heterogéneos. El tema de la quiralidad no está resuelto en absoluto; hay nuevas hipótesis que se plantean pero ninguna hasta ahora ha dado una total explicación.

Pregunta. ¿Qué puedes decirnos sobre los impactos meteóricos en la Tierra?

Respuesta. Es un tema que requeriría otra conferencia entera. Sabemos que los impactos fueron fundamentales en la formación inicial de la Tierra y que han sido causa de determinadas extinciones en determinadas épocas. Por ejemplo, el impacto que se dio en el Golfo de México en la frontera K/T del Cretácico-Terciario elevó gran cantidad de material y cenizas a la atmósfera que alteró toda la biosfera durante años: cambió las propiedades de transmisión de la atmósfera y supuso un cambio de era geológica. Provocó la desaparición de muchas variedades vegetales y de grandes especies animales

al romper la cadena trófica, como los dinosaurios. Este tipo de procesos se han dado en diferentes momentos históricos de la evolución de la Tierra. Hay varios libros que les recomiendo y que pueden ayudar a entender este tema: un suplemento de la *Història Natural dels Països Catalans* que he tenido el honor de dirigir, titulado: «La Terra a l'Univers», y dos libros míos, publicados por la Editorial Complutense: «El origen del Sistema Solar» y «Nosotros en el Universo». Muy pronto también verá la luz mi libro «¿Qué sabemos de Meteoritos?» que publica la Editorial Catarata y el CSIC.

Pregunta. Si la producción de la vida es tan fácil, ¿cómo es que es tan difícil de reproducir en laboratorio?

Respuesta. No he dicho que fuera fácil. Como mucho he dicho que este gran bombardeo de objetos que fueron desviados por los planetas gigantes se dio en un tiempo relativamente breve, posiblemente inferior a unos 100 millones de años y comenzando hace unos 3.900 millones de años. Curiosamente las primeras evidencias isotópicas de vida en rocas encontradas en Groenlandia poseen 3.800 millones de años. Eso posiblemente indica que la vida surgió como consecuencia de ese enriquecimiento químico pero pienso que 100 millones de años no es un tiempo breve. Hay dos versiones contrapuestas: hay quien dice que fue un proceso casual muy rápido, pero yo más bien abogaría por ser consecuencia de varias fases de creciente complejidad que requieren cierto tiempo en producirse en las condiciones adecuadas y en un entorno favorable. Precisamente, en mi libro de divulgación: «Las raíces cósmicas de la vida», publicado por la Editorial UAB en 2012, explico todo esto con mucho mayor detalle.

Conferenciante:

Josep M. Trigo

Doctor en astrofísica especializado en el origen de sistemas planetarios y meteoritos. Investigador posdoctoral entre 2003 y 2005 en el Institute of Geophysics & Planetary Physics of the University of California, Los Angeles (UCLA). Actualmente es científico titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en el Institut de Ciències de l'Espai (CSIC-IEEC) (Bellaterra, Barcelona).