

LA MISIÓN

CLAVES SOBRE EL ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR



La sonda Stardust de la NASA recuperó mediante un ingenioso sistema las primeras muestras sólidas de un objeto del Sistema Solar diferente a la Luna. El extraordinario interés científico de esos primitivos materiales desprendidos del cometa 81P/Wild 2 hizo, especialmente para aquellos que integramos el Preliminary Examination Team, que viviésemos una intensa aventura científica. Como fruto de un año de esfuerzo los primeros resultados, publicados en la prestigiosa revista Science, ya han ahondado en nuestro conocimiento sobre la formación del Sistema Solar. Este artículo presenta a nivel divulgativo algunas de las claves obtenidas sobre el origen de los cometas y sus implicaciones inmediatas en las primeras fases iniciales del Sol y de formación de los planetas.

STARDUST: UNA MISIÓN ÚNICA Y FRUCTÍFERA

Acostumbrados ya a misiones de estudio remoto de los planetas, sus satélites y de los cuerpos menores del Sistema Solar, la gestación y el diseño de la misión *Stardust* (ver *Astronomía* n° 57, mar. 04, pág. 88 y n° 79, ene. 06, pág. 95) constituye de por sí un gran hito que transcurre paralelo al desarrollo de varios campos del saber. Esta misión suponía tal reto científico y tecnológico que hubiera sido prácticamente inviable hace apenas un par de décadas. Esta afirmación no es gratuita pues radica en que ese breve periodo de tiempo han tenido lugar avances extraordinarios en el

control de navegación y el diseño de las sondas interplanetarias, pero también en el creciente desarrollo tecnológico de materiales resistentes pero livianos y, muy especialmente, de los llamados aerogeles o espumas de vidrio. Precisamente, estos materiales de gran porosidad y pureza con grandes aplicaciones industriales permitirían a la postre la recuperación de fragmentos de las partículas desprendidas del cometa 81P/Wild 2, a pesar de que incidieron sobre el aerogel colector de la sonda *Stardust* a unos 6,1 km/s (unos 22.000 km/hora). Tal y como demuestran los experimentos de laboratorio a esas velocidades, otros materiales de captura más densos hubieran hecho

El Dr. Josep M. Trigo es astrofísico e investiga en el Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC) y el Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, ambos en Barcelona. Para contactar: trigo@ieec.uab.es.

STARDUST:

OLAR CONTENIDAS EN EL COMETA 81P/WILD 2

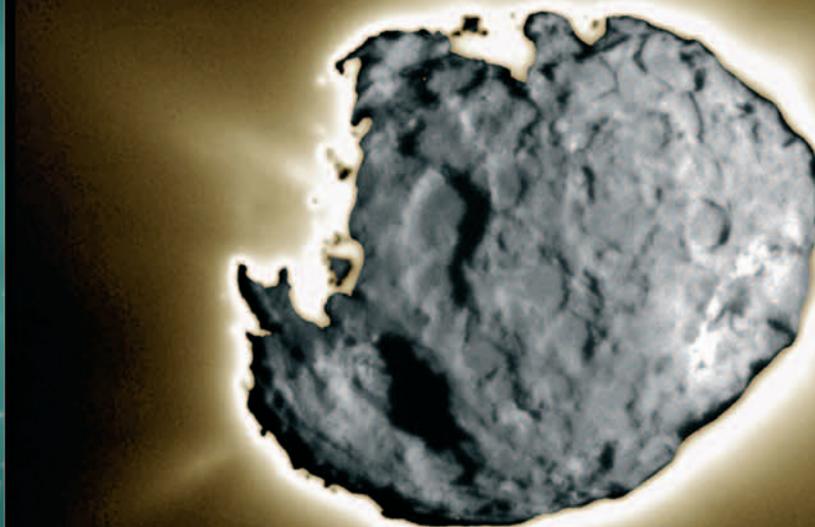


Figura 1. A la izquierda, impresión artística de la sonda Stardust atravesando la coma del cometa 81P/Wild 2. A la derecha, imagen del núcleo del cometa tomada por la Stardust mostrando sus chorros de gas y partículas. (Stardust/NASA)

JOSEP M. TRIGO I RODRÍGUEZ

inviabile la recuperación de materiales tan frágiles, si bien ciertos residuos pueden recuperarse alrededor de los cráteres que formarían en el impacto.

La navegación de la sonda a través de la coma del cometa fue magistral y permitió a la nave acercarse a tan sólo 234 kilómetros de la superficie del cometa 81P/Wild 2, en una particular geometría capaz de un encuentro con las partículas a una velocidad relativa muy baja en términos interplanetarios (Figura 1). A esa distancia, partículas desprendidas del cometa pocas horas antes incidieron sobre el colector en forma de panal en cuyas celdas se alojan los bloques de aerogel (Figura 2) donde se recuperan las partículas. También han podido estudiarse impactos en las láminas de aluminio situadas entre las celdas del aerogel. Durante su tránsito a través de la coma no hubo ningún incidente por impacto destacable, como fue el caso de la colisión que sufrió la sonda *Giotto* al sobrevolar el cometa 1P/Halley en 1986. En aquella ocasión tal impacto cambió en casi un grado el vector momento angular de la sonda *Giotto*, produciendo un desajuste en la orientación de la antena

para transmitir datos a la Tierra poniendo en peligro toda la misión. Esto ocurrió pues la velocidad relativa en aquella ocasión fue de 14 km/s, lo que equivale a una energía de impacto más de cinco veces superior a la que una partícula del cometa 81P/Wild 2 podría haber producido sobre la sonda *Stardust*. De hecho, la distribución de masas de las partículas de ambos cometas se mostró muy similar (Hörz *et al.*, 2006). La guinda a la magnífica navegación interplanetaria de la sonda estuvo unida, sin duda, a la fortuna de que la deceleración hidrodinámica de la cápsula de retorno en la atmósfera de la Tierra (produciendo un fantástico bólido artificial, Figura 3) y el posterior sistema de frenado y captura funcionase a la perfección. Todo ello hace que podamos decir que *Stardust* se ha convertido en una de las misiones más redondas y fructíferas concebidas por la NASA hasta la fecha. Especialmente aquellos que vivimos en directo desde el Jet Propulsion Laboratory pocos meses antes del retorno de *Stardust* la decepción de asistir al impacto de la sonda *Genesis* contra la arena del desierto de Utah conocemos que no siempre las cosas salen tan

Figura 2. Arriba, el sistema colector de las partículas en forma de panel de abejas pocos minutos antes de comenzar la extracción de las celdas seleccionadas. Abajo, una de las celdas de aerogel (SiO_2), liviana pero enormemente consistente, lo suficiente para sostener un ladrillo. (Stardust/NASA)



bien. También una suerte adversa finalizando en un terrible «catapún» siguieron, por uno u otro motivo, algunos ingenios enviados a Marte.

Con los cientos de miles de asteroides y cometas que pueblan el Sistema Solar quizás nos preguntemos: ¿qué tiene de especial el cometa 81P/Wild 2 para que fuese seleccionado objetivo científico de la misión? La respuesta la tiene una carambola cósmica de esas que a veces pueden poner en una órbita de colisión con la Tierra a uno de estos cuerpos menores que hasta entonces no nos había preocupado. Sabemos que el cometa 81P/Wild 2 había permanecido en una órbita relativamente estable más allá de Neptuno (en una región llamada el Cinturón de Kuiper) hasta que el 10 de septiembre de 1974 un encuentro con Júpiter, el planeta gigante gravitatoriamente más influyente dada su mayor masa, hiciese que acortase su órbita

para pasar a formar parte de los cometas de la familia de Júpiter. En las últimas décadas el creciente desarrollo de técnicas computacionales, capaces de modelar las perturbaciones gravitatorias que los planetas inducen a los cuerpos menores, nos ha permitido conocer que el tránsito de cometas en ambas direcciones (hacia dentro y fuera del Sistema Solar) permite explicar la existencia de cometas de periodo corto. Resulta si no difícil de explicar la existencia de cometas en órbitas demasiado próximas al Sol donde son condenados a perder

progresivamente sus compuestos volátiles debido al calentamiento solar.

Pero sin duda, la principal razón de estudiar un cometa como el 81P/Wild 2 es el firme convencimiento de la comunidad científica de que algunos de estos objetos que han permanecido «hibernados» en regiones alejadas del Sol albergan prácticamente inalterados los materiales primigenios de los que se formarían los primeros bloques constitutivos de los planetas. Estos primeros «ladrillos» fueron objetos nacidos de la agregación de los diminutos granos minerales condensados alrededor del Sol cuando descendió la temperatura de la nebulosa solar o bien procedentes de estrellas cercanas (denominados granos presolares). Este polvo diminuto con tamaños típicos de pocas micras (una milésima de milímetro) tendería a agregarse para dar lugar a cuerpos desde unos pocos metros hasta unos pocos kilómetros de diámetro. Esas primeras etapas en la formación del Sistema Solar las podemos contemplar alrededor de algunas estrellas que presentan discos protoplanetarios en los que tiene lugar en la actualidad ese progresivo crecimiento culminado en la formación de los planetas.

Por si fuera poco, posiblemente la mayoría de los cometas (dependiendo, claro está, de su particular historia de aproximaciones cercanas al astro rey) del Cinturón de Kuiper y de la Nube de Öort son objetos muy primitivos pues poseen diámetros suficientemente pequeños para que en la mayoría de casos no hayan sufrido ni diferenciación química ni metamorfismo apreciable (como les ha ocurrido a asteroides de cientos de kilómetros o a los propios planetas). También, a pesar de haber retenido isótopos radioactivos contenidos en estos minerales incorporados a su estructura altamente porosa, las temperaturas como consecuencia de la desintegración radiactiva parecen haberse mantenido suficientemente bajas para

que, la importante cantidad de hielo de agua contenido no pasase a fase líquida, manteniendo sus finos componentes minerales libres de alteración acuosa (Brownlee *et al.*, 2006) que es común en las condritas carbonáceas (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2006).

El cometa 81P/Wild 2 posee unos 4,5 kilómetros de diámetro y está compuesto mayoritariamente por una mezcla de hielos (principalmente de agua), materia orgánica y granos minerales principalmente en forma de polvo fino (Brownlee *et al.*, 2006). Cuando, tras su encuentro con Júpiter, este cometa pasó a ocupar una órbita más próxima al Sol, la mayor irradiación repercutió en una mayor temperatura superficial que indujo la creciente sublimación del hielo de agua. Este proceso promueve la emisión de gas que a su vez impulsa las partículas de polvo retenidas en su estructura porosa. Este eficiente mecanismo ya descrito por el pionero Fred L. Whipple actúa reduciendo la masa del cometa en varias toneladas por segundo, aunque la fracción de gas, materia orgánica y polvo emitido varía de un cometa a otro. Las cortinas de partículas que son desprendidas pasan a girar alrededor del Sol en órbitas similares al cometa progenitor, produciendo en su encuentro con la Tierra las llamadas lluvias de meteoros. Dadas las pequeñas dimensiones de los cometas (desde cientos de metros hasta pocas decenas de kilómetros) vistos desde la Tierra pasarían desapercibidos sino fuese por el desarrollo de la coma y las colas, consecuencia de los procesos inducidos por la radiación solar al incidir sobre las partículas desprendidas como consecuencia de la sublimación de sus hielos. Las envolturas difusas que rodean los cometas constituyen la manifestación evidente de que tales procesos de pérdida de masa actúan eficientemente en los cometas que osan aproximarse demasiado al astro rey. Dada la enorme pérdida de compuestos volátiles que sufren aquellos cometas que permanecen en órbitas próximas al Sol, estos cuerpos disminuyen su actividad y con el tiempo se transforman en oscuros objetos que fotométricamente tienen un comportamiento similar a los asteroides. Su bajo albedo y sus pequeñas dimensiones hacen que sea muchas veces complicado descubrirlos, excepto en cerradas aproximaciones a la Tierra.

LA FÍSICA DE LA CAPTURA: EL ESTUDIO DE LAS TRAZAS DEJADAS EN EL AEROGEL

Una vez recuperada el 15 de enero de 2006, la cápsula de retorno fue llevada en condiciones estancas a un laboratorio con una sala de limpieza extrema situada en el Johnson Space Center en donde poco después sería abierta para evitar cualquier tipo de contaminación terrestre, por mínima que fuese (Figura 4). De manera adicional, la deceleración de las partículas cometarias en el aerogel proporciona de por sí un sistema estanco de recolección de las partículas del cometa dado que la fusión del dióxido de silicio asociada a la onda de choque producida por la de-

celeración de las partículas hace que la mayoría de los materiales queden retenidos en el aerogel.

Dada mi especialización en el estudio de la ablación de partículas cometarias en la atmósfera de la Tierra (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2003), una de mis mayores aportaciones al análisis de *Stardust* ha sido precisamente el estudio e interpretación de las trazas dejadas por las partículas en el aerogel para de este modo entender hasta que punto las partículas recuperadas son representativas de los materiales incidentes. También hemos deducido de estos estudios la masa y densidad típica de las partículas, a la vez que todavía estamos trabajando en la física de la ablación en el aerogel. Ha sido especialmente fascinante poder estudiar la composición química de las partículas y de los restos de ablación, «fossilizados» en las paredes de las trazas excavadas por las partículas en el aerogel. De hecho, estamos estudiando por vez primera algunos de los procesos físicos a escala microscópica que tienen lugar durante la deceleración de las partículas en el aerogel, en una forma similar a como ocurre en la atmósfera terrestre. Precisamente la consistencia de partículas cometarias, al ser agregados de granos minerales similares a las Partículas de Polvo Interplanetario (usualmente conocidas por el acrónimo inglés IDP, Figura 5), es muy baja por lo que la mayoría de ellas se fragmentan en la atmósfera terrestre a presiones dinámicas de tan sólo unos 10 kilo Pascales (kPa) (Trigo-Rodríguez y Llorca, 2006). Este punto es importante pues, dada la rápida fragmentación tras



Figura 3. Arriba, el bólido artificial producido por la deceleración en la atmósfera terrestre durante la reentrada de la cápsula de retorno. (Stardust/NASA). Abajo, en una sala limpia temporal los científicos a punto de abrir la cápsula recién recuperada. (NASA TV)



Figura 4. La sala de limpieza extrema del Johnson Space Center en donde se realizaron las labores de extracción del aerogel contenido en el colector. (JSC/NASA)

alcanzar el aerogel, los granos minerales de pocas micras recuperados al final de las trazas no son sino fragmentos de agregados mucho mayores. Durante la deceleración de las partículas ha tenido lugar la volatilización de aquellas fases más volátiles tales como por ejemplo materia orgánica o el posible hielo que hubiesen podido albergar las partículas de mayor tamaño, dada su rápida recolección tras abandonar el cometa sin tiempo a ser sublimado por la radiación solar.

Se ha podido comprobar que existen tres diferentes tipos de «trazas de deceleración» dejadas por las partículas hasta el definitivo frenado de los materiales (Figura 6). Algunas partículas, presumiblemente formadas por granos minerales sólidos de bastante tamaño, suelen producir las trazas de Tipo A, bastante características por su forma de zanahoria. Sin embargo, sobre el aerogel incidieron agregados mucho más frágiles y posiblemente formados por materiales muy finos que producen en la parte superior de sus trayectorias significativos abultamientos que sólo se reproducen en experimentos de laboratorio haciendo colisionar filosilicatos (es decir, silicatos hidratados). La súbita volatilización de compuestos de bajo punto de fusión o de materiales muy finos podría ser el mecanismo capaz de excavar esos bulbos (Hörz *et al.*, 2006). Y, finalmente, nos encontramos con las trazas de Tipo C que son prácticamente bulbos carentes de partículas supervivientes que sugieren materiales volatilizados muy rápidamente.

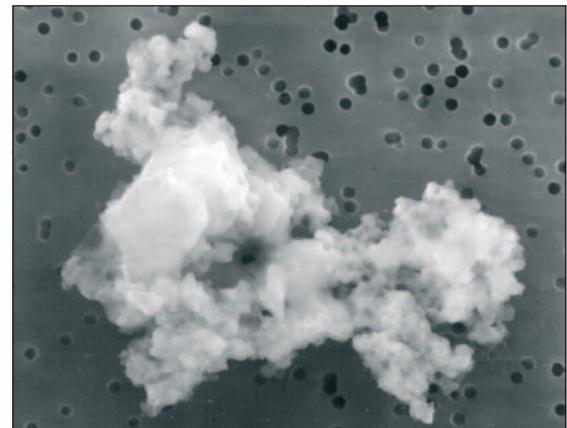
Figura 5. Esta Partícula de Polvo Interplanetario (conocidas por el acrónimo inglés IDP) apenas mide 10 micras de largo. Estructuras porosas y frágiles similares a esta fueron las que tuvieron las partículas que incidieron sobre el colector de Stardust. Ésta en particular fue recuperada en la atmósfera superior de la Tierra pero su cuerpo progenitor es desconocido. (NASA)

CLAVES CIERTAS REVELADAS POR STARDUST

Del estudio de las muestras recogidas en el aerogel de la sonda se ha podido llegar a la conclusión que los diminutos materiales que forman este cometa son los mismos que estaban girando alrededor del Sol hace 4.570 millones de años. Quizás ha resultado sorpren-

dente descubrir que los materiales en sí no son muy diferentes de aquellos que forman unos meteoritos muy primitivos que son capaces de llegar a la superficie de la Tierra. Me estoy refiriendo a las fascinantes condritas carbonáceas, restos rocosos de asteroides de pequeñas dimensiones (unas pocas decenas de kilómetros de diámetro) que, precisamente debido a su pequeño tamaño, han evitado el metamorfismo y diferenciación química ocurrido en asteroides de mayores dimensiones. Algunas de estas condritas carbonáceas han sido capaces de retener hasta un 10 % de agua (en masa) y un 4 % en materia orgánica, aunque a diferencia del cometa 81P/Wild 2, deben haber sufrido importantes procesos de compactación debido a colisiones con otros objetos. La compactación y el calentamiento desprendido por las ondas de choque en esas colisiones precisamente pudieron ser el origen de que estos meteoritos hayan sufrido extensivos procesos de alteración acuosa (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2006). Ese tema fue mi principal línea de investigación en el campo de los meteoritos primitivos durante mis más de dos años de estancia en el Instituto de Geofísica y Física Planetaria (IGPP) de la Universidad de California Los Angeles (UCLA) en el que pude comprobar que la mayoría de estos objetos poseen fases minerales hidratadas (Figura 7). Como ya he mencionado, una gran sorpresa ha sido para muchos investigadores que los granos minerales recuperados del cometa 81P/Wild 2 no evidenciasen ningún tipo de hidratación, posiblemente sugiriendo que el hielo de agua nunca llegó a empapar estos materiales como si ocurrió en la mayoría de condritas carbonáceas (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2006).

Otro resultado fascinante de la misión ha sido poder encontrar minerales formados a altas temperaturas como por ejemplo fosterita (Mg_2SiO_4), enstatita ($MgSiO_3$) e incluso inclusiones de Ca y Al (denominadas CAI) entre los granos recuperados. Estas inclusiones refractarias se debieron formar muy cerca del Sol en una etapa especialmente violenta, en plena juventud de nuestra estrella caracterizada por una masiva emisión de luz, vientos estelares de rayos X, e importante pérdida de masa en forma de intensa radiación penetrante. Esta fase se denomina T-Tauri al haber sido observada por vez primera en la estrella



del mismo nombre de la constelación de Tauro. Por tanto, para que estos materiales de alta temperatura, sintetizados en las regiones de la nebulosa solar más próximas al Sol, fuesen incorporados en este cometa formado más allá de Neptuno ha sido necesario un transporte de material importante de dentro hacia fuera que debe explicarse a través de un continuo flujo de materiales a través de regiones turbulentas. Vamos a continuar aprendiendo de lo mucho que estos materiales cometarios pueden decirnos de estas primeras etapas evolutivas del Sistema Solar. Estos resultados cambian por completo las ideas preconcebidas de que los materiales contenidos en los cometas se habían formado a grandes distancias del Sol. Los resultados de *Stardust* indican sin ninguna duda que los intensos vientos estelares unidos a mecanismos de transporte turbulento en el disco protoplanetario fueron capaces de barrer estas partículas refractarias hasta regiones muy alejadas en donde fueron incorporadas a los cometas.

**LOS ESTUDIOS TAN SÓLO
ACABAN DE COMENZAR**

Existe la convicción de que quedan todavía muchas sorpresas alojadas en esas celdas de aerogel, especialmente porque llevamos apenas un año estudiándolas. En cualquier caso, la NASA es consciente de que es un estudio laborioso a realizar por grupos capacitados con instrumentos enormemente sofisticados. Es una lástima que en nuestro país todavía no dispongamos de algunos de esos sofisticados instru-

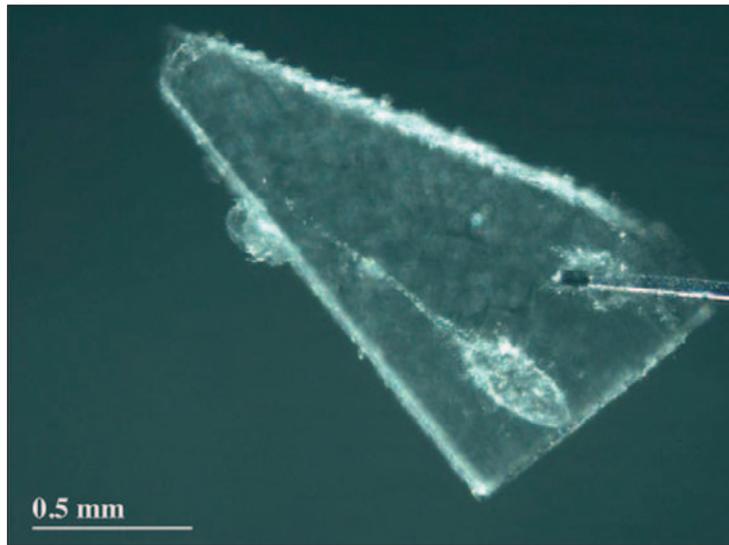
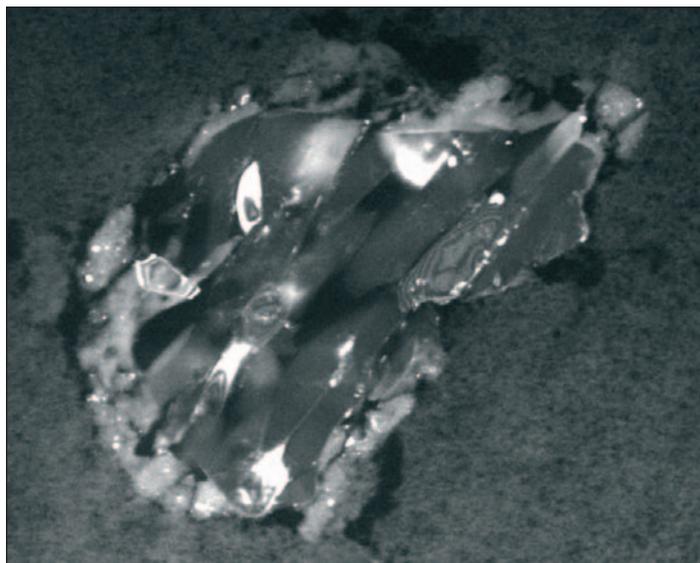


Figura 6. El trazo dejado por una partícula en el aerogel es recortado meticulosamente para pasar a su inspección óptica y posterior extracción de fragmentos supervivientes. (Stardust/NASA)

Figura 7. Este tipo de olivino llamado fosterita que se formó próximo al Sol fue, para sorpresa de muchos, uno de los fragmentos recuperados por la sonda Stardust. (Stardust/NASA)



de los cometas y de los meteoroides que constantemente alcanzan la atmósfera de la Tierra. También es posible que consigamos identificar algunos granos presolares de estrellas situadas en las proximidades del Sol y entender mejor si el Sol nació como estrella aislada o si, como parecen indicar estudios recientes, pudo hacerlo próxima a una asociación estelar rica en estrellas masivas (García-Hernández *et al.*, 2006). En definitiva, además de conocer mejor los procesos acontecidos en el Sistema Solar, quizás podamos dar un paso importante en la comprensión del papel que tuvieron los cometas como enriquecedores en materia orgánica y agua a la Tierra primitiva, aspecto sugerido por el Prof. Joan Oró (Oró, 1961). **A**

mentos pero es buena muestra de lo mucho que nos queda por recorrer en este campo. En cualquier caso, la NASA ha decidido preservar en condiciones especiales muchas de las celdas del colector de *Stardust*. La razón para esa decisión es que somos conscientes que el desarrollo tecnológico permitirá en un futuro no muy lejano realizar estudios enormemente precisos sobre la composición química e isotópica de los materiales recuperados del cometa 81P/Wild 2. Por ello, es lógico preservar una parte de esas partículas para que sean estudiadas por futuras generaciones de científicos.

Pese a que el análisis de las muestras no ha hecho sino empezar, la curiosidad nos hace preguntarnos ¿qué otras claves podrían quedar por extraer de los miles de rastros y de partículas todavía por estudiar? Aunque ciertamente es demasiado pronto para responder en detalle, sin duda el estudio de las partículas contenidas en el aerogel nos hará profundizar aún más en el estudio de la estructura y la composición

REFERENCIAS

- Brownlee D., P. Tsou *et al.* [incluyendo en orden alfabético a J. M. Trigo-Rodríguez] (2006), *Comet Wild 2 under a microscope*, *Science* 314, 1711-1716.
- García-Hernández D. A., P. García-Lario, B. Plez, F. D'Antona, A. Manchado y J. M. Trigo-Rodríguez (2006), *Rb-rich Asymptotic Giant Branch Stars*, *Science* 314, 1711-1716.
- Hörz F. *et al.* [incluyendo en orden alfabético a J. M. Trigo-Rodríguez] (2006), *Stardust implications for Wild 2 coma dust*, *Science* 314, 1716-1719.
- Oró, J. (1961), *Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth*, *Nature* 190, 389-390.
- Trigo-Rodríguez, J. M. y J. Llorca (2006), *Cometary meteoroids strength: clues to the structure and evolution of comets*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 372, 655-660.
- Trigo-Rodríguez, J. M., J. Llorca, J. Borovička y J. Fabregat (2003), *Chemical abundances determined from meteor spectra: I. Ratios of the main chemical elements*, *Meteoritics & Planetary Science* 38, n. 8, pp. 1283-1294.
- Trigo-Rodríguez, J. M., Rubin, A. E. y J. T. Wasson (2006), *Non-nebular origin of dark mantles around chondrules and inclusions in CM chondrites*, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 1271-1290.

Figura 8. La progresiva sustitución de los granos metálicos y de los minerales originales por fases hidratadas puede apreciarse en estos dos cóndrulos de las condritas carbonáceas CM: a) QUE97990 y b) Cold Bokkeveld. La primera se encuentra poco alterada y la segunda extremadamente dada el agua que empapó el (o los) cuerpo(s) progenitor(es) de ambos meteoritos. (Imagen Josep M. Trigo)

