

UN XENOLITO DE UN COMETA EN EL INTERIOR DE LA CONDRITA CARBONÁCEA LA PAZ 02342

JOSEP M. TRIGO-RODRÍGUEZ

LAS CONDRITAS CARBONÁCEAS PUEDEN
CONTENER FRAGMENTOS DE OTROS
CUERPOS PRESERVADOS EN SU INTERIOR.
EL ESTUDIO EN EL INSTITUTO DE CIENCIAS
DEL ESPACIO DE LA CONDRITA CARBONÁCEA
LA PAZ 02342, RECUPERADA EN LA
ANTÁRTIDA, HA PERMITIDO DESCUBRIR UN
CLASTO QUE TRAE UN PRECIOSO MENSAJE
SOBRE LA QUÍMICA PRIMIGENIA DEL
ENTORNO EN QUE CONDENSÓ.

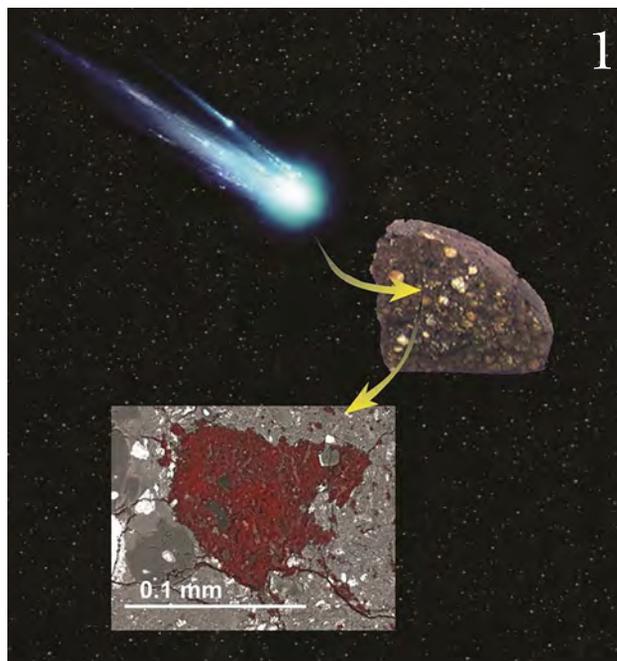
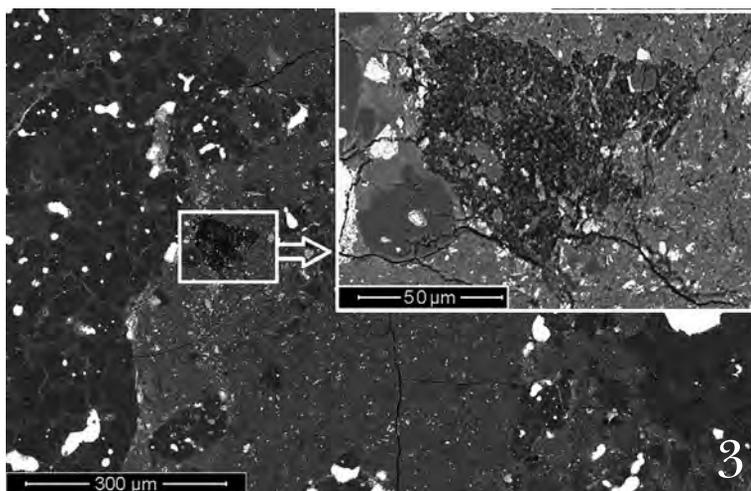
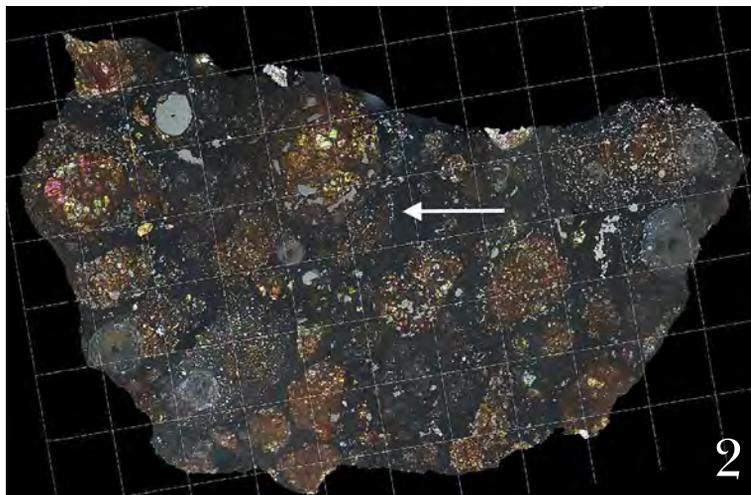


FIGURA 1. Un fragmento de un cometa alojado dentro de La Paz 02342. [L. Nittler/Carnegie Inst.]

Los meteoritos denominados condritas constituyen un legado fósil de la agregación de los materiales que giraban alrededor del Sol hace unos 4565 millones de años. Entre esos meteoritos, las llamadas condritas carbonáceas muestrean regiones primigenias del disco protoplanetario, suficientemente alejadas del Sol como para que también agregasen materia orgánica, hielos y minerales hidratados. Estos primeros cuerpos sólidos agregados se denominan *planetesimales*. De hecho, esos meteoritos con-

driticos que tenemos en nuestros laboratorios se agregaron formando asteroides y cometas suficientemente pequeños para que sus materiales no se fundiesen como sí lo harían los que formaron cuerpos planetarios de varios centenares de kilómetros de diámetro. De estos últimos los mayores exponentes son Vesta y Ceres aunque ambos asteroides también ejemplifican algo sumamente importante: las diferencias iniciales en el cociente de roca:hielo. Si los planetesimales crecen rápidamente

del amasijo de cuerpos rocosos con abundancias significativas de elementos radioactivos como el Al^{26} y el Fe^{60} tendríamos un cuerpo calentado, no solo por los abundantes impactos, sino bien desde dentro, fruto de la desintegración radiactiva de esos componentes. Cuerpos rocosos de cientos de kilómetros de diámetro difícilmente pueden irradiar al espacio ese calor y, por tanto, se sucede la diferenciación, es decir, la segregación química del cuerpo mientras se encuentra fundido.



Para hacer exitosa nuestra exploración del Sistema Solar nos interesan los asteroides ricos en materia orgánica y agua, así como en metales y tierras raras, puesto que son materiales que necesitaremos allá donde vayamos. Tales componentes van a requerir que aprendamos a desarrollar las técnicas de *Utilización de Recursos In Situ* (conocidas por el acrónimo anglosajón: ISRU) a la vez que identifiquemos los materiales primigenios preservados en meteoritos primitivos e inalterados desde su formación. En el Instituto de Ciencias del Espa-

cio, ICE (CSIC-IEEC) llevamos más de una década trabajando en meteoritos únicos pertenecientes a la colección antártica de la NASA para poder indagar en la composición de sus cuerpos progenitores y, de ese modo, descubrir los misterios que albergan. Nuestros estudios recientes corroboran que las condritas carbonáceas fueron capaces de transportar agua de manera muy eficiente en sus matrices y que una parte procedería de cuerpos mucho más alejados que se denominan asteroides transicionales pero que también podrían

ser cometas (Trigo-Rodríguez, 2015). Nuestra motivación científica persigue, de hecho, responder grandes preguntas sobre la llegada de esos materiales a la Tierra y la posibilidad de que hayan sido capaces de transportar materia orgánica y agua de manera eficiente (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2019).

Entre todas las preguntas que nos planteamos podríamos sintetizar aquí tres que hemos podido responder en la investigación que describo en este artículo: ¿pueden los estudios de los meteoritos condriticos aportarnos información de estadios todavía más pretéritos en la formación de nuestro sistema planetario? ¿Pueden esas condritas contener materiales de cuerpos más frágiles que ni tan siquiera soñamos encontrar en nuestras colecciones? ¿Pueden esas condritas proporcionarnos pistas de cómo el agua llegó a nuestro planeta?

BUSCANDO LAS CLAVES DEL TRANSPORTE DE AGUA A LA TIERRA

Especializado en los procesos de formación de esos objetos primitivos en base al estudio de las condritas carbonáceas, nuestro grupo de investigación es pionero en la identificación de minerales hidratados. El análisis con moderna instrumentación de tales minerales de alteración acuosa nos permite reconstruir las primeras fases de hidratación que sufrieron los asteroides tras su agregación. Los estudios de datación de los carbonatos nacidos en las matrices de las condritas carbonáceas revelan que algunos asteroides carbonáceos estuvieron alterados por agua

durante los primeros diez millones de años tras su formación. A pesar de lo que pudiésemos pensar, esa alteración no fue en todos los casos extensiva y homogénea, sino que dependió de la peculiar agregación de hielos o fases hidratadas a escala micro y nanométrica (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2019).

En 2012, mientras estudiábamos una de las condritas carbonáceas llegadas a nuestra Sala Blanca de Meteorítica del ICE desde la colección antártica de la NASA, descubrimos en ella algo realmente inusual: un pequeño fragmento extraordinariamente rico en materia orgánica, técnicamente llamado clasto o xenolito, que despertó nuestra atención. Ese fascinante meteorito, denominado La Paz 02342, pertenece a un grupo de condritas carbonáceas de gran relevancia y que constituyen un legado fósil de la creación de los primeros asteroides, denominados genéricamente planetesimales. No imaginábamos entonces que nuestro descubrimiento demostraría que en su interior también son capaces de preservar muestras únicas de otros objetos mucho más ricos en materia orgánica y volátiles, conocidos como cometas.

Ese clasto cometario al que me refiero posee un tamaño de unas cien micras y se encuentra encasado en la matriz de la condrita carbonácea La Paz 02342. Está compuesto por una mezcla anómala de materiales orgánicos, silicatos amorfos y cristalinos, sulfatos de sodio, sulfuros y granos presolares, estos últimos siendo condensados de estrellas que enriquecieron los materiales primitivos de nuestro Sistema Solar.

La búsqueda que estamos realizando desde el CSIC de los meteoritos más primitivos e inalterados que conocemos hayan llegado a la Tierra puede realizarse en el ICE dado que es el único centro en el estado español repositorio internacional de meteoritos antárticos. Estas muestras únicas llegan, bajo petición previa, desde el *Johnson Space Center* de la NASA para su estudio en Barcelona. De ese modo los investigadores tenemos acceso a muestras únicas, pudiendo seleccionar aquellas que no han sufrido metamorfismo térmico ni alteración acuosa extrema. El asteroide progenitor de esta condrita carbonácea sufrió alteración acuosa pero afortunadamente no fue extensiva ni homogénea, lo que hizo que se preservasen las propiedades únicas de este clasto cometario, entre ellas su riqueza en diminutos granos minerales formados en estrellas del entorno en el que nació el Sol. Nuestro estudio concluye que este diminuto fragmento incorporó no solo hielos sino materiales procedentes del medio interestelar.

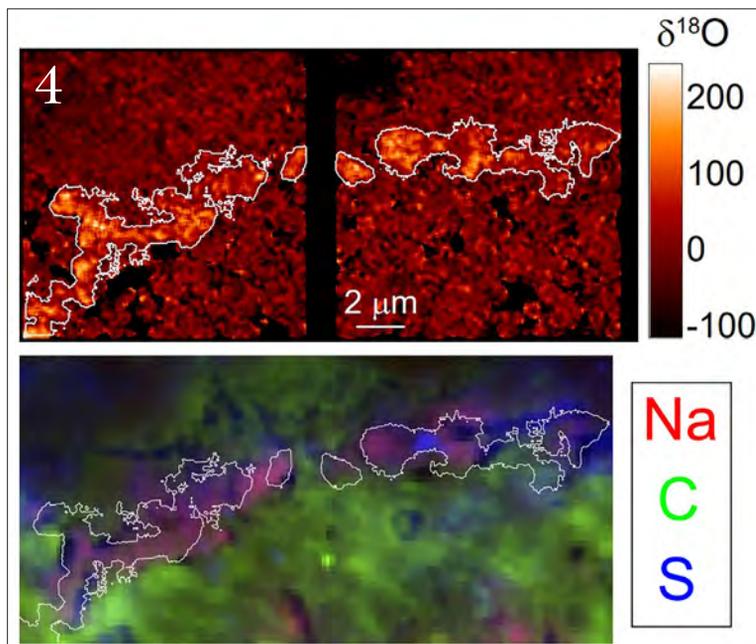
Cabe enfatizar y agradecer que la caracterización del estudio del clasto cometario pudo completarse en gran profundidad en la *Carnegie Institution of Washington* y otros centros norteamericanos en donde se empleó instrumentación inexistente en España para este tipo de estudios, particularmente un espectrómetro de masas de iones secundarios (nano-SIMS) que permite el sondeo electrónico de la muestra tanto a nivel isotópico como de análisis de elementos traza a escala nanométrica (Nittler *et al.*, 2019; Burgess *et al.*, 2021). Preci-

FIGURA 2. La lámina del meteorito en donde se marca el lugar exacto donde se incorporó el clasto cometario dentro del meteorito. [C. E. Moyano-Cambero *et al.*/Carnegie Inst./CSIC-IEEC]

FIGURA 3. Imagen de microscopio electrónico de la zona de la condrita carbonácea La Paz 02342 que contiene el xenolito cometario y, en la parte superior derecha, se muestra ampliado. [CSIC-IEEC/Carnegie Inst.]

samente ese estudio detallado ha revelado que un cúmulo de afortunadas circunstancias permitió que se preservase ese único clasto cometario en el interior de esta condrita carbonácea.

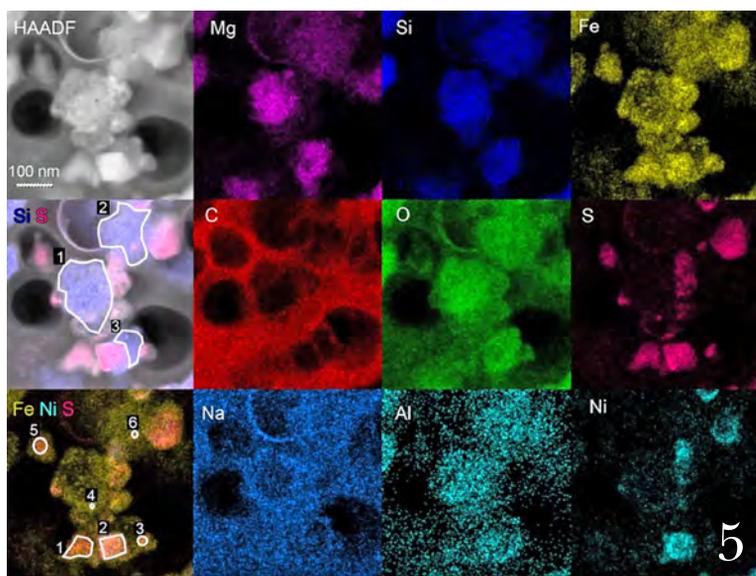
Además de identificar ese fragmento cometario en el interior de un meteorito, también encontramos otros detalles que evidenciaban que esa condrita carbonácea incorporó materiales del disco protoplanetario embebidos en hielos (Figura 4). Entre ellos debieron estar elementos moderadamente volátiles como sospechábamos con el sodio (Na) (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2004). Los materiales anómalos en oxígeno (O) son, de hecho, ricos en sodio (Na) y azufre (S), como también revelaron los datos de microscopía electrónica de transmisión de barrido (STEM) que proporcionan nuevas claves sobre la formación del xenolito. En la Figura 5 vemos imágenes de rayos X de los denominados GEMS (acrónimo de *Glass with Embedded Metals and Sulfides*), sulfuros y la materia orgánica (OM) en la sección pobre en ^{16}O identificada en el xenolito. Esos GEMS parecen apuntar a que el clasto fue también sujeto a los rayos cósmicos en su tránsito final. Nótese que los mapas elementales, particularmente los de hierro (Fe) y azufre (S),



cometas y objetos transneptunianos. Por tanto, este xenolito representa un bloque de construcción primordial de cuerpos helados ricos en carbono. En ese sentido, la Figura 6 nos explica más cosas sobre la materia orgánica contenida en él empleando la técnica de espectroscopia de absorción de rayos X cerca del borde (XANES). En esa figura podemos comprobar que el xenolito es más homogéneo isotópicamente en hidrógeno y nitrógeno, aunque posee puntos ricos en deuterio (D) y ^{15}N que suelen ser anomalías típicas del medio interestelar. En la Figura 6d vemos los espectros C-XANES de OM en secciones de la matriz La Paz 02342 y el CRC.

Las líneas azules verticales indican absorciones debidas al carbono aromático (de izquierda a derecha), grupos funcionales cetonas y grupos funcionales carboxilo. La sección desde cerca del borde del CRC muestra una distribución intermedia de grupos funcionales.

Que el cociente D/H sea bajo en la materia orgánica del clasto en comparación con la de las condritas carbonáceas CR y ciertos micrometeoritos ultracarbonáceos y partículas de polvo interplanetario parece sugerirnos un cambio temporal en la composición de la materia orgánica en el Sistema Solar exterior. Mientras el material presolar o de formación temprana fue más rico en deuterio (D), aquel que se formó más lentamente y bajo el fotoprocesamiento UV de precursores orgánicos, acabó siendo menos anómalo. Si estamos en lo cierto y tal evolución temporal en D/H cometario existe, no sería sorprendente que los ma-



confirman que los granos de alto número atómico visibles dentro del GEMS central son, de hecho, diminutos granos de metal y sulfuro. El sodio (Na) parece estar asociado con el carbono (C) y el oxígeno (O) en la superficie del grano GEMS central y, por tanto, no incorporado al interior. Estamos frente a un material alta-

mente desequilibrado por lo que ha preservado incluso esas peculiaridades isotópicas. Así pues, estos resultados demuestran que el xenolito procede de aquellos materiales disponibles en el disco exterior y en un momento temprano en donde quizás se formasen los cometas que darían lugar a los

teriales cometarios muestreados por las condritas CR sean menos anómalos, ya que estos meteoritos tienen las edades de acreción más jóvenes. La presencia del xenolito en La Paz 02342 indica que el transporte hacia el interior también afectó las últimas etapas de la acreción de los planetesimales y, por tanto, proporciona nueva evidencia para una conexión entre cometas y asteroides carbonáceos (Figura 7).

Así pues, este descubrimiento demuestra que los asteroides carbonáceos formados en las regiones externas también incorporaron materiales de cuerpos mucho más alejados y nuestro estudio abre una nueva vía de exploración con las técnicas más avanzadas. En cierto modo podríamos decir que las propiedades y la composición única de este diminuto clasto cometario nos brinda un mensaje en una botella. Nos facilitan información única sobre la anómala composición de una zona alejada del disco protoplanetario en la que condensaron los primeros cometas. De hecho, ese tipo de materiales sospechamos que formaron los llamados objetos transneptunianos.

IMPLICACIONES PARA LA EXPLORACIÓN FUTURA DE COMETAS Y OBJETOS TRANSNEPTUNIANOS

Existe un interés creciente por parte de diversas agencias espaciales en el estudio de los llamados objetos transneptunianos. Futuras misiones de exploración y retorno de materiales desde esos lejanos cuerpos, como la que acabamos de proponer al asteroide Ceres, aportarían pistas muy valiosas sobre las etapas for-

mativas de nuestro sistema planetario. De hecho, los materiales formativos de estos objetos no suelen sobrevivir los tránsitos de millones de años que los transportan hasta la órbita terrestre y, si lo hacen, se fragmentan y volatilizan en su entrada a la atmósfera a velocidades hipersónicas. Precisamente por ello materiales ultracarbonáceos como el descubierto son sumamente raros y solo se han podido identificar hasta la fecha en forma de micrometeoritos, no siempre tan bien preservados como en La Paz 02342. El descubrimiento ahora presentado proporciona nuevas pistas sobre los frágiles materiales que forman este tipo de objetos y que surgirían de un medio enriquecido en ciertos elementos volátiles que probablemente fueron barridos del interior del disco protoplanetario por el intenso viento estelar, como es el caso del sodio y el azufre (Trigo-Rodríguez y Blum, 2021). Habrá que prestar atención futura a la fina estructura de la matriz que compacta los cometas, dado que posee una enorme capacidad para retener fases volátiles y materia orgánica presentes en sus regiones de agregación.

Por otro lado, y no menos relevante, la presencia de un fragmento de un cometa en el interior de un meteorito de origen asteroidal permite obtener pistas sobre el proceso de fragmentación y acreción de esos materiales cometarios en el interior de asteroides condriticos, de los que proceden las condritas carbonáceas más primitivas que disponemos en nuestros laboratorios. Cabe redoblar nuestros esfuerzos en el estudio de estos

FIGURA 4. Evidencia de la incorporación de hielo a la parte externa del clasto antes de incorporarse al meteorito. Ese hielo poseía un contenido isotópico pobre en ^{16}O . Por ello arriba se muestra que el borde del clasto en su límite con la matriz presenta granos anómalos ricos en ^{18}O (o sea, pobres en ^{16}O). Fijémonos en el mapa de color compuesto mediante espectrometría de rayos X usando un microscopio electrónico (SEM-EDS). Rojo, sodio; verde, carbono; azul, azufre. (CSIC-IEEC/Carnegie Inst.)

FIGURA 5. Imágenes de rayos X (EDX) de los denominados GEMS (acrónimo de *Glass with Embedded Metals and Sulfides*), sulfuros y la materia orgánica (OM) en la sección pobre en ^{16}O identificada en el xenolito. Para más detalles véase el texto. (Nittler *et al.*, 2019)

materiales a nanoescala para ser capaces de descubrir estos materiales llegados desde los más remotos confines del Sistema Solar y, al mismo tiempo, estar preparados para analizar en nuestras salas blancas los materiales llegados desde futuras misiones de retorno de muestras.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto de investigación en el marco del cual seguimos investigando el xenolito es PGC2018 097374-B-I00, financiado por FEDER/Ministerio de Ciencia e Innovación-Agencia Estatal de Investigación. El descubrimiento y sus estudios iniciales tuvieron lugar en el marco de dos proyectos del Plan Nacional de Astronomía y Astrofísica AYA2011-26522 y AYA2015-67175-P (P.I. JMTR) que estuvieron centrados en el estudio de materiales primitivos preservados en meteoritos. Finalmente, mi mayor agradecimiento a Larry Nittler y Rhonda Stroud por su enorme trabajo en la Carnegie Institution sobre este xenolito, todavía inacabado. (A)

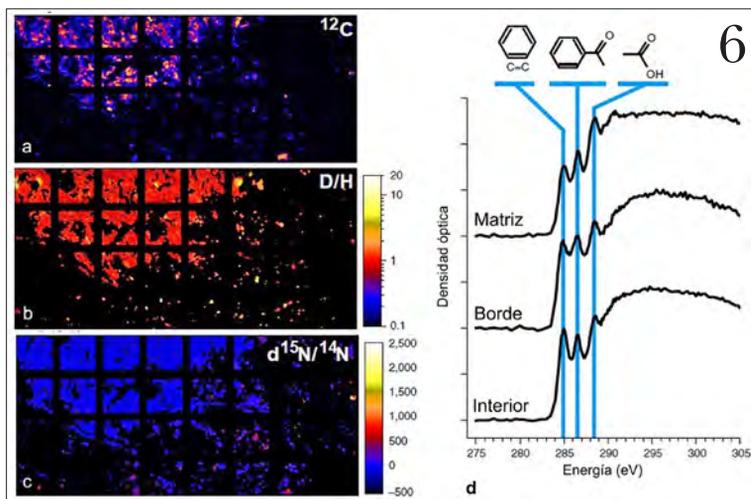


FIGURA 6. Mapas de química isotópica y de grupos funcionales de la materia orgánica contenida en el xenolito de La Paz 02342. Las figuras de la izquierda [a–c] son mosaicos de imágenes obtenidas mediante NanoSIMS a) para el isótopo ^{12}C , b) para el cociente deuterio-hidrógeno [D/H] (escala de color logarítmica) y c) para $\delta^{15}\text{N}$, normalizados a los valores terrestres. En d) se comparan los valores del clasto (borde e interior) con los de la matriz del meteorito. (Nittler *et al.*, 2019)

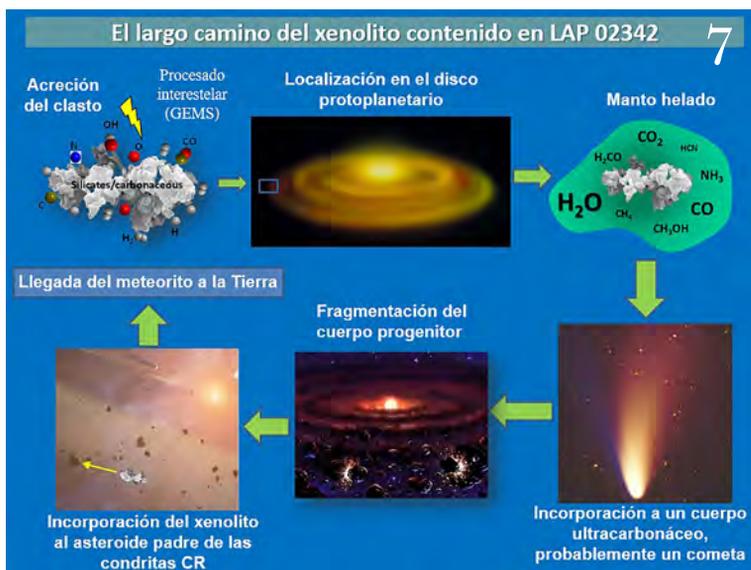


FIGURA 7. Diagrama esquemático de los principales sucesos acaecidos sobre el xenolito llegado en el interior de la condrita carbonácea La Paz 02342. Léase en el sentido de las agujas del reloj siguiendo las flechas hasta su llegada a la Tierra. (Cortesía del autor)

BIBLIOGRAFÍA

- Burgess, K., Stroud, R., Nittler, L. y Trigo-Rodríguez, J. M. (2021). «Record of Alteration by Heavy Ices in a Cometary Clast in a Primitive Meteorite», *Microsc. Microanal.* 27 (Suppl. 1), article ID 2268, doi:10.1017/S1431927621008175
- L. R. Nittler, R. M. Stroud, J. M. Trigo-Rodríguez, B. T. De Gregorio, C. M. O'D. Alexander, J. Davidson, C. E. Moyano-Camero y S. Tanbakouei (2019). «A cometary building block in a primitive asteroidal meteorite», *Nature Astronomy*, doi:10.1038/s41550-019-0737-8.
- Shi, X. *et al.* [incluyendo Trigo-Rodríguez, J. M.] (2021). «GAUSS (Genesis of Asteroids and Evolution of the Solar System)-A Sample Return Mission to Ceres», *Experimental Astronomy*, doi:10.1007/s10686-021-09800-1.
- Trigo-Rodríguez, J. M. (2015). «Aqueous alteration in chondritic asteroids and comets from the study of carbonaceous chondri-

tes», en «Planetary Mineralogy», *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, Vol. 15, pp. 67-87.

—Trigo-Rodríguez, J. M., J. Llorca y J. Fabregat (2004). «Chemical abundances determined from meteor spectra: II. Evidence for enlarged sodium abundances in meteoroids», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 348, pp. 802-810.

—Trigo-Rodríguez, J. M. y J. Blum (2021). «Learning about comets from the study of mass distributions and fluxes of meteoroid streams», *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, doi:10.1093/mnras/stab2827.

—Trigo-Rodríguez, J. M., Rimola, A., Tanbakouei, S., Cabedo-Soto, V. y Lee, M. R. (2019). «Accretion of water in carbonaceous chondrites: current evidence and implications for the delivery of water to early Earth», *Space Science Reviews* 215:18.

Josep Maria Trigo-Rodríguez, Grupo de Meteoritos, Cuerpos Menores y Ciencias Planetarias, Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC). Contacto: trigo@ice.csic.es.