

SILICATOS EN EL ESPACIO INTERESTELAR, COMETAS Y PARTÍCULAS DE POLVO INTERPLANETARIO

G.M. MUÑOZ CARO

Laboratorio de Geología Planetaria, Centro de Astrobiología (CSIC/INTA), Carretera de Ajalvir km 4, 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid)

INTRODUCCIÓN

Actualmente el Sol se encuentra en la secuencia principal, caracterizada por la fusión del hidrógeno del núcleo en helio. Como cualquier estrella con una masa no superior a 8 masas solares, después de unos $5 \cdot 10^9$ años, se agotará el hidrógeno del núcleo y se iniciará la fusión del hidrógeno de las capas superiores (fase de gigante roja), seguida por la "combustión" del helio en el núcleo (rama horizontal) y la "combustión" del hidrógeno y el helio de las capas superiores (rama gigante asintótica o AGB por sus siglas en inglés, en la cual la estrella pierde buena parte de su masa). Cuando la pérdida de masa cesa comienza la contracción de la estrella con el consecuente aumento de temperatura (fase gigante post-asintótica). La contracción continúa hasta que la temperatura es suficiente para emitir en el UV (nebulosa planetaria), y cuando termina la fusión nuclear la estrella acaba sus días como una enana blanca. Pues bien, el origen de los silicatos hay que buscarlo en las atmósferas de las estrellas AGB, que expelen granos de polvo (partículas de silicatos o carbonáceas) al medio interestelar. Por tanto, podemos decir que el nacimiento del polvo en el espacio está ligado a la muerte de las estrellas de menor masa. La materia compuesta por gas y polvo se agrupa en el medio interestelar formando las llamadas nubes difusas y nubes densas. A lo largo de su estancia en el medio interestelar un grano de polvo se desplaza del medio difuso al medio denso y viceversa, hasta que es destruido por ondas de choque como las producidas por una explosión de supernova. Los granos de silicatos son reconstruidos en el medio denso. Es en las nubes densas o moleculares donde nacen las estrellas. Los granos de polvo intervienen en el proceso de formación estelar absorbiendo el exceso de energía generado durante el colapso gravitacional y emitiendo dicha energía en el infrarrojo, rango en el cual la nube es óptimamente delgada y puede liberarse de dicha energía. Debido a la conservación del momento angular se forma un disco de materia en torno a la protoestrella, que a menudo evoluciona dando lugar a la formación de planetas, cometas y asteroides. Por tanto, si gracias a la muerte de las estrellas se origina el polvo en el espacio (y por tanto los silicatos), la vida de un grano de polvo se acaba cuando nace una nueva estrella, y así se completa el ciclo.

Nuestro objetivo es presentar las ideas vigentes sobre la evolución de los silicatos en los medios interestelar y circunestelar, observados por medio de la espectroscopía de infrarrojos. También estudiaremos los espectros que

hemos obtenido de partículas de polvo interplanetario (IDPs por sus siglas en inglés). Las IDPs son partículas microscópicas de origen asteroidal o cometario, compuestas típicamente de una fracción de silicatos y otra de material carbonáceo (en promedio el 12% de su masa, caracterizado como carbono amorfo). Dichas partículas son recolectadas en la estratosfera y permiten la manipulación y el estudio en el laboratorio de silicatos que datan de los orígenes de nuestro Sistema Solar, y que en algunos casos pueden ser extrasolares, como indican los valores de $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (Messenger et al. 2003).

Espectroscopia de infrarrojos

La espectroscopía de infrarrojos es una herramienta muy útil para el estudio del polvo en el espacio, ya que se pueden observar sus bandas de absorción y emisión. Esto nos permite obtener la densidad de columna de los silicatos en el polvo a lo largo de la línea de visión (expresada en átomos de Si/cm²), la temperatura del polvo, su composición química y su estructura. Las bandas anchas y redondeadas en torno a 10 y 18 μm (1000 y 550 cm⁻¹) observadas en diversas regiones del medio interestelar en nuestra Galaxia corresponden, respectivamente, a los modos de tensión de enlaces Si-O y modos de deformación de enlaces O-Si-O en silicatos amorfos, puesto que los silicatos cristalinos presentan bandas estrechas y con estructura.

Caracterización y evolución de los silicatos en el espacio

Especialmente a partir de las observaciones del Infrared Space Observatory (ISO) se pudo determinar que los silicatos son abundantes en el espacio y que sus propiedades varían según el entorno. Por tanto, las condiciones físico-químicas del medio interaccionan con los granos de silicatos, influyendo sobre su estructura y composición.

Los procesos que intervienen en la evolución de los silicatos son el calentamiento, la irradiación UV e iónica, los *shocks*, la destrucción y la recondensación. Se ha observado que los olivinos, de composición $(\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{SiO}_4$, y piroxenos, $(\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x})\text{SiO}_3$, suelen ser los silicatos más abundantes.

Como se desprende de las observaciones, los granos de silicatos se condensan principalmente en las estrellas AGB ricas en O y se hallan mayoritariamente en estado amorfo, con una pequeña proporción de silicatos cristalinos

(Waters et al.1996). Mientras que los silicatos amorfos dominan en el medio difuso interestelar, en los discos circunestelares y núcleos cometarios prevalecen los silicatos cristalinos.

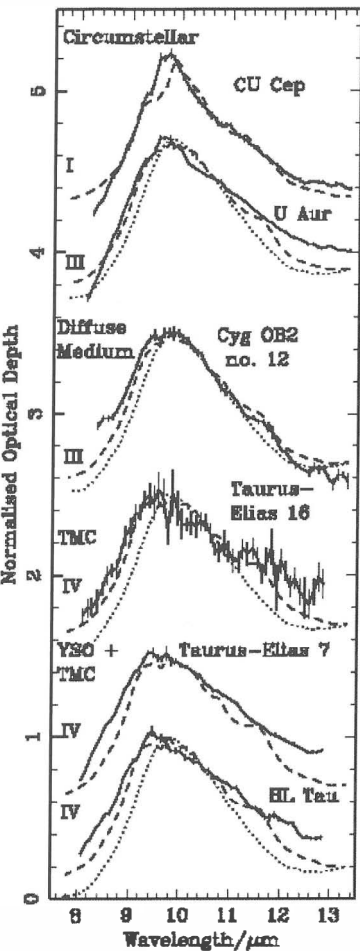


Figura 1: Bandas en la región de 10 μm de silicatos amorfos astronómicos, ver texto (adaptado de Bowey y Adamson 2002).

La figura 1 muestra las bandas en torno a 10 μm en la línea de visión hacia distintas regiones galácticas (tomada de Bowey & Adamson 2002). De arriba a abajo: bandas de emisión en las líneas de visión entre el observador y dos estrellas AGB ricas en O: CU Cep y U Aur.; bandas de absorción de polvo en el medio difuso interestelar en la línea de visión hacia Cyg OB2 no. 12, y bandas de absorción de polvo en la nube densa interestelar de Taurus en la línea de visión de la estrella de campo (field star) Taurus-Elias 16; finalmente aparecen los espectros para las líneas de visión de las estrellas jóvenes Taurus-Elias 7 y HL Tau. Los ajustes (líneas entrecortadas indicadas por números romanos) se llevaron a cabo con mezclas de silicatos cristalinos de distinta composición, añadiendo una componente de silicatos amorfos (líneas de puntos) cuando aparecía demasiada estructura en la curva del ajuste (normalmente se hace en el orden contrario, primero se ajusta con un espectro amorfo y después se añade la contribución de los espectros de silicatos cristalinos). Esto hace que la fracción estimada de silicatos amorfos se reduzca a un valor mínimo de 17% para la nube densa de Taurus y a 0% para algunas regiones circunestelares, unos valores que están muy por debajo de los aceptados, lo cual nos advierte que es arriesgado utilizar una única banda espectral para determinar las propiedades del material (Bowey & Adamson 2002). En general, se estima que la presencia de silicatos cristalinos en el medio

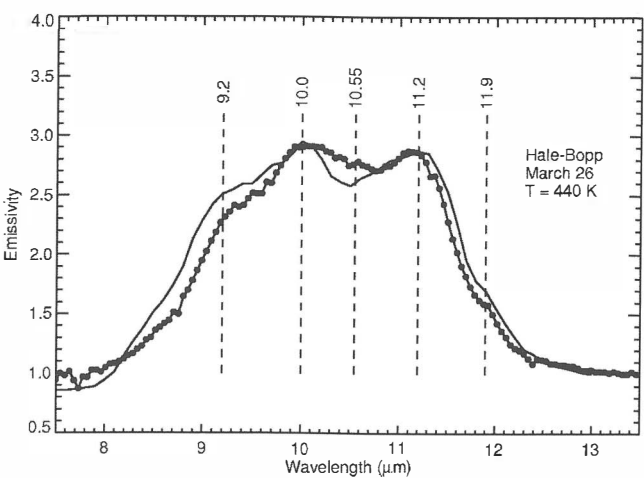


Figura 2: Bandas de emisión en la región de 10 μm de los cometas Hale Bopp (línea gruesa) y Halley (línea delgada) que indican una preponderancia de silicatos cristalinos, principalmente olivinos y piroxenos (adaptado de Hanner et al. 1999).

interestelar difuso es inferior al 5% en la dirección hacia el Centro Galáctico (Li y Draine 2001). Se cree que los silicatos cristalinos que se observan en los discos de estrellas jóvenes se han transformado, han pasado de amorfos a cristalinos, en dichos discos. Esto parece indicar que los granos de silicatos han sido expuestos a temperaturas en torno a 1000 K.

La figura 2 muestra los espectros de emisión en la región en torno a 10 μm de los cometas Hale Bopp y Halley (Hanner 1999), que como se aprecia son muy similares, con una estructura que pone en evidencia la existencia de un alto contenido en silicatos cristalinos. Estos espectros se asemejan a los espectros de discos proto-planetarios en torno a estrellas jóvenes (Waelkens et al. 1997). Las bandas en 11.2 y 11.9 μm se atribuyen a olivino cristalino rico

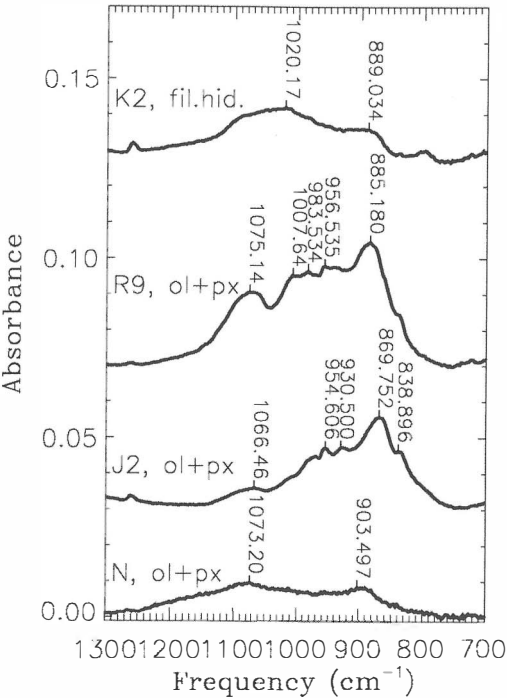


Figura 3: Bandas en la región de 10 μm (~1000 cm⁻¹) correspondientes a 3 IDPs (N, J2, y R9) que contienen olivinos y piroxenos (abv. "ol" y "px") y IDP K2 rica en filosilicatos hidratados.

en Mg. La banda en 9.2 μm es característica de un piroxeno amorfo rico en Mg. La banda en torno a 10 μm probablemente se debe a partículas de olivino amorfo. La anchura total de la banda, la zona superior relativamente lisa y la estructura en 10.5 μm corresponde a piroxenos cristalinos (Hanner 1999).

La figura 3 muestra las bandas en la región en torno a 10 μm correspondientes a 4 IDPs proporcionadas por la NASA JSC Curatorial Facility, catalogadas como W7116B-N, L2054-J2, L2036-R9 y L2021-K2 (que llamaremos N, J2, R9 y K2). Dichas partículas fueron analizadas por microespectroscopía de infrarrojos (Matrajt et al. 2005, Muñoz Caro et al. 2006). Por la posición de las bandas que aparecen superpuestas, asociadas a silicatos cristalinos, se deduce que las IDPs N, J2 y R9 contienen una mezcla de piroxenos y olivinos.

Además J2 y R9 están clasificadas como *cluster* IDPs, es decir, están compuestas por partículas submicroscópicas formando una estructura de racimo. Por tanto, no sólo la composición de la fracción de silicatos en estas IDPs se asemeja a la observada en cometas, también su estructura indica un origen cometario para estas partículas. Por otro lado, la IDP K2 presenta una banda característica de filosilicatos hidratados, lo cual sugiere que dicha partícula tal vez sufrió alteración por contacto con agua líquida y presumiblemente sea de origen asteroidal.

A diferencia de las IDPs cuyos espectros se muestran en la figura 3, existen algunas IDPs que contienen granos de silicatos conocidos como GEMS (*Glass with Embedded Metal and Sulfides*). Algunos GEMS presentan una banda en la región de 10 μm que es muy similar a la banda ancha y sin estructura de los silicatos amorfos en el medio interestelar (Bradley et al. 1999).

Pues bien, llegados a este punto, cabría preguntarnos: ¿Qué mecanismos son responsables de la transformación de silicatos amorfos en silicatos cristalinos y viceversa? Obviamente, el calentamiento de los granos podría ser el causante de la abundancia de silicatos cristalinos en discos circunestelares debido a la circulación de la materia desde las zonas periféricas del disco hasta las zonas cercanas a la estrella central, para volver de nuevo a las zonas más alejadas. Recientemente esta hipótesis se ha visto confirmada por la detección de bandas espectrales características de silicatos cristalinos en discos protoplanetarios en las zonas interiores, a menos de 2 unidades astronómicas, de la estrella central. Dichos silicatos son más cristalinos que los que se habían observado hasta entonces en estrellas jóvenes, y espectralmente muy parecidos a los detectados en cometas de nuestro Sistema Solar (van Boekel et al. 2004). Esto indica que los silicatos cristalinos que hoy vemos en cometas, meteoritos e IDPs se formaron antes que nuestro planeta.

Pero tal vez lo que más llama la atención es la ausencia de silicatos cristalinos en el medio difuso interestelar, dado que éstos se han detectado en estrellas AGB. Recien-

temente hemos llevado a cabo los primeros experimentos de irradiación UV de vacío, característica del medio interestelar, y protónica (con energías de 20 keV y 1000 MeV), que se da tanto en el medio interestelar como actualmente en el Sistema Solar, de varias IDPs (Muñoz Caro et al. 2006). Como ya se había demostrado con estándares de silicatos (Jäger et al. 2003, Brucato et al. 2004, Demyk et al. 2004), observamos que la irradiación iónica de IDPs provoca la amorfización de los granos de silicatos en dichas partículas. Eso mismo podría sucederle a los granos de silicatos interestelares. Por tanto, lo más probable es que los silicatos amorfos del medio interestelar sean un producto de la radiación debida a rayos cósmicos.

Actualmente nos encontramos en un buen momento para la astroquímica, y en particular para la astromineralogía, gracias al avance de las técnicas de observación en el infrarrojo, a pesar de que a menudo la espectroscopía no recibe el apoyo que debería si se tiene en cuenta la información que nos aporta sobre la materia sólida en el espacio. Para la interpretación de los espectros de fuentes astronómicas son esenciales los experimentos de simulación en el laboratorio. Se espera que las misiones cometarias como Stardust y Rosetta sirvan para caracterizar mejor la materia primitiva que dio origen a nuestro planeta, y contribuyan a un mejor conocimiento de la historia del Sistema Solar.

REFERENCIAS

- Bowey, J. E. y Adamson, A. J. (2002). *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 334, 94-106.
- Bradley, J. P., Keller, L. P., Snow, T. P., et al. (1999). *Science*, 285, 1716-1718.
- Brucato, J. R., Strazzulla, G., Baratta, G., y Colangeli, L. (2004). *A&A*, 413, 395-401.
- Demyk, K., d'Hendecourt, L., Leroux, H., Jones, A. P., Borg, J. (2004). *A&A*, 420, 233-243.
- Hanner, M. S. (1999). *Space Science Reviews*, 90, 99-108.
- Jäger, C., Fabian, D., Schrempel, F., Dorschner, J., Henning, Th., y Wesch, W. (2003). *A&A*, 401, 57-65.
- Li, A. y Draine, B. (2001). *ApJ*, 550, L213-L217.
- Matrajt, G., Muñoz Caro, G. M., Dartois, E., d'Hendecourt, L., Deboffle, D., y Borg, J. (2005). *A&A*, 433, 979-995.
- Messenger, S., Keller, L. P., Stadermann, F. J., Walker, R. M., Zinner, E. (2003). *Science*, 300, 105-108.
- Muñoz Caro, G. M., Matrajt, G., Dartois, E., et al. (2006). Aceptado para publicación en *A&A*.
- Van Boekel, R., Min, M., Leinert, Ch., et al. (2004). *Nature*, 432, 479-482.
- Waelkens, C., Malfait, K., y Waters, L.B.F.M. (1997). *Earth, Moon and Planets*, 79 (1-3): 265-274.
- Waters, L. B. F. M., Molster, F. J., de Jong, T., et al. (1996). *A&A*, 315, L361-L364.