

## **Estudio sobre las condiciones de formación de condros en el disco protoplanetario a partir de experimentos de fusión en vacío**

Responsable: Antígona Segura Peralta, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM

### SÍNTESIS DEL PROYECTO

La importancia de las meteoritas de tipo condrito radica en la información contenida en cada uno de sus componentes; por ejemplo, condros, inclusiones de calcio y aluminio (CAIs), y material orgánico de origen abiótico, entre otros. El estudio de estos objetos ha sido clave para interpretar las condiciones físico-químicas de la formación del Sistema Solar temprano y es la clave para descifrar el material y procesos que formaron a la Tierra y los planetas vecinos. Los condros son objetos ígneos y cuasi-esféricos de tamaño milimétrico, con mineralogía y texturas características, que se formaron en el disco de acreción protoplanetario cuando los planetas y asteroides todavía no se agregaban. Por más de 200 años ha existido un debate muy intenso a nivel mundial en torno a los mecanismos que actuaron en la formación de los condros. Este problema es uno de los más grandes enigmas en la meteorítica moderna. En este proyecto se realizará un estudio de las propiedades petrológicas de fundidos tipo condros que se generarán en simulaciones experimentales. La finalidad de los experimentos es reproducir los procesos de calentamiento que pudieron dar origen a los condros. Las simulaciones permitirán determinar a qué temperaturas se formaron las distintas fases y texturas minerales de los condros simulados y éstas se compararán con las propiedades petrológicas observadas en los condros de meteoritas condriticas. De esta manera podremos acotar las temperaturas de formación de los condros y por lo tanto los posibles procesos que los originaron.

### ANTECEDENTES

Los primeros trabajos de meteorítica en México se remontan a 1864 (Castillo, 1864) por el primer director del Instituto Geológico de México, Don Antonio del Castillo y es él quien elabora el primer catálogo de material meteorítico en México en 1890. Posteriormente en 1931 José Dovalina, miembro del mismo instituto, es comisionado para llevar a edición el trabajo que realizara en vida el ingeniero José Haro; este segundo catálogo de meteoritas mexicanas estaba totalmente agotado para 1980. A pesar de que Rubinovich y colaboradores, en 1992 publicaron un trabajo sobre la meteorítica en México era necesario contar con un catálogo actualizado del acervo meteorítico. Fue por eso que en 2001, varios investigadores de los Institutos de Geología, Geofísica y Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) dirigidos por Gerardo Sánchez Rubio unieron esfuerzos para actualizar el Catálogo de Meteoritas Mexicanas. En 2003, el Seminario Mexicano de Meteorítica, con sede en el Instituto de Geología (UNAM) obtuvo el primer apoyo de CONACYT para el estudio de las meteoritas de nuestro país obteniendo

como resultados la actualización de la ciencia de la meteorítica en México así como el establecimiento de las técnicas necesarias para el análisis petrológico y de edades de las meteoritas. De algunos de los resultados obtenidos en este trabajo, vale destacar los relacionados con la selección del tamaño de los condros y experimentos con radiación láser que simulan la formación de un tipo textural de condros en especial, los barrados de olivino.

El rango temporal de formación de los condros (~4,564 Ma.) va de 1 a 3 Ma después de la formación de las inclusiones de calcio y aluminio (~4,567 Ma.) (Amelin et al., 2002; Rudraswami et al., 2008). Además, las características texturales de los condros sugieren historias de formación instantáneas las cuales no se vuelven a repetir dentro del Sistema Solar después del intervalo de edad mencionado. A pesar de los avances realizados para comprender la génesis del Sistema Solar, los astrofísicos aún no han logrado llegar a un consenso acerca del mecanismo preciso del calentamiento de los condros, pero los cosmoquímicos insisten en un calentamiento "flash" (Hewins, et al., 1996). Aún queda por contestar la única pregunta ¿es el calentamiento "flash" el único camino para explicar la presencia de volátiles y texturas de los condros? Si la respuesta es positiva, entonces muchos modelos de calentamiento pueden desecharse. Si los condros se formaron en la etapa T-Tauri desnuda o de líneas débiles, tal como sugiere Cameron (1995), los mecanismos más viables serían los choques nebulares, rayos y ráfagas, pues los mecanismos de ablación de cuerpos parentales y de fusión por impacto implicarían procesos de diferenciación química que no se reconocen en las condritas. En la opinión de un astrofísico (Boss, 1996), la forma más fiable de calentamiento es mediante las ondas de choque que se propagan dentro de la nebulosa; sin embargo, es concebible que un trabajo futuro pueda mejorar algunas discusiones.

Los calentamientos flash derivados de frentes de onda de choque encabezan la lista de los posibles mecanismos formadores de condros (Boss y Durisen, 2005). Este modelo se refiere a ondas de choque que se propagan en el disco protoplanetario, de manera tal que pueden tomar agregados precursores y calentarlos hasta el punto de fusión por medio de un proceso de calentamiento, en el cual, tanto el arrastre del gas como la energía térmica, se pierde por las colisiones grano-grano hasta alcanzar la radiación termal del frente de onda y de otros granos de polvo (Hood y Horanyi, 1991; 1993). El mecanismo de calentamiento de partículas sólidas por ondas de choque (Nakamoto y Miura, 2004) funciona de la siguiente forma: cuando una onda de choque es generada en la nebulosa solar (que es una mezcla de gas y polvo) el gas es frenado por su presión mientras que las partículas de polvo tienden a conservar su velocidad inicial. Debido a este comportamiento dinámico diferente detrás del frente de la onda de choque, se genera una diferencia de velocidad relativa entre el gas y las partículas de polvo, así las partículas de polvo son frenadas por la fuerza de arrastre de gas causada por la velocidad relativa

con el gas y son calentadas por la energía de arrastre o fricción. Existen por lo menos cinco propuestas diferentes de mecanismos generadores de ondas de choque: El primer mecanismo es por medio de choques de acreción a la superficie del disco protoplanetario (Wood 1984; Ruzmaikina e Ip, 1995). El segundo por la acreción de masas de gas en la nebulosa solar (Boss y Graham., 1993; Hood y Kring, 1996). Tercero por ondas de proa generadas por el movimiento de planetésimos de 1000 km de diámetro en órbitas altamente excéntricas. Un cuarto mecanismo son las ondas en espiral (Hood y Horanyi, 1991; Wood, 1996) generadas por inestabilidades gravitacionales, con tendencia de formación de planetas más allá de la órbita de Júpiter, y cuyas velocidades de choque alcanzan los 10 km/s (Boss, 2002; Pickett et al., 2003; Boss y Durisen, 2005). Un quinto mecanismo puede ser el de la inducción de choques por ráfagas de rayos X en la parte superior del disco protoplanetario, cuyas velocidades de frente de choque son de 40 km/s (Nakamoto et al., 2004).

La aproximación experimental al estudio de los procesos de la formación de los condros se ha realizado en su mayoría a partir de generar fundidos en estufas. Estos experimentos han sido cuestionados debido a que no toman en cuenta las condiciones reales de formación de los condros en dos aspectos: 1) La retención de materiales volátiles como el FeS, Na y K, los cuales no sobreviven a calentamientos y/o enfriamientos que requieren de varios minutos, horas y hasta días y 2) los granos relictos y bordes ígneos que indican diferentes pulsos de calentamiento y no enfriamientos monótonos posteriores a un evento único de calentamiento (Wasson, 1996, Desch et al. 2010). Los experimentos en los que se ha utilizado radiación láser para estudiar la formación de condros permiten en cambio el enfriamiento rápido de los fundidos y el recalentamiento de los mismos a partir de pulsos de radiación subsecuentes. Los experimentos reportados donde se utiliza un láser para la formación de condros han logrado reproducir las texturas observadas en ellos (Nelson et al. 1972, Blander et al. 1976, Eisenhour et al. 1994). En la UNAM una serie de experimentos preliminares fueron realizados en el Laboratorio de Geocronología K-Ar del Instituto de Geología con resultados similares a los reportados en la literatura (Cervantes de la Cruz, 2009). Los experimentos mencionados anteriormente no fueron realizados en condiciones de vacío como las que se esperan del disco protoplanetario en el cual se formaron los condros y las temperaturas reportadas son derivadas a partir de modelos teóricos y no se miden directamente durante los experimentos (Nelson et al. 1972, Blander et al. 1976, Eisenhour et al. 1994).

#### CONTRIBUCIÓN DEL PROYECTO

Los experimentos a realizar resultan novedosos debido a que se harán en condiciones de vacío y se medirá la temperatura de manera directa. El vacío evitará la oxidación de los minerales formados durante la fusión y enfriamiento de las muestras lo que permitirá

comparar estos minerales con los observados en condros de meteoritas condriticas. Hasta la fecha los experimentos de fundidos generados por irradiación láser se han enfocado a las texturas sin un análisis petrológico detallado.

La medición directa de la temperatura durante la fusión y enfriamiento de las muestras permitirá determinar la evolución térmica de la formación de los condros y hacer una relación entre las texturas y petrología resultante de los fundidos experimentales con esta evolución térmica. Esto contribuirá a acotar los posibles mecanismos de formación de los condros.

## OBJETIVOS

### General

Determinar las condiciones térmicas que dieron lugar a las propiedades petrológicas observadas en los condros e inferir sus posibles mecanismos de formación.

### Particulares

1. Diseño y montaje del equipo experimental: montaje y calibración del sistema láser, montaje de la cámara y sistema de vacío, calibración del sistema de obtención de la temperatura.
2. Generación de fundidos tipo condros con el fin de reproducir las condiciones físicas y químicas de la formación de los condros.
3. Utilizar la técnica de espectroscopía Raman para el análisis de las muestras.
4. Comparación de las características petrológicas de los fundidos con las características observadas en los condros de las meteoritas condriticas.
5. Generación de una relación entre las características petrológicas de los fundidos tipo condros y la temperatura medida durante la formación y enfriamiento de cada muestra.

## BIBLIOGRAFÍA

- Amelin, Y., Krot, A.N., Hutcheon, I. D. y Ulyanov, A.A., 2002. Lead Isotopic Ages of Chondrules and Calcium-Aluminium-Rich Inclusions. *Science*, v. 297, p. 1678-1683.
- Blander, M., Planner, H. N., Keil, K., Nelson, L. S., Richardson, N. L. The origin of chondrules -Experimental investigation of metastable liquids in the system  $Mg_2SiO_4-SiO_2$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 40, Aug. 1976, p. 889-896.
- Boss, A.P., 1996. A concise guide to chondrule formation models. En *Chondrules and the Protoplanetary Disk*. Eds. Hewins, R.H., Jones, R.H. y Scott, E.R.D. Cambridge University Press. Gran Bretaña, p. 257-263.
- Boss, A.P., 2002. Evolution of the Solar Nebula V. Disk Instabilities with Varied Thermodynamics. *The Astrophysical Journal*, v. 576, p. 462-472.
- Boss, A.P. y Durisen, R.H., 2005. Chondrule-Forming Shock Fronts in the Solar Nebula: A Possible Unified Scenario for Planet and Chondrite Formation. *The Astrophysical Journal*, v. 621, p. L137-L140
- Boss, A.P. y Graham, J.A., 1993. Clumpy disk accretion and chondrule formation. *Icarus*, v. 106, p. 168-178.
- Cameron, A. G. W., 1995. The First ten million years in the solar nebula. *Meteoritics*, v. 30, p. 133-161.

- Cervantes de la Cruz, K. 2009. Estudio Petrológico de los Condros de las Meteoritas Condriticas Mexicanas Cuartaparte, Cosina, y Nuevo Mercurio: Origen y Evolución de dichas Estructuras. Tesis de doctorado. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Castillo, A., del, 1864. Descripción de la masa de fierro meteórico de Yanhuitlán, Bol. De la Soc. Mex. De Geog. y Est. Tomo X, p. 661-665 Mex. Nov. 20 de 1864.
- Desch, S., Morris, M., Connolly, H., Boss, A. The Importance of Experiments: Constraints on Chondrule Formation Models. Chondrules: Their Role in Early Solar System History, held July 31, 2010 in New York, New York. Lunar and Planetary Science Institute., id.8008. 2010.
- Eisenhour, D.D., Daulton, T.L. y Buseck, P.R., 1994. Electromagnetic heating in the early solar nebula and the formation of chondrules. *Science*, v. 265, p. 1067-1070.
- European Space Agency (ESA), 2010. ExoMars Mission. Consulta internet enero de 2010. [http://www.esa.int/SPECIALS/ExoMars/SEMSZIAMS7F\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/ExoMars/SEMSZIAMS7F_0.html)
- Hewins, R.H., Jones, R.H. y Scott, E.R. D., 1996. Chondrules and the Protoplanetary Disk, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K, 346 p.
- Hood, L.L. y Horanyi, M., 1991. Gas dynamic heating of chondrule precursor grains in the solar nebula. *Icarus*, v. 93, p. 259-269.
- Hood, L.L. y Horanyi, M., 1993. The nebular shock wave model for chondrule formation: one-dimensional calculations. *Icarus* v. 106, pp. 179-189.
- Hood, L.L. y Kring, D.A., 1996. Models for multiple heating mechanisms. En Chondrules and the protoplanetary disk. Ed. Hewins, R.H., Jones, R.H. y Scott, E.R.D. Cambridge University Press. Gran Bretaña. pp. 265-276.
- Nakamoto, T. y Miura, H. 2004. Collisional destruction of chondrules in Shock Waves and inferred dust to gas mass ratio (Resumen). Lunar and Planetary Science Conference XXXV, 1847.pdf
- Nakamoto, T., Kita, N. T., Tachibana, S., Hayashi, M. R., 2004. X-Ray Flare Induced Shock Waves and Chondrule Formation in Upper Solar Nebula (Resumen). Lunar and Planetary Science Conference XXXV, 1821.pdf
- Nelson, L. S., Blander, M., Skaggs, S. R., Keil, K. 1972. Use of a CO<sub>2</sub> laser to prepare chondrule-like spherules from supercooled molten oxide and silicate droplets. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 14, p.338.
- Pickett, B.K., Mejía, A.C., Durisen, R.H., Cassen, P.M., Berry, D.K. y Link, R.P., 2003. The Thermal Regulation of Gravitational Instabilities in Protoplanetary Disks. *The Astrophysical Journal*, v. 590, p. 1060-1080.