

La Misión Stardust: Implicaciones Astrofísicas de las muestras analizadas del Cometa 81P/Wild 2

Josep M. Trigo-Rodríguez

Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC) y Institut
d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC).

Los cometas son objetos enormemente frágiles pues son cuerpos pequeños, agregados formados por las colisiones a baja velocidad de los materiales que formaron el disco protoplanetario. Muchos de ellos poseen tales materiales inalterados dado que han permanecido almacenados en distantes regiones del Sistema Solar sin sufrir el calentamiento solar. La pléyade de resultados obtenidos por la armada de sondas espaciales que atravesaron la coma del cometa 1P/Halley en 1986 supuso un primer avance en el enigmático origen de estos objetos, aunque muchas preguntas quedaron abiertas. En las últimas décadas nos hemos preguntado si los cometas podían ser tan primitivos como para preservar claves esenciales sobre los procesos físico-químicos acontecidos durante el origen del sistema solar. Hasta hace poco más de un año no se había podido responder a esta pregunta dada la dificultad de recuperar material "in situ" de un cometa para estudiarlo en laboratorio. Este fue el primer y más importante reto de la misión Stardust: diseñar un mecanismo capaz de recuperar partículas cometarias para poder estudiarlas en todo detalle a su retorno a la Tierra. La experimentación balística con espumas sólidas en el laboratorio señaló su aplicabilidad para la captura de partículas a alta velocidad. Años después un aerogel de SiO₂, "montado en un ingenioso panel colector a bordo de la sonda Stardust de la NASA", conseguiría recuperar partículas del cometa 81P/Wild 2. Se trataba de las primeras muestras sólidas de un objeto del sistema solar diferente a la Luna que estaban al alcance de la comunidad científica. Este artículo describe parte de lo aprendido sobre los procesos físicos ocurridos en las etapas iniciales de nuestro Sistema Solar y sobre la naturaleza de las partículas del cometa 81P/Wild 2.

El contexto astrofísico

La creciente resolución instrumental obtenida por los grandes telescopios en Tierra y por el Telescopio Espacial Hubble ha sido el motor de grandes progresos en varias disciplinas astrofísicas y, particularmente, en el estudio de las fases tempranas de la evolución de sistemas planeta-

rios. Por una parte, las predicciones teóricas realizadas por la teoría de formación estelar (Larson, 1969; Shakura and Suynaev, 1973) se han visto corroboradas por observaciones directas de regiones de formación estelar. Las estrellas T Tauri, representativas del estadio inicial de nuestro Sol cuando apenas tenía un millón de años, se identificó la presencia de discos de polvo por polarimetría en el óptico (Elsasser and Staude, 1978). Posteriormente esas regiones fueron estudiadas mediante el InfraRed Astronomical Satellite (IRAS) confirmando la presencia de polvo frío alrededor de tales estrellas (Rucinski, 1985). Este satélite también identificó la existencia de débiles excesos infrarrojos en la luz procedente de estrellas de la secuencia principal tales como ϵ Eridani, β Pictoris o la propia Vega. La creciente resolución espacial está también permitiendo el estudio directo de discos protoplanetarios alrededor de otras estrellas (fig. 1).

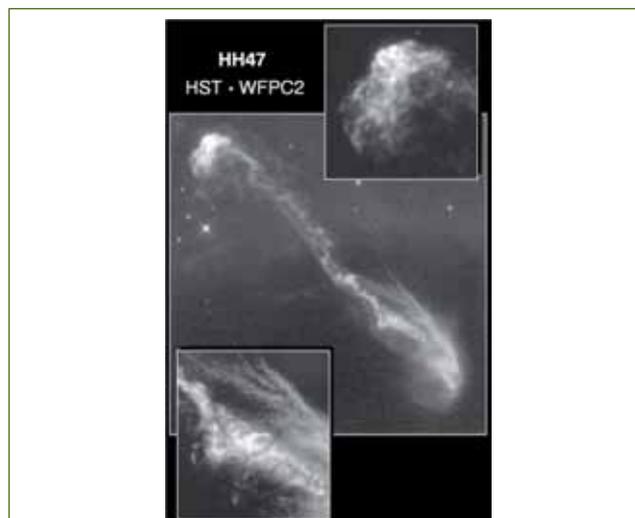


Figura 1. Flujo bipolar de material alrededor del objeto Herbig-Haro 47. Este proceso acontece en los primeros estadios evolutivos tras la formación estelar. Fuertes vientos estelares (100-200 km/s) barren hacia fuera parte de los materiales que caen sobre la estrella. Este tipo de objeto aparece asociado a los máseres que se detectan en frecuencias radio

Ya hace varias décadas se empezaron a observar objetos trazadores del nacimiento estelar a partir del colapso de estas nebulosas. Ejemplos de estos trazadores son los objetos de Herbig-Haro, los glóbulos de Bok y las fuentes máser e infrarrojas. La escala temporal de tales procesos formativos de las estrellas es breve en comparación a su evolución posterior pero los acontecimientos que tienen lugar pueden ser claves para la posterior evolución de los cometas y, por ende, de los bloques constitutivos de los planetas (Boss, 2004).

Observaciones remotas de los discos protoplanetarios (fig. 2) permiten profundizar en los estadios iniciales de

formación planetaria, aunque el estudio de primitivos objetos de nuestro sistema solar está permitiendo ahondar en muchos aspectos aún oscuros. Tales discos de polvo han sido observados ampliamente alrededor de estrellas jóvenes y representan las fases iniciales de agregación de los denominados planetesimales (fig. 3).

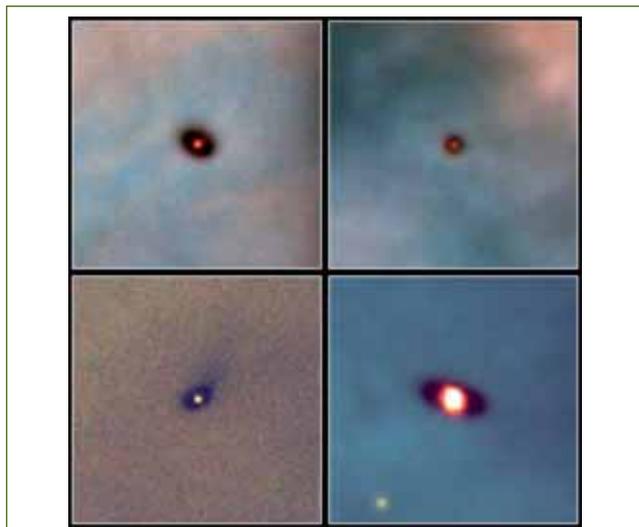


Figura 2. Diversos discos protoplanetarios detectados en la nebulosa de Orión (M42) por M.J. McCaughrean (MPIA) y C.R. O'Dell (Rice Univ.). En M42 son relativamente fáciles de identificar dado que rodean estrellas recién nacidas y además el polvo que los forma actúa apantallando la luz de la nebulosa de fondo. (Imagen HST/NASA).

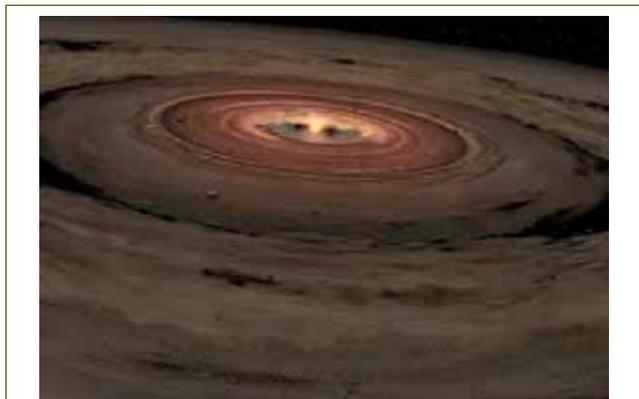


Figura 3. Impresión artística del disco protoplanetario existente alrededor de la enana marrón OTS44. Nuestro sistema solar asistió a un estadio similar hace 4565 millones de años (NASA).

Algunos meteoritos pueden considerarse bloques fósiles del disco protoplanetario pues representan pequeños asteroides consolidados hace unos 4565 millones de años de la agregación de sus componentes. Tanto estos asteroides como los cometas son primitivos dado que su pequeño tamaño ha evitado que sufriesen metamorfismo en su interior. Algo

muy diferente ocurrió a los materiales que formaron los planetas terrestres y los asteroides de mayor tamaño. Tales cuerpos planetarios sufrieron diferenciación y metamorfismo inducido preferentemente por la desintegración de los isótopos radiactivos que los formaban, especialmente de la mano del ^{26}Al y el ^{60}Fe . A mayor masa, mayor calor generado (y atrapado) en su interior, lo que conllevaría la fusión de sus componentes minerales. Tal proceso conllevaría la diferenciación del cuerpo planetario en regiones formadas por materiales de diferente densidad (Lewis, 1972). La diferenciación fue un proceso bastante extendido en planetesimales de varios cientos de kilómetros de diámetro, aunque no fue completo en aquellos de menor tamaño al enfriarse más rápidamente.

Así pues, los objetos consolidados en el disco protoplanetario con diámetros de pocas decenas de kilómetros pudieron evitar que el calor interno alterase sus componentes minerales primordiales. Tales objetos se denominan primitivos pues constituyen auténticos sedimentos de los materiales presentes en el disco protoplanetario durante la formación del Sol y, desde una perspectiva científica, son extraordinariamente valiosos. Estudiando estos materiales a escala microscópica podemos obtener información sobre los procesos físico-químicos ocurridos en aquellas fases tempranas. Entre los meteoritos que llegan a la Tierra procedentes de estos objetos primitivos pueden reconocerse similitudes y diferencias en sus componentes que permiten distinguirlos. Entre estos meteoritos encontramos las denominadas *condritas* por el hecho de que poseen características esférulas de silicatos con diámetros de unas pocas decenas de micras hasta varios milímetros llamados *cóndrulos*, insertados en una matriz de polvo fino débilmente consolidada (fig. 4).

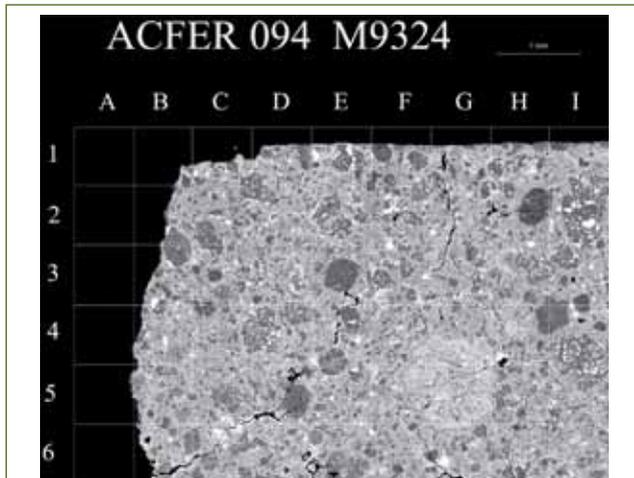


Figura 4. Mosaico de una sección delgada de la primitiva condrita carbonácea Acfer 094. Una fina retícula se utiliza para identificar los cóndrulos y las diferentes inclusiones contenidas en la fina matriz mineral (J.M. Trigo-Rodríguez/UCLA).

Las texturas vítreas de los cóndrulos sugieren haberse producido en procesos ígneos producidos tras el brusco calentamiento de materiales precursores en procesos acontecidos en el disco protoplanetario, mucho antes de formarse los planetas aunque otros pudiesen formarse en otros procesos energéticos posteriores. Asimismo, las condritas contienen materiales incluso más antiguos, como es el caso de minerales refractarios capaces de resistir mayores temperaturas que los cóndrulos y denominados inclusiones refractarias de calcio y aluminio. Estos granos refractarios son conocidos como CAIs, por su acrónimo inglés (Ca-Al rich Inclusions). Posiblemente las condritas más primitivas son aquellas denominadas carbonáceas por el hecho de contener materia orgánica en su composición. Pero estos no son los materiales más primitivos presentes en las condritas dado que en el interior de la fina matriz mineral que compacta estas fascinantes rocas encontramos granos presolares de muy diversa composición. Su presencia indica que tales materiales no han sufrido alteración térmica rigurosa. Se denominan *presolares* pues su particular mineralogía y anomalías isotópicas indican que fueron sintetizados en las fotosferas de estrellas situadas en el entorno solar o en explosiones de nova o supernova, mucho antes de que se hubiesen consolidado las condritas por la agregación de los materiales presentes en el disco protoplanetario (Zinner, 2003).

Pese a los avances realizados en el estudio de los meteoritos condriticos, sus asteroides progenitores posiblemente se formaron a unas distancias al Sol similares a las del presente cinturón de asteroides (unas 3 U.A). Sin embargo, la existencia en nuestro Sistema Solar de una innumerable cantidad de objetos ricos en hielos (y por tanto incapaces de formarse a tales distancias) nos sugiere que estamos dejando de lado parte esencial de la historia. Por ello, para tener una visión completa de la composición química del disco protoplanetario debemos estudiar los cometas, algunos de ellos en el foco de recientes misiones espaciales y otras futuras. En este momento especialmente motivador la misión Stardust ha conseguido recuperar materiales formativos del cometa 81P/Wild 2, un objeto muy frágil y posiblemente inalterado desde su formación. Todo indica que debe haberse formado en las regiones externas del disco protoplanetario, en una región todavía hoy en día poblada por miles de cometas denominada el cinturón de Kuiper. El hecho de haber sido almacenado en esa región y de haber evitado acercamientos al Sol debe también haber evitado en buena medida su alteración (Brownlee et al., 2006). Este artículo pretende profundizar en las claves que el estudio de estos objetos primigenios proporciona sobre los procesos que tuvieron lugar en el sistema solar primitivo y también en la naturaleza desvelada de las partículas recuperadas del cometa 81P/Wild 2.

Capturando partículas cometarias en aerogel

Aunque el primer aerogel se creó en torno a los años treinta del siglo pasado, su enorme potencial para la captura de polvo cósmico y cometario ha sido un desarrollo reciente de la comunidad de las ciencias planetarias. Las partículas del cometa 81P/Wild 2 fueron capturadas por la sonda Stardust (fig. 5) gracias a un ingenioso mecanismo colector en forma de panel en cuyas celdas se encontraban alojados bloques de aerogel de idéntico tamaño y propiedades (fig. 6).



Figura 5. Imagen artística del colector desplegado en forma de panel durante el trayecto de la sonda Stardust a través de la coma del cometa 81P/Wild 2 (Stardust/NASA).

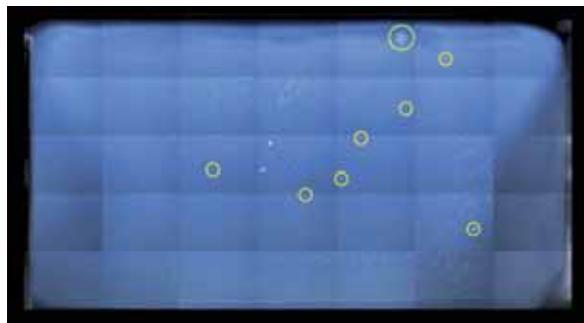


Figura 6. La celda colectora de aerogel número 115 de 2x4 cm vista desde arriba en donde se marcan los mayores impactos, claramente visibles (Stardust/NASA).

El aerogel utilizado poseía una densidad que variaba gradualmente desde la superficie con $\rho < 0.01 \text{ g/cm}^3$ hasta unos 3 centímetros de profundidad donde pasaba a ser 0.05 g/cm^3 . Esta característica es importante pues estaba pensada para permitir una captura gradual minimizando la duración del pulso térmico que podría alterar químicamente las partículas. Dado que éstas alcanzaron el colector a una velocidad relativa de 6.1 km/s, los efectos de la alteración pueden ser cuantificados (Trigo-Rodríguez et al., 2008). Mientras que la energía cinética de las partículas incidentes podría ser suficiente para evaporarlas en el impacto directo contra una superficie sólida, su captura en un aerogel de

baja densidad permite que tan sólo las fases más volátiles sean evaporadas y que el material situado en el frente de choque actúe apantallando térmicamente el que queda detrás. El rango de calentamiento y deceleración viene definido por la cantidad de momento y energía disponible en cada instante como veremos en el próximo apartado. Evidentemente, estas magnitudes cambian rápidamente durante la captura no sólo debido a la progresiva deceleración del proyectil en el aerogel sino también debido a la pérdida de masa experimentada como consecuencia del calentamiento y la fragmentación.

El cometa 81P/Wild 2 tiene un diámetro de 4.5 km y está compuesto mayoritariamente por una mezcla de hielos (principalmente de agua), materia orgánica y granos minerales principalmente en forma de polvo fino de un tamaño típico de unas 12 μm (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 mecanismo, descrito inicialmente por Fred L. Whipple, actúa reduciendo la masa del cometa en varias toneladas por segundo y el gas sublimado arrastra las partículas de polvo. Cuando la sonda Stardust atravesó las regiones internas de la coma de este cometa y desplegó su colector miles de partículas lo alcanzaron. En ese proceso de deceleración de la partícula en el aerogel las partículas capturadas excavan cavidades que aquí denominaré “túneles” (*tracks* en inglés) con tamaños típicos similares al del proyectil capturado. Dada la dificultad de modelar la entrada de un sólido a gran velocidad en un medio de baja densidad, buena parte de lo que se conoce acerca de las relaciones entre las dimensiones de tales túneles y las propiedades de los proyectiles que las excavaron se ha obtenido en experimentos de laboratorios. Diferentes laboratorios alrededor del mundo se han especializado en este tipo de experimentos en los que se disparan partículas de composición y diámetros delimitados contra diferentes aerogeles con el fin de estudiar la resistencia de tales materiales y los efectos sufridos por las partículas. Precisamente, estos materiales son enormemente aislantes y poseen aplicaciones de todo tipo, tanto en nuestros laboratorios como en el espacio. Un trabajo reciente describe estas aplicaciones en todo detalle dentro de una perspectiva amplia (Burchell et al., 2006).

Las consecuencias que un impacto a tales velocidades puede tener en materiales naturales (como un meteorito) dependen en gran medida de los materiales que conforman el objetivo y el proyectil. Tuvimos la fortuna de estudiar un curioso clasto en el meteorito Plainview cuyas características y composición eran extraordinariamente rica en carbono nos sugirió que podría haberse producido como consecuencia de un impacto con una partícula cometaria (Rubin et al., 2005). Tal proceso es similar a la excavación de un cráter, en la que

los materiales de ambos objetos quedan apilados y evidencian haber sufrido calentamiento. La captura en el aerogel es muy diferente dada la bajísima densidad de estos materiales esponjosos y el carácter aislante del SiO_2 .

Un modelo para estudiar la captura de un proyectil en un aerogel

La física de la captura de un proyectil en un medio altamente poroso fue estudiada previamente por Domínguez et al. (2004). La energía requerida para deformar, calentar y vaporizar tanto el aerogel como el proyectil se obtiene de la energía cinética de la partícula. Asumiendo que toda la energía cinética contribuyese a calentar el proyectil tras el impacto puede estimarse la fracción de proyectil que puede ser vaporizado (Trigo-Rodríguez et al., 2008):

$$\frac{m_{\text{vap}}}{m_p} = \frac{v_0^2}{2H_{\text{vap}}} \quad (1)$$

donde m_{vap} es la masa vaporizada, m_p es la masa del proyectil, v_0 es la velocidad de impacto y H_{vap} es el calor de vaporización (una esfera de sílice tendría por ejemplo $3,26 \cdot 10^7 \text{ J kg}^{-1}$). Sin embargo el problema es mucho más complejo dado que no toda la energía cinética repercute en el calentamiento del proyectil como demostró Melosh (1989) sino que depende de la tasa de transferencia de la energía al medio y de sus propiedades en fase de vapor. Precisamente las propiedades termodinámicas del dióxido de silicio han sido recientemente definidas para las condiciones de alta presión y temperatura que suelen suceder a un impacto (Melosh, 2007).

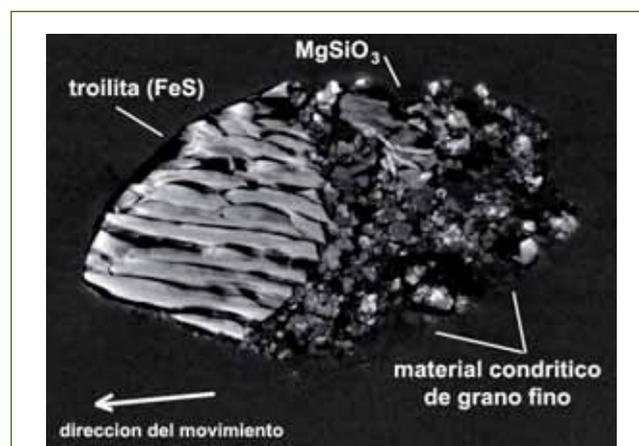


Figura 7. La presencia de troilita (FeS) en la parte frontal de la partícula Febo actuó apantallando el efecto del frente térmico. Así se preservaron la enstatita y el fino material (con composición tipo condritas carbonáceas CI) situados detrás que, de otro modo, se hubiesen vaporizado. Una flecha indica el sentido de movimiento de la partícula antes de quedar frenada en esa posición (Stardust/NASA).

En el caso de *Stardust* las partículas incidieron a una velocidad de 6.1 km/s. Nuestro estudio detallado indica que la energía cinética inicial fue sólo capaz de fundir el aerogel y la parte de las partículas expuestas al frente de choque, volatilizándose preferentemente aquellas fases de bajo punto de fusión (Trigo-Rodríguez et al., 2008). El efecto de apantallamiento de la onda térmica queda bien ejemplificado por la partícula Febo que aparece en la fig. 7 (Brownlee et al., 2006).

Suponiendo un proyectil esférico, la captura de un meteoroide de radio r_g en el aerogel puede estudiarse desde el sistema de referencia del proyectil. Un proyectil de radio r_g producirá un flujo de masa (Φ_m) dado por:

$$\Phi_m = \rho_0 \pi \cdot r_g^2 \cdot v \quad (2)$$

Donde el flujo del momento lineal (Φ_{mv}) vendrá dado por:

$$\Phi_{mv} = \rho_0 \pi \cdot r_g^2 \cdot v^2 \quad (3)$$

Y la energía cinética en unidades de potencia (dE/dt) puede escribirse:

$$\Phi_{KE} = \frac{1}{2} \rho_0 \pi \cdot r_g^2 \cdot v^3 \quad (4)$$

Resulta particularmente interesante que los flujos de momento y de energía cinética tienen unidades de fuerza (dp/dt) y de energía cinética (dE/dt). Serán estos cocientes los que permitirán determinar el momento cinético perdido por el proyectil y estimar la energía disponible en cada instante para calentar el proyectil.

La fuerza de deceleración experimentada por el meteoroide podrá escribirse aproximadamente como:

$$\frac{dp}{dt} \approx \rho_0 A v^2 \quad (5)$$

donde A es la sección eficaz del proyectil. La presión dinámica que siente el proyectil podrá ser estimada considerando la fuerza por unidad de área experimentada por el proyectil. Así pues, esta vendrá dada por:

$$P \approx \rho_0 \cdot v^2 \quad (6)$$

La consistencia de las partículas cometarias, al ser agregados de granos minerales similares a las Partículas de Polvo Interplanetario (usualmente conocidas por el acrónimo inglés IDPs), es varios órdenes de magnitud inferior a las frágiles areniscas que encontramos en la Tierra. Por consiguiente, al penetrar el aerogel la presión dinámica hace que se rompan instantáneamente formando una nube de fragmentos (Trigo-Rodríguez et al., 2008b). Este proceso también acontece en la atmósfera terrestre a presiones

dinámicas de tan sólo unos 10 kPa (Trigo-Rodríguez y Llorca, 2006). Este punto es importante pues, dada la rápida fragmentación de las partículas tras alcanzar el aerogel, los granos minerales de pocas micras recuperados al final de las trazas no son sino los fragmentos supervivientes de agregados mucho mayores. Durante la deceleración de las partículas ha tenido lugar la volatilización de aquellas fases con puntos de fusión más bajos tales como 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. ¿Participaron tales procesos en la excavación de los curiosos túneles observados en el aerogel colector?

Tipos de túneles excavados en *Stardust*

Precisamente, se ha podido comprobar que existen tres diferentes tipos de “túneles” dejados por las partículas hasta el definitivo frenado de los materiales (fig. 8).



Figura 8. Algunos de los túneles excavados por las partículas del cometa 81P/Wild 2 durante su captura en el aerogel. Los tres primeros son de tipo B mientras que el último (T22) es de tipo A. Las partículas penetraron en el aerogel desde arriba (Stardust/NASA).

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. Esto es un reflejo de que la partícula es decelerada muy eficientemente, sufriendo tan solo un calenta-

miento externo y uniforme, sin llegar a fragmentarse. Este tipo suele producirse en experimentos balísticos con granos minerales. Un 65% de los túneles excavados por las partículas del cometa 81P/Wild 2 en el aerogel de Stardust era de esta clase (Burchell et al., 2008). Sin embargo, en el aerogel incidieron agregados mucho más frágiles y posiblemente formados por materiales muy finos que generaron en la parte superior de sus trayectorias significativos abultamientos que no habían sido observados antes. Tales enigmáticos bulbos se han podido reproducir recientemente en experimentos balísticos haciendo colisionar silicatos hidratados con aerogel de idénticas características. Finalmente, pudieron identificarse un 2% de las trazas como de Tipo C que son prácticamente bulbos carentes de partículas supervivientes que sugieren materiales volatilizados muy rápidamente.

Cuando observamos los curiosos bulbos que aparecen en el primer tramo de los túneles de tipos B y C tuvimos la sospecha de que tales estructuras podrían haberse formado por la rápida vaporización de los componentes volátiles de las partículas. Para demostrarlo desarrollamos un nuevo modelo termodinámico en la que parte del material en forma de vapor caliente se expande adiabáticamente. Los resultados indican que, aunque la expansión de tales vapores puede jugar un papel en la excavación de tales bulbos, posiblemente la fragmentación de la partícula y la consiguiente expansión del frente de choque pueda ser un importante mecanismo para excavar tales detalles (Trigo-Rodríguez et al., 2008).

Procesos nebulares desvelados por *Stardust*

Dos teorías principales han sido propuestas para explicar el origen del sistema solar. La primera de ellas, conocida como el modelo de la Nebulosa Caliente, sugería que el Sol se formó en el colapso de una nebulosa de gas. La transformación de la energía gravitatoria en calor como consecuencia del colapso de la nube presolar produciría el calentamiento del gas y polvo nebuloso. La disipación de ese calor sería seguida por la condensación, sedimentación y ulterior acreción de partículas sólidas en función de la temperatura y de la distancia al Sol. En las primeras fases, la temperatura nebulosa sería suficiente como para que los silicatos estuviesen en fase de vapor a las distancias típicas en las que hoy en día encontramos a los planetas terrestres y el cinturón de asteroides (Larimer y Anders, 1970; Lewis, 1972). Por tanto, en esa teoría los componentes minerales que formarían posteriormente el disco protoplanetario irían condensando progresivamente al irse enfriando la temperatura de la nebulosa tras la formación del Sol en su interior. En la teoría de la nebulosa caliente se pueden hacer interesantes predicciones (dependiendo de la presión parcial del gas nebuloso) de las temperaturas a las cuales comienzan a condensar los diferentes minerales con sólo asumir que se

alcanza el equilibrio. Sin embargo, hay razones para creer que esa aproximación puede ser excesiva a escala global. De hecho, todo indica que el Sol se formó del rápido colapso de un núcleo de gas denso en el interior de una fría nube molecular. El colapso de una nube densa progenitora del Sol podría ocurrir en una escala temporal de unos 100.000 años (Boss, 2003). La estrella tras su nacimiento acumularía a su alrededor un disco de acreción relativamente frío, pero sometido a la radiante evolución de su estrella central. En este contexto, el modelo de nebulosa solar de mínima masa viene definido como la mínima cantidad de hidrógeno y helio que cabría mezclar con polvo en abundancias solares para dar lugar a los planetas que conocemos en nuestro sistema solar (Hoyle, 1960). Las estimaciones para estrellas como el Sol es que la masa inicial de material presente en el disco protoplanetario estaría entre 0.05 y 0.01 masas solares (M_{\odot}) (Boss, 1990, 2003).

En la violenta fase T-Tauri atravesada por el Sol en sus primeras etapas, los materiales del disco protoplanetario serían procesados al ser irradiados y calentados por las intensas fulguraciones en las que el gas coronal sería impulsado por los intensos campos magnéticos generados en la fotosfera. Además, el intenso viento estelar y el campo magnético asociado a esas primeras etapas del astro rey permitirían que una parte de esos materiales presentes en el disco no cayesen hacia el Sol sino que fuesen almacenados en una región en forma toroidal o lanzados a grandes distancias, alcanzando las regiones de formación de planetesimales y cometesimales. Shu et al. (2001) propusieron que tanto los cóndrulos como las CAIs podrían formarse en esa región sometida al violento influjo del Sol. Hoy en día muchos autores piensan que ese pudo ser ciertamente el escenario en el que se formasen los CAIs, pero los cóndrulos podrían haberse formado en ondas de choque producidas por el movimiento de los materiales en el interior del disco protoplanetario. Esto acontecería por la fricción de las partículas en órbita solar, sometidas a la influencia de torques gravitatorios y/o magnéticos suficientemente intensos (Boss y Durisen, 2005). El régimen de viscosidad turbulenta actuando sobre el gas y polvo nebuloso sería también capaz de calentar la parte interior del disco, vaporizando aquellos materiales no refractarios que llegasen a esa región. Tal caída progresiva de material sobre la estrella podría provocar fenómenos del tipo “FU Orionis”. Entre las predicciones de este modelo encontraríamos la posible emisión de partículas refractarias a grandes distancias empujadas por el intenso viento estelar, la generación de procesos de turbulencia y consiguiente mezcla radial a gran escala de los componentes del disco protoplanetario. Tales predicciones parecen estar de acuerdo con resultados recientes obtenidos en el cometa 81P/Wild 2.

Claves contenidas en el estudio de los cometas

Ya en la misión *Deep Impact* de la NASA en la que el objetivo fue el cometa 9P/Tempel 1 se obtuvieron evidencias de que el polvo emitido por este cometa eran silicatos cristalinos, es decir, procesados a altas temperaturas en las proximidades del Sol (Sugita et al., 2005). Esos datos, obtenidos del estudio remoto de las propiedades del polvo, necesitaban ser corroborados en otros cometas. La misión Stardust, desarrollada con el principal objetivo de recuperar material del cometa 81P/Wild 2, ha conseguido las pruebas que demuestran que tal escenario es correcto. El estudio en el laboratorio con modernas técnicas de microsonda electrónica de los granos minerales recuperados del cometa 81P/Wild 2 no deja lugar a la duda. El diminuto polvo que forma este cometa es el mismo que formaba parte del disco protoplanetario. El entorno galáctico en el que tuvo lugar el nacimiento del sistema solar ha sido normalmente investigado en base a estudios de las anomalías isotópicas contenidas en primitivas inclusiones refractarias y granos presolares preservados en meteoritos primitivos (Amari et al., 1994; Zinner, 1996, 2003; Zinner et al., 2006). La herencia química e isotópica preservada en el interior del cometa 81P/Wild 2 también puede revelar secretos sobre el entorno donde nació este cometa (Brownlee et al., 2006). De hecho, ha resultado sorprendente descubrir que los materiales en sí no son muy diferentes de aquellos que forman las condritas carbonáceas. Los asteroides representados por las 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 (Blum et al., 2006; Trigo-Rodríguez y Blum, 2008). 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). Precisamente ese tema centró mis estudios sobre condritas carbonáceas en la Universidad de California Los Angeles (UCLA), donde evidenciamos que la mayoría de estos objetos poseen fases minerales hidratadas (Rubin et al., 2007). Una gran sorpresa ha sido para muchos investigadores que los granos minerales recuperados del cometa 81P/Wild 2 no estuviesen hidratados, posiblemente evidenciando que el hielo de agua nunca llegó a empapar estos materiales como si ocurrió en los asteroides progenitores de las condritas carbonáceas de tipo CM (Trigo-Rodríguez et al., 2006°).

Una de las sorpresas más fascinantes de la etapa de examen preliminar de las muestras de *Stardust* fue encontrar en el aerogel silicatos cristalinos formados a altas temperaturas en la proximidad del Sol (Brownlee et al., 2006). Algunos ejemplos son los granos minerales de fosterita (Mg_2SiO_4), ensta-

tita ($MgSiO_3$) o incluso una inclusión similar a las *CAIs*. No se pensaba que tales materiales podían ser tan comunes en un cometa formado en el Cinturón de Kuiper (fig. 9). Para que estos materiales formados a alta temperatura en regiones de la nebulosa solar más próximas al Sol, fuesen incorporados en este cometa formado más allá de Neptuno ha sido necesario un flujo radial de material importante que debe explicarse a través de un transporte de los materiales a través de regiones turbulentas. Esto cambia la idea preconcebida que los materiales contenidos en los cometas se habían formado a grandes distancias del Sol. Posiblemente un intenso viento solar unido a mecanismos de transporte turbulento en el disco protoplanetario fueron capaces de barrer tales minerales refractarios hasta regiones alejadas en donde quedaron incorporados a los cometas.

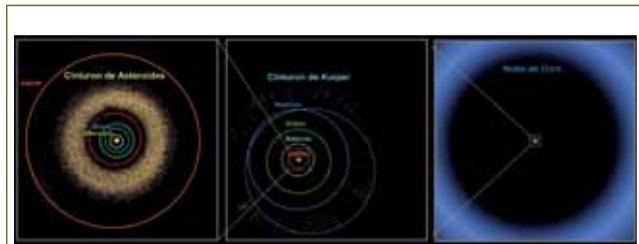


Figura 9. Las tres regiones del Sistema Solar en donde han quedado almacenados objetos primitivos. Son necesarios sucesivos cambios de escala para llegar a las regiones externas del Cinturón de Kuiper y la Nube de Oort. Imagen adaptada (NASA / JPL-Caltech / R. Hurt).

La noción de que los cometas eran objetos primitivos con una química fascinante y fundamental en el enriquecimiento en agua y materia orgánica de la Tierra primitiva fue ya vaticinada por el Prof. Joan Oró (1961). Los estudios que estamos realizando sobre las partículas recuperadas del cometa 81P/Wild 2 comienzan a dar grandes frutos y apoyan la idea de que muchos cometas han sufrido mínima alteración desde su agregación primigenia. Este año un volumen doble de la prestigiosa revista *Meteoritics & Planetary Science* recoge cerca de una veintena de artículos de investigación con los últimos resultados obtenidos en una segunda fase tras el fin de la etapa de estudio preliminar completada con el monográfico en *Science* (Brownlee et al., 2006). La NASA está confiando muestras a grupos consolidados dotados de instrumentos enormemente sofisticados, algunos todavía difíciles de encontrar en España. Y es que la misión *Stardust* marca el comienzo del estudio de otros cuerpos planetarios más allá de la Luna y es preciso que nuestro país no quede al margen. Debemos hacer un esfuerzo importante si deseamos contribuir activamente al estudio de primitivos materiales que albergan las claves del origen del nuestro Sistema Solar.

Referencias bibliográficas

- ALEXANDER C.M.O'D. 1997. Dust Production in the Galaxy: the Meteorite Perspective. In *Astrophysical Implications of the Laboratory Study of Presolar Materials*. Eds. T. J. Bernatowicz and E. Zinner. p.567.
- AMARI S., LEWIS R.S., AND ANDERS E. (1994) *Interstellar grains in meteorites: I. Isolation of SiC, graphite and diamond: size distributions of SiC and graphite*. Geochim. Cosmochim. Acta 58: 459-470.
- BLUM J., R. SCHRÄPLER, B.J.R. DAVIDSON AND J.M. TRIGO-RODRÍGUEZ (2006) *The physics of protoplanetary dust agglomerates. I. Mechanical properties and relations to primitive bodies in the solar system*. Astrophysical Journal 652, 1768-1781.
- BOSS A.P. (1990) *3D solar nebula models: implications for Earth origin*. In *Origin of the Earth* (eds. H.E. Newsom and J.H. Jones), Oxford University Press, Oxford, 3-15.
- BOSS A.P. (2003) "The solar nebula" In *Meteorites, Planets and Comets*. Ed. A. Davis, vol. 1 of Treatise on Geochemistry, Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 63-82.
- BOSS A.P. (2004) "From molecular clouds to circumstellar disks", en *Comets II*. The University of Arizona Press, Tucson, págs. 67-80.
- BOSS A.P. Y DURASEN R.H. (2005) *Chondrule-forming shock fronts in the solar nebula: A possible unified scenario for planet and chondrite formation*. The Astrophysical Journal 621, L137-L140.
- BROWNLEE D., P. TSOU ET AL. [incluyendo en orden alfabético J.M. Trigo-Rodríguez] (2006) *Comet Wild 2 under a microscope*. Science 314, 1711-1716.
- BURCHELL MJ, GRAHAM G, AND KEARSLEY A. 2006. *Cosmic Dust Collection in Aerogel*. Annual Reviews of Earth and Planetary Science, 34, 385 – 418, 2006.
- BURCHELL M.J., S.A.J. FAIREY, P. WOZNIKIEWICK, D.E. BROWNLEE, F. HÖRZ, A.T. KEARSLEY, T.H. SEE, P. TSOU, A. WESTPHAL, S.F. GREEN, J.M. TRIGO-RODRÍGUEZ, AND G. DOMÍNGUEZ (2008) *Characteristics of cometary dust tracks in Stardust aerogel and laboratory calibrations*. Meteoritics and Planetary Science 43, Stardust Special Issue 1/2, in press.
- ELSASSER H. Y H.J. STAUDE (1978) *On the polarization of young stellar objects*. Astron. Astrophys. 70, L3.
- HÖRZ F. ET AL., [incluyendo en orden alfabético J.M. Trigo-Rodríguez] (2006) *Stardust implications for Wild 2 coma dust*. Science 314, 1716-1719.
- HÖRZ F. ET AL., [authors by alphabetical order including J.M. Trigo-Rodríguez] (2006) *Stardust implications for Wild 2 coma dust*. Science 314, 1716-1719.
- HOYLE F. (1960) *On the origin of the solar nebula*. Quart. J. Roy. Astronom. Soc. 1, 28-55.
- LARIMER J.W. Y E. ANDERS (1970) *Chemical fractionations in meteorites. III. Major element fractionations in chondrites*. Geochim. Cosmochim. Acta 34, pp. 367-387.
- LARSON R.B. (1969) *Numerical calculations of the dynamics of a collapsing proto-star*. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 145, 271-295.
- LEWIS J.S. (1972) *Metal/silicate fractionation in the solar system*. Earth Planet. Sci. Lett. 15, 286-290.
- MELOSH H.J. (1989) *Impact cratering: a geologic process*. Oxford University Press, Oxford Monographs on Geology and Geophysics, n. 11, New York, 253 págs.
- MELOSH H.J. (2007) *A hydrocode equation of state for SiO₂*. Meteorit. Planet. Sci. 42, 2079-2098.
- ORÓ J. (1961) *Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth*. Nature 190, 389-390.
- RUBIN A., J.M. TRIGO-RODRÍGUEZ, T. KUNIHRO, G.W. KALLEMEYN Y J.T. WASSON (2005) *Carbon-rich chondritic clast PV1 from the Plainview H-chondrite regolith breccia: formation from H3 chondrite material by possible cometary impact*. Geochimica et Cosmochimica Acta 69, 13, 3419-3430.
- RUBIN A.E., J.M. TRIGO-RODRÍGUEZ, H. HUBER, AND J. T. WASSON (2007) *Progressive aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites*. Geochimica et Cosmochimica Acta 71, 2361-2382.
- RUCINSKI S.M. (1985) *IRAS observations of T Tauri and post T-Tauri stars*. Astron. J. 90, 2321-2330.
- SHAKURA N.I. Y R.A. SUNYAEV (1973) *Black holes in binary systems. Observational appearance*. Astron. Astrophys. 24, 337-355.
- SUGITA ET AL. (2005) "Subaru telescope observations of Deep Impact" Science 310, 274-278.
- TRIGO-RODRÍGUEZ J.M. AND 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., AND LLORCA J. (2007). *Erratum: Cometary meteoroids strength: clues to the structure and evolution of comets*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 375: 415.
- TRIGO-RODRÍGUEZ J.M. AND J. BLUM (2008) *Tensile strength as an indicator of the degree of primitiveness of undifferentiated bodies*. Planetary and Space Science, in press.
- 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., G. DOMÍNGUEZ, M. J. BURCHELL, F. HÖRZ, AND J. LLORCA (2008) *Bulbous tracks arising from hypervelocity capture in aerogel*. Meteoritics and Planetary Science 43:1/2, Stardust Special Issue, 1-12.
- ZINNER E. (1996). *Presolar material in meteorites: an overview*. In *Astrophysical Implications of the Laboratory Study of Presolar Materials*, Vol. 402, edited by Bernatowicz T.J. and Zinner E.K., AIP Conf. Proc., New York, pp.3-26.
- ZINNER E. (2003). *Presolar grains*. In *Meteorites, Planets and Comets*, Ed. A. Davis, vol. 1 of Treatise on Geochemistry, Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 17-39.
- ZINNER E., NITTLER L.R., HOPPE P., GALLINO R., STRANIERO O., ALEXANDER C. M. O'D (2005). *Oxygen, magnesium and chromium isotopic ratios of presolar spinel grains*. Geochim. Cosmochim. Acta 69, 4149-4165.