

NANO COSMOS

Un viaje a lo pequeño



Una maleta llena de nanomoléculas. Dicho así suena bastante raro. Suspendidas en un gel especial, estas no son unas nanopartículas cualquiera: han nacido en un laboratorio y las hemos «secuestrado» en este gel para poder transportarlas. Pero esto es solo parte del viaje que iniciamos en este mundo de lo pequeño, en este proyecto denominado NANOCOSMOS.

NATALIA RUIZ ZELMANOVITCH

El pasado mes de enero el Consejo Europeo de Investigación (ERC, *European Research Council*) daba a conocer los resultados de la convocatoria para 2013 de las *Synergy Grants*. Contra todo pronóstico, al menos para sus promotores, el proyecto obtenía 15 millones de euros para un atrevido programa denominado «Gas y polvo, de las estrellas al laboratorio: explorando el NANOCOSMOS».

Para José Cernicharo, investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) que coordina a este grupo formado por tres equipos punteros en investigación, «conseguirlo a la segunda ha sido difícil de creer. Había mucha y muy buena competencia. Y ahora lo que se nos viene encima es una gran aventura de seis años y mucha responsabilidad.»

El ERC abrió en el año 2012 la primera convocatoria de las *ERC Synergy Grants* bajo el programa

IDEAS, dentro del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea (2007-2013). El objetivo era apoyar la investigación de excelencia multidisciplinar más difícil, la que se encuentra en la frontera del conocimiento. NANOCOSMOS fue rechazado en su primer intento, pero el equipo no se rindió. Recogieron las recomendaciones de los jueces y volvieron a presentarse, aun a sabiendas de que la convocatoria era fuertemente competitiva y las tasas de éxito extremadamente bajas (13 sobre 450 en 2013, un 2,9 %). Un nuevo panel de expertos evaluó su propuesta y NANOCOSMOS fue seleccionado.

Los tres equipos, que cuentan con una gran experiencia en sus respectivos campos, están coordinados por José Cernicharo Quintanilla, profesor de investigación del CSIC en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM); Christine Joblin, directora de investigación del *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS, Francia)

en el *Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie* (IRAP-OMP y Universidad Paul Sabatier, Toulouse); y José Ángel Martín Gago, profesor de investigación del CSIC en el ICMM.

Aproximadamente el 35 % de los 15 millones de euros con los que está dotada la subvención se dedicará al desarrollo de la tecnología de tres cámaras muy especiales, para lo cual se contratará a unos cuarenta astrónomos e ingenieros, una cifra que se doblará a medida que avance el proyecto. En torno al 70 % del personal será español o trabajará en los centros asociados al proyecto.

Si algo es cierto es que este proyecto cumple con las exigencias principales de los *Synergy*. En primer lugar, se trata de un equipo multidisciplinar: científicos que trabajan en campos aparentemente tan dispares como la ciencia de superficies (incluyendo área experimental y teórica), el vacío, las microondas, la espectroscopia, la

PÁGINA ANTERIOR La Nebulosa del Esquimal, observada por los telescopios Hubble y Chandra. NANOCOSMOS quiere dilucidar cómo nacen los granos de polvo en los entornos de estrellas evolucionadas, en la fase en la que empiezan a expandir sus capas exteriores y a liberar ese material al medio. (Rayos X: NASA/CXC/IAA-CSIC/N. Ruiz et al.; Óptico: NASA/STScI)



química cuántica, la física molecular, la física del plasma... Todos trabajan juntos para desvelar uno de los misterios que inquieta a quienes están en la vanguardia de este campo, y que es responder, principalmente, dos preguntas: cómo se forman las nanopartículas que constituyen los granos de polvo interestelar que, posteriormente, formarán planetas rocosos como la Tierra; y cuáles son los procesos fundamentales que dan lugar a la complejidad química tanto en nuestro planeta como en el espacio.

Para alcanzar estos objetivos, NANOCOSMOS diseñará y fabricará unas cámaras dentro de las cuales se imitarán las condiciones que se dan en el espacio, reproduciendo en un laboratorio esos procesos físicos y químicos. Pero antes, veamos de qué lugares estamos hablando.

DÓNDE NACEN LOS GRANOS DE POLVO

Cuando una estrella llega a las etapas finales de su vida, lanza material al medio que la rodea, por lo que podemos decir que el espacio interestelar está lleno de los restos de estrellas moribundas. En ese medio se desarrolla una química activa y compleja, en el que las íntimas interacciones entre los átomos, las moléculas y el polvo dan lugar a un universo molecular sorprendentemente rico.

Pero, mientras que las moléculas se forman bajo un amplio rango de condiciones físicas, el polvo solo puede formarse de forma eficiente en ciertas regiones, recónditas y cálidas, relacionadas con la muerte de las estrellas.

Si son estrellas de tipo solar o con unas pocas veces la masa del Sol, acabarán hinchándose y eyectando masa desde sus capas exteriores, formando, en última instancia, una nebulosa planetaria cargada de gas y polvo, compuesta por pequeños granos con tamaños que van de lo nanométrico a lo micrométrico. Los granos de polvo nacen en esas envolturas de las estrellas evolucionadas, principalmente en la fase AGB (*Asymptotic Giant Branch stars*, estrellas de la rama asintótica de las gigantes).

Si se trata de estrellas masivas, estas generalmente acaban estallando como supernovas, liberando tam-

en inglés *bottom-up*, establece que los pequeños componentes se organizan de manera que generan conjuntos más complejos).

Sin embargo, los expertos reconocen que una gran parte de esta complejidad sigue siendo un misterio. Las observaciones astronómicas, y los modelos por sí mismos (entendiendo por modelos las idealizaciones de entornos reales que permiten tratarlos matemáticamente de una forma razonablemente sencilla), no pueden proporcionar una descripción completa de la formación, el procesamiento y la interacción del polvo con otras especies en fase gaseosa y sus posi-

bles reacciones químicas.

Es decir: sabemos dónde se forman los granos de polvo, conocemos su composición, pero no sabemos exactamente cómo nacen.

Lo que sí sabemos es que, en esa secuencia de reacciones químicas fundamentales, el polvo

puede estar ejerciendo un importante papel. De hecho, los modelos que se elaboran para predecir estos comportamientos incluyen la presencia de polvo, abriendo la cuestión de qué itinerarios químicos entran en juego y cuál es su relación con las características de los granos. Es más que probable que los granos de polvo ejerzan como catalizador, acelerando o alterando el proceso según qué condiciones.

Hoy sabemos que los granos de polvo son los lugares en los que se forma la molécula más abundante, el H_2 . La formación de otras

Es crucial evaluar las propiedades de las partículas de polvo cósmico y el impacto que pueden tener sobre la evolución de los objetos astronómicos

bién al medio su material en forma de partículas de gas y polvo.

Tras alcanzar el medio interestelar, el polvo pasa por diferentes etapas, en las que puede ser procesado por fotones ultravioleta, por partículas energéticas y por colisiones. En ese camino pueden pasar muchas cosas.

Bajo condiciones bien definidas, deberíamos poder describir y comprender la secuencia de reacciones químicas fundamentales que llevan a la formación de abajo arriba de especies más complejas (la formación de abajo arriba, denominada



moléculas clave, tales como H_2O , también puede ser impulsada principalmente por la química que se da en la superficie de los granos, conduciendo a la formación de mantos de hielo molecular sobre los mismos: el hielo de agua es un componente importante de los cometas y es muy probable que sea el origen de una gran proporción del agua de la Tierra primordial. Además, la química en los hielos ofrecería condiciones favorables para aumentar la complejidad molecular: el entorno inicial necesario para la evolución molecular hacia la biogénesis. Esto se investiga analizando el carbono que contienen los meteoritos (las condritas carbonáceas) que guardan el registro de la química orgánica abiótica que precedió al origen de la vida en la Tierra. De hecho, uno de los objetivos del proyecto es demostrar el potencial de este equipamiento para la caracterización de muestras extraterrestres.

Pero eso no es todo: se cree que el polvo también juega un papel importante en la evolución de las galaxias a todas las escalas, desde los cúmulos de galaxias a la formación de estrellas y sistemas planetarios.

En las regiones irradiadas por ultravioleta (UV), también llamadas regiones de fotodisociación (la acción por la que una molécula se disocia en moléculas más pequeñas como consecuencia de la acción de los fotones), el polvo absorbe fotones UV de manera eficiente, protegiendo a las moléculas de la fotodisociación y provocando la expulsión de electrones energéticos por el efecto fotoeléctrico. La

termalización (el punto en el que se alcanza un equilibrio térmico) de estos fotoelectrones con el gas es conocida por ser el mecanismo primario de calentamiento para el gas neutro. Por tanto, el polvo es un componente fundamental en el comportamiento del gas, por ejemplo, en el proceso de evaporación de los discos jóvenes protoplanetarios y su evolución hacia regiones de formación de planetas.

Además de las AGB y las supernovas, los discos protoplanetarios, pese a tener temperaturas más bajas, también proporcionan un medio con alta densidad, lo cual desencadena un importante proceso en el que el polvo crece de diámetros inferiores a la micra hasta alcanzar diámetros de milímetros y centímetros. Estas «rocas» continuarán creciendo y formarán microplanetesimales y planetas en su evolución hacia las fases de disco planetario y la formación final de planetas. Por tanto, el polvo formado en AGB y supernovas, se procesa para acabar formando planetas sólidos tipo Tierra.

Otro importante elemento de estudio son los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH por sus siglas en inglés, *polycyclic aromatic hydrocarbon*). Estudios recientes indican que los PAH se producen en el medio interestelar tras un proceso generado por luz ultravioleta que incide sobre diminutos granos, pero aún queda mucho trabajo por hacer para saber más de este proceso. Es importante estudiar tanto la cristalización de silicatos, como la aromatización del polvo de carbono y la destrucción

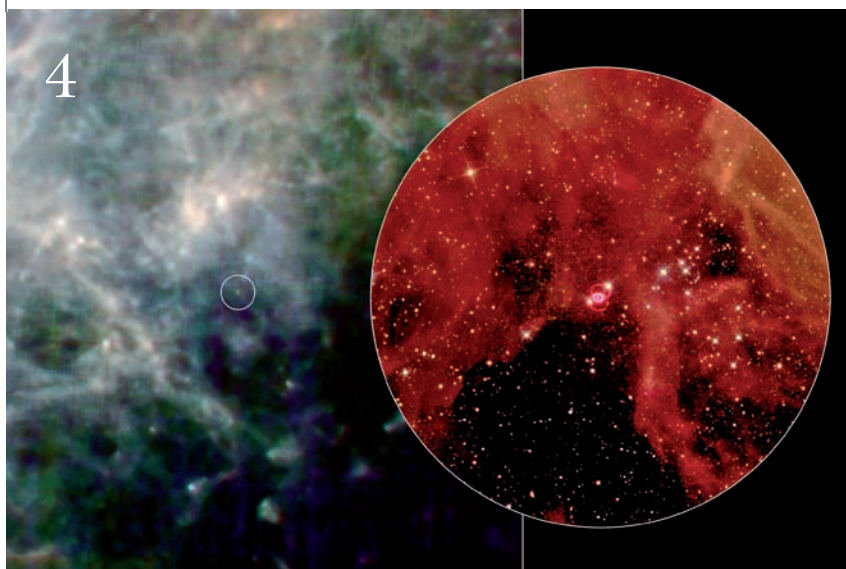
1 El equipo que ha logrado la Synergy Grant europea, dotada con 15 millones de euros. De izquierda a derecha, José Ángel Martín Gago, Christine Joblin, y el coordinador del equipo, José Cernicharo Quintanilla. [Cortesía Centro de Astrobiología]

2 Durante unos 70 000 años, CW Leonis ha estado eyectando sus capas al medio interestelar circundante. Se trata de uno de los objetos infrarrojos más brillantes del cielo, ya que la nube en la que se encuentra inmersa, rica en carbono, impide que la veamos en el rango óptico de la luz. Recientemente se confirmaba la presencia de fosfina en la envoltura de esta estrella. [NASA/JPL/Caltech; GALEX Space Telescope]

3 ALMA es una de las herramientas que utilizará NANOCOSMOS en su faceta observacional. Los rangos milimétrico y submilimétrico desvelan ya grandes secretos relacionados con el surgimiento de los granos de polvo tras la muerte de una estrella. [Clem & Adri Bacri-Normier -wingsforscience.com-/ESO]

de los PAH, ya que se trata de eventos clave en la evolución de la materia de los discos protoplanetarios y de la nebulosa solar primitiva. (Recientemente, utilizando técnicas experimentales de física de superficies y cálculos teóricos, el equipo español liderado por J. A. Gago ha mostrado que los PAH se pueden formar por la acción del hidrógeno atómico sobre superficies carbonadas, proporcionando una nueva vía alternativa al problema de la formación de dichas moléculas).

En la nebulosa solar, parte del polvo cósmico sobrevivió a los procesos de formación de la estrella y los planetas y se encuentra en pequeños cuerpos (cometas, partículas de polvo interplanetario y asteroides), que pueden estudiarse por análisis de laboratorio y constituyen registros muy valiosos de la química temprana del Sistema Solar. Por lo tanto, para aplicaciones en diversos campos como la cosmología, la formación planetaria y el origen de la vida, es crucial evaluar las propiedades de las partículas de polvo cósmico y el impacto que pueden tener sobre la evolución de los objetos astronómicos.



4 En esta imagen podemos ver la zona que rodea a la supernova SN1987A, vista por Herschel, enmarcada en una imagen mayor del área, captada por el Telescopio Espacial Hubble, gracias al cual vemos el anillo de material que la rodea. NANOCOSMOS también intentará dilucidar cómo es el proceso a través del cual nacen los granos de polvo en una explosión de supernova. (ESA/NASA-JPL/UCL/STScI)

5 Gracias al telescopio Spitzer de la NASA, en el año 2010 se descubrían, por primera vez, fullerenos en el espacio. La pregunta de cómo unas estructuras tan complejas pueden formarse y no ser destruidas por las duras condiciones del entorno está relacionada con el trabajo de NANOCOSMOS. (NASA/JPL-Caltech)

6 Los PAH son, en su mayor parte, producto de la combustión. Podemos encontrarlos en nebulosas como esta, en la que su emisión se marca en colores rojizos. Son otro de los objetivos de NANOCOSMOS, que intentará crearlos en una de las cámaras que desarrollará dentro del proyecto. (NASA)

LAS CÁMARAS

El enfoque experimental propuesto por el proyecto NANOCOSMOS presenta muchos retos tecnológicos: el primero, recrear en la Tierra la fotosfera de una estrella AGB, con temperaturas de hasta 2000 K, obteniendo datos espectroscópicos de especies moleculares clave implicadas en la formación del polvo y estudiando las propiedades de diminutos granos en condiciones totalmente controladas. A pesar de que existe la tecnología para producir pequeños grupos por aglomeración de átomos individuales (metales, carbón...), no existen cá-

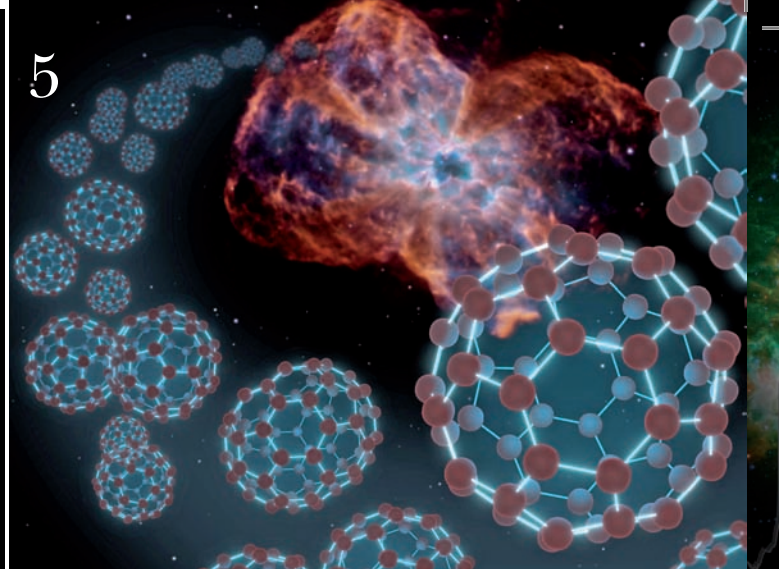
maras de simulación dedicadas a imitar las condiciones astrofísicas de AGB.

Para ello, se diseñará y construirá por primera vez una máquina, bautizada como *Stardust* (polvo de estrellas), capaz de producir análogos de granos de polvo interestelar emulando las condiciones que se dan en las capas exteriores de las estrellas evolucionadas. Todo un reto tecnológico con forma de tubo de cinco metros de longitud, que se instalará en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid.

Según afirma José Ángel Martín Gago, «la cámara *Stardust* recreará temperaturas similares a las que se dan en la zona de formación de polvo de AGB. Tras la expansión, y después de filtrar los iones y limitar la interacción con las paredes del recipiente vacío, el material se enfriará y después se agregará, formando las nanopartículas.»

En esta especie de horno se intentarán reproducir las condiciones que se dan en la atmósfera de una estrella gigante roja cuando se forman los granos de polvo (además, mediante la variación de la composición química inicial, los investigadores del programa también pretenden explorar la formación de polvo en condiciones de supernova).

Se reproducirán tanto las condiciones físicas como las químicas, a una temperatura que irá descendiendo de los 1500° C a los 300° C para simular los procesos que ocurren en el medio interestelar. El ingrediente para reproducir el gas será esencialmente una mezcla de hidrógeno, carbono, nitrógeno,



oxígeno, azufre, silicio, titanio, hierro y otros metales.

Esta nueva máquina producirá nanopartículas de tamaño variable y de diferente composición, generadas de un plasma en expansión. Las nanopartículas también pueden exponerse a radiación UV para simular el procesado del polvo en regiones de fotodisociación, estudiando los efectos de dichas interacciones. La cámara *Stardust* combinará diferentes aspectos de la tecnología de vacío, crecimiento de cristales y análisis de superficies para acercarse a las condiciones físicas y químicas requeridas.

Tras producir los granos, el material sublimado entrará en la «cámara del horno», un estrecho pasillo donde se controla la temperatura de las paredes a través de un horno de cerámica de ultra alto vacío.

Los primeros cálculos indican que será posible detectar los agregados durante su vuelo, permitiendo hacer un seguimiento espectroscópico. Pueden introducirse moléculas en fase de gas (H_2 , CH_4 , C_2H_2 ...) en la proporción deseada, ya sea en la zona de formación de polvo o después de reaccionar con las partículas mediante el uso de medidores de flujo adecuados. Finalmente, serán recogidos y caracterizados *in situ* mediante técnicas de ciencia de superficies para determinar su reactividad antes de exponerse al aire.

La capacidad de la cámara *Stardust* para producir nanopartículas de diversos materiales, con tamaño y composición química controlados, será de interés para los investigadores de diferentes ámbitos.

Tendrá impacto en otros campos como la nanotecnología y, particularmente, en medicina: nanopartículas diseñadas para liberación de medicamentos o como agentes de contraste para Imágenes por Resonancia Magnética (IRM), recubrimientos biocompatibles o biocidas. También será útil para campos como la catálisis (catalizadores metálicos avanzados) o en tecnologías energéticas (nuevas células solares). Por último, hay que señalar que estos métodos resultarían de alto impacto en la comunidad implicada en procesos de fusión (producción y transporte del polvo en dispositivos de fusión) en términos de protección del medio ambiente (por ejemplo, ante el proceso de formación de hollín resultante de la combustión incompleta de hidrocarburos).

Stardust es a su vez un analizador molecular. Esta configuración (que es casi otro instrumento independiente, situado al final del túnel) permitirá obtener el análisis por espectrometría de masas de especies moleculares (por ejemplo, de los PAH) atrapadas en las nanopartículas y en los materiales recopilados en las diferentes cámaras de simulación. Será como acceder al interior del contenido molecular de las nanopartículas formadas. La originalidad de la instalación se centra en combinar las capacidades de resolución espacial de microsonda (*microprobe*) con el acceso a la estructura química molecular detallada mediante la realización de estudios de fotodisociación.

Por último, la cámara de evolución del gas simulará la química del

gas para estudiar la evolución de moléculas clave (HCN, C₂H₂, CO, CH₄, H₂O, especies que contienen metales) sometidas a altas temperaturas que prevalecen en la zona de formación de polvo de AGB o la intensa iluminación UV que se produce en la etapa más evolucionada de las nebulosas protoplanetarias o las nebulosas planetarias.

Podremos profundizar en nuestro conocimiento sobre las semillas de la nucleación de los granos de polvo y observar los cambios de la composición del gas en escalas de tiempo del orden de segundos/minutos trabajando a baja presión. Se monitorizarán las moléculas primordiales y se seguirá la variación en el tiempo de los productos más pesados.

El proyecto espera así obtener información sobre los caminos químicos que llevan al surgimiento de especies clave a partir de las moléculas originales y conocer más detalles sobre la cinética.

Por otra parte, es necesario profundizar en el conocimiento de la composición química del gas a dife-

Todo un reto tecnológico, la cámara *Stardust* será capaz de producir análogos de granos de polvo interestelar

rentes distancias de la estrella y su tiempo de evolución para afinar las condiciones en la cámara *Stardust*.

Estas cámaras de simulación estarán equipadas con mecanismos de última tecnología para el diagnóstico *in situ* y *ex situ*, es decir, tendremos nanopartículas de polvo que viajarán de un laboratorio a otro para ser exploradas en detalle.

Y es que una de las innovaciones del proyecto NANOCOSMOS es el diseño y construcción de una maleta de vacío para permitir que las partículas producidas puedan transportarse, moviéndose entre los diferentes equipos y servicios

de análisis. Digamos que, una vez creada, la nanopartícula va a experimentar toda clase de pruebas para conocer sus más profundos secretos viajando a los países donde haya instalaciones capaces de penetrar en esos misterios, caracterizando su composición y las reacciones químicas que permitieron su formación.

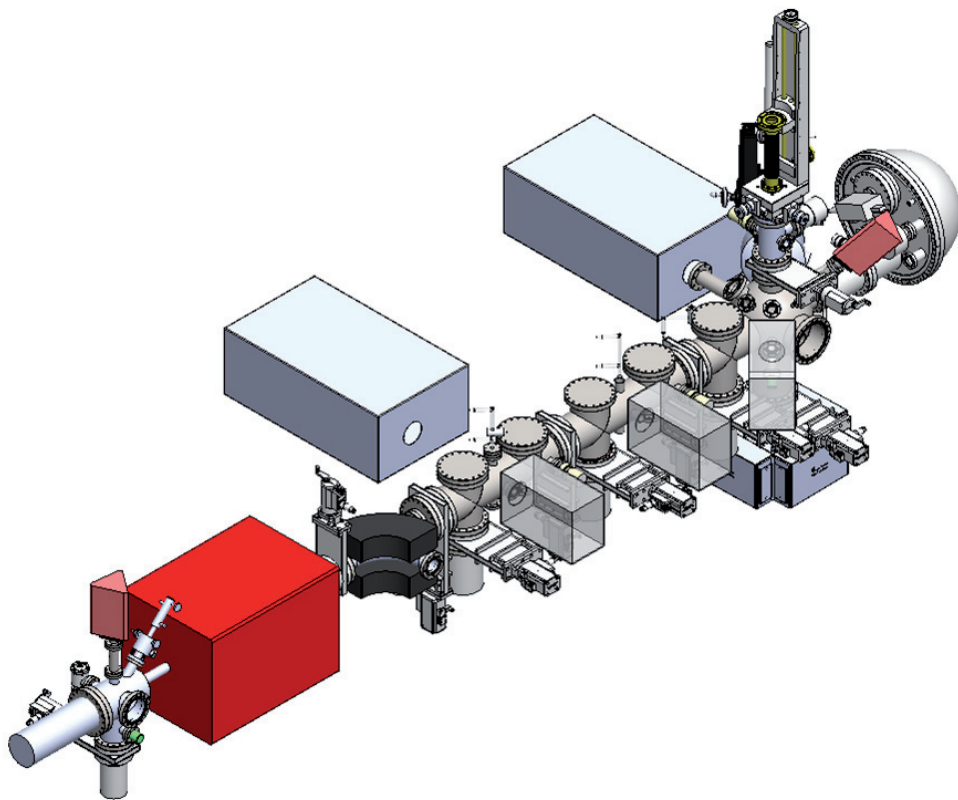
En concreto, se caracterizarán las propiedades espectroscópicas y la composición molecular de las nanopartículas (los granos de polvo y los hidrocarburos aromáticos policíclicos). Para el análisis estructural y de masas se utilizará la desorción láser, combinando espectrometría de tiempo de vuelo, trampas de iones y estudios de fotodisociación para medir los espectros de acción y las tasas de disociación y analizar los fragmentos generados.

La gran variedad de técnicas que se aplicarán a las nanopartículas para poder estudiarlas están disponibles en las diferentes instituciones y universidades implicadas en el proyecto. Por mencionar algunas de ellas, las nanopartículas se someterán a microscopía electrónica de transmisión (TEM); a microscopía electrónica de barrido (SEM); a microscopio de fuerza atómica (AFM); a difracción de rayos X (XRD); a espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), o a espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) o ultravioleta (UPS).

Finalmente, en algunos casos, las nanopartículas recogidas en las cámaras de simulación se inyectarán de nuevo en fase gaseosa para llevar a cabo estudios cinéticos, de procesamiento y espectroscópicos.

NO SOLO DE LABORATORIOS VIVE EL ASTROQUÍMICO

Dada la importancia de los granos de polvo, es lógico que se investigue cómo nacen y cuál es su papel en la química del espacio. Y para estudiarlo, primero hay que encontrarlo: los granos de polvo se detectan por sus firmas espectrales al absorber y difundir la luz de las estrellas y volver a emitir la energía



Con la cámara *Stardust* el proyecto NANOCOSMOS pretende reproducir en un laboratorio los procesos físicos y químicos que tienen lugar en las envolturas de las estrellas moribundas, imitando las condiciones que se dan en esos entornos en los que nacen los granos de polvo. (Equipo ESIS-NA, Structure of Nanoscopic System Group -ICMM-CSIC-)

absorbida en el infrarrojo (infrarrojo cercano, medio y lejano) y en rangos milimétricos y submilimétricos.

De entrada, la emisión térmica del polvo de nuestra propia Galaxia es un grave factor de limitación en las observaciones sobre el origen del universo (como las de la misión *Planck* de la ESA), ya que el polvo emite fuertemente en la ventana espectral del fondo cósmico de microondas.

Afortunadamente, los avances en espectroscopia infrarroja, con misiones espaciales como ISO y Spitzer, han permitido avanzar en el conocimiento de la distribución de tamaños y la composición de diferentes poblaciones de polvo.

Las misiones de *Planck* y *Herschel* también han revelado, a través de la emisión de polvo muy frío, un gran número de núcleos densos, considerados las primeras etapas de formación estelar.

Pero la gran revelación ha sido la radioastronomía, que ha permitido estudiar las zonas más frías del Universo, permitiendo la caracterización de la composición química y los parámetros físicos (temperatura, densidad, movimientos del gas, colapso, turbulencia) de obje-

tos clave, como regiones de formación de estrellas y planetas.

Mirando hacia un futuro cercano, para este proyecto será fundamental obtener tiempo de observación con el interferómetro ALMA. Con sus 66 antenas de alta precisión, ALMA permitirá observar, por primera vez, detalles sobre cuáles son las condiciones que se dan en las zonas de las estrellas evolucionadas donde se forma el polvo.

También se utilizará el VLTI, el interferómetro del telescopio VLT del ESO cubriendo todas las escalas espaciales de estrellas en la fase AGB, nebulosas protoplanetarias y nebulosas planetarias. En concreto, se han planificado varias observaciones del polvo en alta resolución espacial mediante espectroscopia en el infrarrojo medio utilizando el instrumento MATISSE, que proporcionará una resolución espacial comparable a la de ALMA.

También se utilizará el radiotelescopio de 40 metros del Instituto Geográfico Nacional para llevar a cabo observaciones de las propiedades del gas de numerosas estrellas en diferentes etapas evolutivas, para lo cual el proyecto cuenta con el 30% del tiempo de este telescopio. Se utilizarán asimismo las antenas

del IRAM, el Instituto de Radioastronomía Milimétrica, con sus dos antenas (una en Granada y otra en Plateau de Bure, Francia).

La información sobre la distancia de los objetos estudiados la proporcionará GAIA, el telescopio espacial lanzado por la ESA en diciembre de 2013.

Por otra parte, los modelos son fundamentales para intentar reproducir y confirmar condiciones y cambios en las moléculas fruto de estudio. Los modelos astrofísicos de NANOCOSMOS pretenden afinarse gracias a la interacción entre observaciones y trabajos de laboratorio, proporcionando potentes herramientas para el análisis de la calidad de los datos obtenidos por los telescopios de nueva generación.

Así, combinando observaciones astronómicas, modelos y experimentos de alto nivel para producir análogos de polvo estelar en el laboratorio e identificar las especies clave y los pasos que gobiernan la formación de estas nanopartículas, este proyecto intentará probar nuevas ideas y avanzar en nuestra comprensión del nanocosmos, en estrecha relación con algunas cuestiones fundamentales para la humanidad, como el origen de la complejidad en la naturaleza.

Por delante, quedan seis años de intenso trabajo para cumplir estos objetivos. (A)

Natalia Ruiz Zelmanovitch

es responsable de comunicación de Consolider ASTROMOL, Grupo de Astrofísica Molecular, Instituto de Ciencia de Materiales (ICMM-CSIC).

