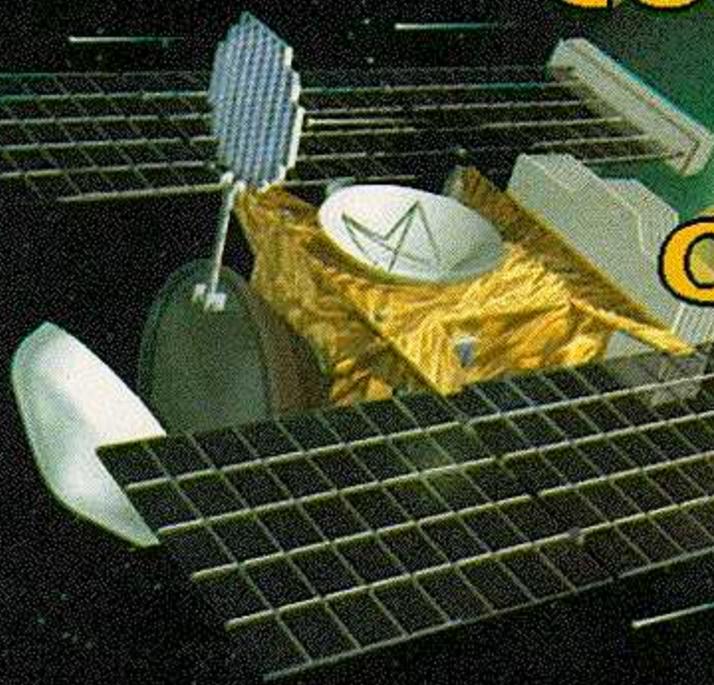


METEORITOS, COMETAS Y EL ORIGEN DE LA VIDA (I)



JORDI LLORCA

En un sentido amplio, los componentes actuales del Sistema Solar son el producto de la evolución química de la materia interestelar; pero las circunstancias y peculiaridades de esta evolución son en gran parte desconocidas. Afortunadamente, existen ventanas a nuestro alcance que nos permiten mirar al pasado y discernir algunos de los acontecimientos que han tenido lugar durante los más de 4.600 millones de años de existencia de nuestro sistema planetario. Estas ventanas las proporcionan determinadas observaciones astronómicas, así como estudios químicos y geoquímicos realizados con rocas de la Tierra, la Luna y, muy especialmente, con meteoritos.



Jordi Llorca es Profesor del Departamento de Química Inorgánica de la Universitat de Barcelona e Investigador vinculado al Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.

El estudio del origen de la vida en la Tierra debe necesariamente sustentarse en el conocimiento de las condiciones y procesos químicos que tuvieron lugar en su entorno, entendiendo como tal no sólo a nuestro planeta sino también al espacio exterior. El Sistema Solar constituye un sistema abierto en el que tuvo, y sigue teniendo lugar, un intercambio de materia orgánica entre entornos que han podido tener composiciones y procesos evolutivos distintos. Las repetidas

colisiones de cometas y meteoritos con cuerpos planetarios, incluido el nuestro, constituyen un buen ejemplo.

ANALICEMOS UN METEORITO

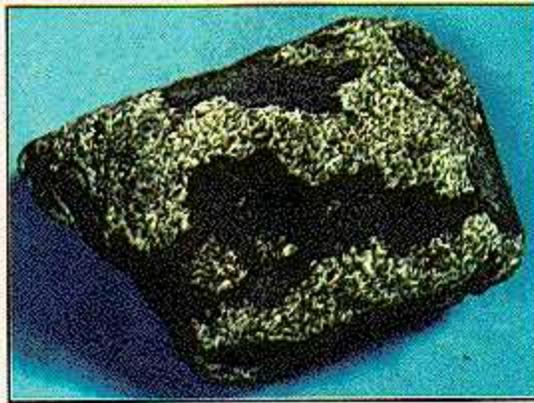
Posiblemente los meteoritos sean las rocas mejor estudiadas. Gracias a ellos sabemos de un modo aproximado cuál fue la composición inicial de la nebulosa solar -al menos en las zonas próximas al cinturón de asteroides- así como las



condiciones de presión y temperatura. Sabemos también las etapas de actividad por las que pasó el Sol, la edad aproximada de nuestro sistema planetario, algunas de las fuentes de calor que afectaron a los componentes iniciales del mismo, los tipos de sólidos que se expelen en las explosiones de supernovas y, asimismo, que el Sistema Solar se halla repleto de material orgánico.

Efectivamente, en los meteoritos más primitivos que se conocen, las denominadas *condritas carbonáceas*, se han encontrado numerosas moléculas orgánicas, algunas de ellas exactamente iguales a las que constituyen a los seres vivos de nuestro planeta.

Pero, antes de discutir el significado de la materia orgánica que se halla presente en este tipo de meteoritos, ¿cómo se analiza uno de ellos para saber que contiene este tipo de material?, ¿cómo se sabe que éste no proviene de una contaminación terrestre, ya que al fin y al cabo los meteoritos atraviesan la atmósfera de nuestro planeta, rica



(Izquierda) La imagen nos muestra la región en la que se creó nuestro mundo al cabo de un millón de años de la formación del Sol. En ella, pequeños granos de polvo se están agregando en planetésimos, los cuales también por agregación darían lugar después a planetas rocosos como el nuestro. (William K. Hartmann)

en moléculas orgánicas, y toman contacto con la superficie?

La separación del material orgánico de un meteorito se realiza mediante un proceso químico de *extracción*. En primer lugar se extraen cuidadosamente unos pocos miligramos de su interior y se trituran; seguidamente se realiza un tratamiento con tetracloruro de carbono (CCl_4) a $50^\circ C$ con el objetivo de extraer las moléculas orgánicas no polares (tales como hidrocarburos), y un tratamiento con metanol (CH_3OH), también a $50^\circ C$, con el fin de extraer las moléculas orgánicas polares (alcoholes, aminoácidos, etc.). Cualquier material de laboratorio que deba entrar en contacto con el meteorito y las disoluciones resultantes se somete a un proceso de oxidación a $600^\circ C$, para evitar cualquier riesgo de contaminación terrestre. Mediante este sencillo proceso se consiguen extraer las moléculas orgánicas de una condrita carbonácea.

No obstante, una gran parte del material orgánico de las mismas (alrededor del 70%) lo constituye un residuo polimérico de estructura poco conocida y con una composición aproximada de un 76% de carbono (C), un 12% de oxígeno (O), un 5% de hidrógeno (H), un 4% de azufre (S) y un 3% de nitrógeno (N), similar en algunos aspectos a los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en el medio interestelar. Para extraer el residuo polimérico debe someterse al meteorito a un tratamiento con ácido fluorhídrico (HF) a

(Derecha) Condrita carbonácea de Orgueil, caída en Montauban, Francia, el 14 de mayo de 1864. Gran parte del ejemplar está recubierto de una corteza de fusión como consecuencia del paso atmosférico del meteorito. Las condritas carbonáceas representan aproximadamente el 5% de todos los meteoritos que caen. Son rocas de un color gris oscuro y de aspecto poco llamativo, pero que pueden llegar a contener hasta un 1% en peso de material orgánico. (Todas las fotografías son cortesía del autor, salvo mención expresa)

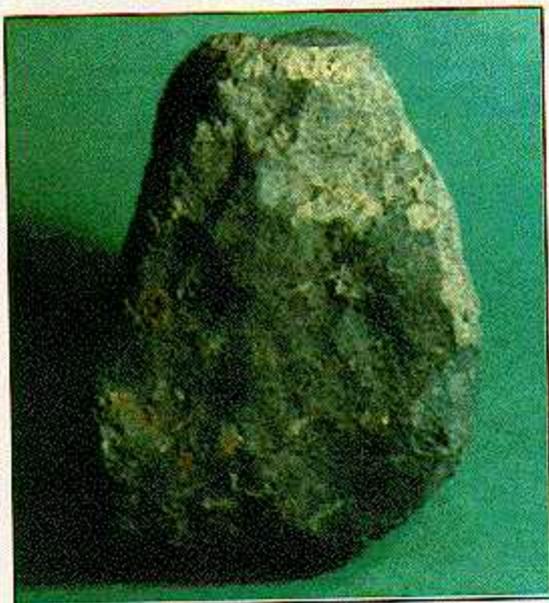
TABLA I.

Compuestos orgánicos identificados en meteoritos de la familia de las condritas carbonáceas.

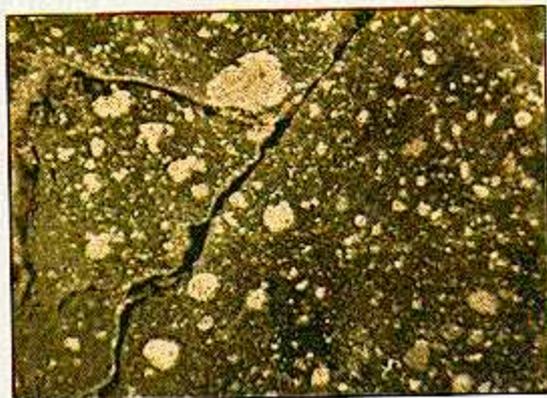
Tipo de compuesto identificados	Concentración de cadena	Compuestos (partes por millón)	Lòngitud
Hidrocarburos alifáticos	> 35	210	C1-C30
Hidrocarburos aromáticos	15-28	87	C6-C20
Alcoholes	11	8	C1-C4
Aldehídos y cetonas	27	9	C1-C5
Ácidos carboxílicos	> 300	42	C1-C12
Ácidos dicarboxílicos	> 30	67	C2-C9
Ácidos hidroxicarboxílicos	15	51	C2-C8
Aminas	8	10	C1-C4
Amidas	55-70	4	C1-C3
Aminoácidos	60	78	C2-C9
Purinas y pirimidinas	1-2	5	-
Otros heterociclos	7	32	-
Ácidos sulfúricos y fosfónicos	5	12	C1-C4
Total	> 570	615	

(En la página anterior) La misión Stardust de la NASA, lanzada en febrero de este año, será la primera en capturar partículas de polvo cometario directamente de un cometa. El cometa escogido es el Wild 2 y la fecha prevista de encuentro será a principios del año 2004. Dos años más tarde llegará a la Tierra una cápsula con el polvo cometario capturado.

(Izquierda)
Condrita carbonácea
de Allende, que se
formó en la nebulosa
solar hace 4.560
millones de años y
contiene algunos
granos de material
interestelar (resto de
una estrella previa que
explotó como
supernova antes de
que naciera nuestro
propio Sol) con ricas
inclusiones de
aluminio y calcio
(CAI). Este meteorito
es una muestra del
trozo de materia más
viejo conocido. (New
England Meteoritical
Services)



(Derecha)
Fotomicrografía del
interior del meteorito
Murchison, caído en
Australia el 28 de
septiembre de 1969.
El campo de visión
tiene aproximadamen-
te 10 milímetros de
anchura. La textura
interna de las
condritas carbonáceas
está constituida por
una matriz de grano
fino que encierra
partículas de grano
más grueso. La
materia orgánica de
estos meteoritos se
concentra en la
matriz, que consta
esencialmente de
silicatos. Las
partículas mayores
pueden tener un
tamaño de varios
milímetros, algunas de
ellas son partículas
redondeadas de
silicatos llamadas
cóndrulos, otras son
inclusiones refracta-
rias de minerales ricos
en calcio, aluminio y
titanio.



100°C y con una mezcla de ácidos fluorhídrico y clorhídrico (HCl) a 60°C, de este modo se consigue disolver a la mayoría de los componentes inorgánicos del meteorito, principalmente silicatos.

Una vez extraída la materia orgánica de una condrita carbonácea, el siguiente paso es *caracterizarla*. Dos de los objetivos que normalmente se persiguen son determinar su composición isotópica -básicamente las relaciones existentes entre los isótopos del deuterio y del hidrógeno (D/H), del carbono 13 y del carbono 12 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) y del nitrógeno 15 y del nitrógeno 14 ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)- e identificar a sus componentes.

Como es fácil imaginar, las técnicas analíticas que se utilizan en la identificación de moléculas individuales son excepcionalmente sensibles, las más utilizadas son la cromatografía de gases y la espectrometría de masas. Por otra parte, la caracterización del residuo polimérico se lleva a cabo mediante técnicas diversas debido a su naturaleza, que incluyen tanto técnicas instrumentales analíticas como otras derivadas de la microscopía electrónica. A partir de la determinación estructural de las distintas moléculas y de su composición isotópica se intenta conocer el origen y evolución química posterior del componente orgánico de los meteoritos en la nebulosa solar.

La composición isotópica del material orgánico de las condritas carbonáceas es muy diferente a la de cualquier componente terrestre, lo que supone una prueba indiscutible de su naturaleza exógena.

Existen otros argumentos que de modo independiente también demuestran que el material orgánico de las condritas carbonáceas no es fruto de la contaminación terrestre, como la ausencia de determinados aerosoles presentes en cualquier proceso de contaminación y la distinta distribución de los isómeros D y L entre los aminoácidos en-

contrados en las condritas carbonáceas (mezclas esencialmente racémicas) y los constituyentes de los seres vivos terrestres (básicamente del tipo L).

Sin lugar a dudas, la condrita carbonácea estudiada de manera más exhaustiva, en cuanto a búsqueda de material orgánico se refiere, es la conocida con el nombre de Murchison. Este meteorito cayó un domingo por la mañana en la localidad de dicho nombre, situada en el municipio de Victoria, en Australia. Era el 28 de septiembre de 1969. En cuestión de segundos, centenares de rocas alcanzaron la superficie de este lugar cubriendo un área de más de doce kilómetros cuadrados.

Su interior está constituido por una matriz extremadamente fina que alberga inclusiones y esferas vítreas de silicatos -llamadas cóndrulos- y una cantidad importante de carbono orgánico, más del 3% de su peso. En este meteorito ya han sido identificadas más de 600 moléculas orgánicas distintas.

EL POLVO COMETARIO TAMBIÉN ALCANZA LA TIERRA

Aparentemente, los cometas representan el material menos alterado y, por tanto, más antiguo del Sistema Solar. Al haberse formado en la parte más externa del mismo, no han sufrido procesos ígneos ni metamórficos como los que han tenido lugar en los planetas rocosos y asteroides, tal y como ponen de manifiesto diversas familias de meteoritos.

Es por ello que, en consecuencia, contienen gran cantidad de componentes volátiles, como agua, metano, metanol, monóxido y dióxido de carbono, etc. Los análisis efectuados principalmente por las misiones espaciales Vega y Giotto, en marzo de 1986, en su encuentro con el cometa Halley permitieron conocer, con un poco más de detalle, la composición del material orgánico que desde hacía tiempo se sabía existía en los cometas.

Gracias a los espectrómetros de masas con los que estaban equipadas las sondas se ha podido deducir que, al menos en el cometa Halley, existen numerosas moléculas orgánicas tales como hidrocarburos, compuestos heterocíclicos, bases nitrogenadas, aldehídos y ácidos carboxílicos.

Además de su componente volátil, los cometas también están formados por material rocoso, seguramente muy parecido a las condritas carbonáceas, que, como polvo cometario, se separa del núcleo del cometa a medida que éste sufre la radiación solar al acercarse a nuestra estrella, y después de formar parte de la denominada cola de polvo del cometa, queda libre en el medio interplanetario.

Cada día, literalmente millones de partículas de polvo cometario son interceptadas por nuestro planeta, de modo que al cabo de un año la Tierra adquiere unas 40.000 toneladas de este material. Estas partículas, debido a su diminuto tamaño (típicamente alrededor de 0,01 milímetros de diámetro) se depositan suavemente en la estratosfera terrestre, donde residen hasta que por efecto de la gravedad alcanzan la superficie de nuestro planeta.

Este proceso de sedimentación paulatina contrasta enormemente con la caída de un meteorito. Los meteoritos, debido a su mayor masa, sufren un proceso de ablación parcial al interaccionar violentamente con las moléculas de aire de la atmósfera terrestre; las partículas de polvo interplanetario, en cambio, apenas interaccionan con la atmósfera y sus características se preservan esencialmente intactas.

Dado que existe polvo cometario en suspensión en la estratosfera es lógico pensar en la manera de recuperarlo para poder así estudiarlo en detalle en el laboratorio. Desde hace años, la recolección de partículas de polvo interplanetario en la estratosfera se realiza con aviones especiales equipados con paneles capturadores, especialmente diseñados para este propósito, constituidos por celdas recubiertas de aceite de silicona y freón en una proporción 20:1, respectivamente.



Hoy en día ya son centenares las partículas capturadas, analizadas y catalogadas como presuntamente provenientes de cometas. De entre los diversos estudios que se llevan a cabo, destacan los encaminados a buscar materia orgánica en estas partículas, ¡a pesar de lo extremadamente difícil que supone analizar partículas con masa inferior a una milésima de miligramo!

En cualquier caso, se ha puesto en evidencia que las partículas de polvo interplanetario contienen material orgánico exógeno, aunque hasta el momento no ha sido posible, sin embargo, identificar de manera individual a ninguno de sus componentes. Uno de los objetivos científicos de las misiones Stardust y Deep Space 4 de la NASA y de la misión Rosetta de la ESA es, precisamente, el de analizar *in situ* el contenido orgánico de los cometas.

La misión Stardust ya está en camino (fue lanzada en febrero de este año) de encontrarse con el cometa Wild-2 en enero del año 2004, momento en el que se hallará a unos cuatrocientos millones de kilómetros de nosotros.

El punto culminante de la misión tendrá lugar cuando la sonda se encuentre a unos cien kilómetros del cometa, momento en el que capturará partículas de polvo cometarias directamente mediante el uso de un aerogel, una sustancia esencialmente inerte de muy baja densidad que permitirá recolectarlas de un modo intacto a través de un proceso de desaceleración progresivo. Posteriormente, una cápsula de la sonda volverá a la Tierra con el polvo preservado en el aerogel, que dos años más tarde, en enero del 2006, se prevé recuperarla en el desierto de Utah, en Estados Unidos.

Si la misión logra su objetivo, será la primera vez que el ser humano analice en un laboratorio un trozo de cometa y, también por primera vez, será posible saber la naturaleza y el grado de complejidad del material orgánico que sabemos existe en los cometas.

No es casualidad que el investigador principal de esta misión sea Donald Brownlee, el descubridor en 1976 de la presencia de partículas de

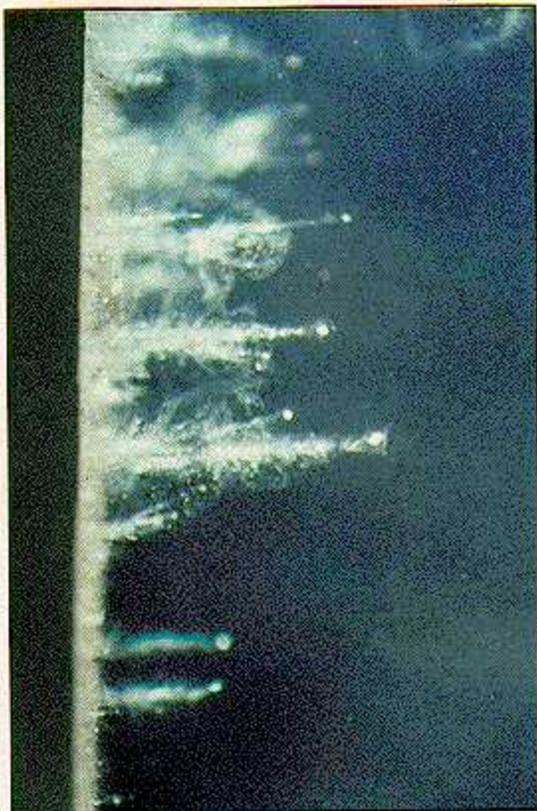


(Izquierda)
Núcleo del cometa Halley fotografiado por la sonda Giotto en 1986. El núcleo del cometa mostró un albedo bajo debido, posiblemente, a la existencia de un recubrimiento oscuro de materia orgánica. Dicho recubrimiento podría ser el resultado parcial de la acción de radiaciones ionizantes sobre el componente volátil del cometa, tal y como indican algunas simulaciones experimentales llevadas a cabo en el laboratorio.

(Derecha)
Partícula de polvo interplanetario capturada en la estratosfera terrestre. Mide 0,01 milímetros y su composición elemental se parece a la de las condritas carbonáceas a excepción de una mayor cantidad de carbono y sustancias volátiles. Este tipo de partículas también contienen materia orgánica. La morfología particular, elevada porosidad y composición mineral de esta partícula sugieren un origen cometario.

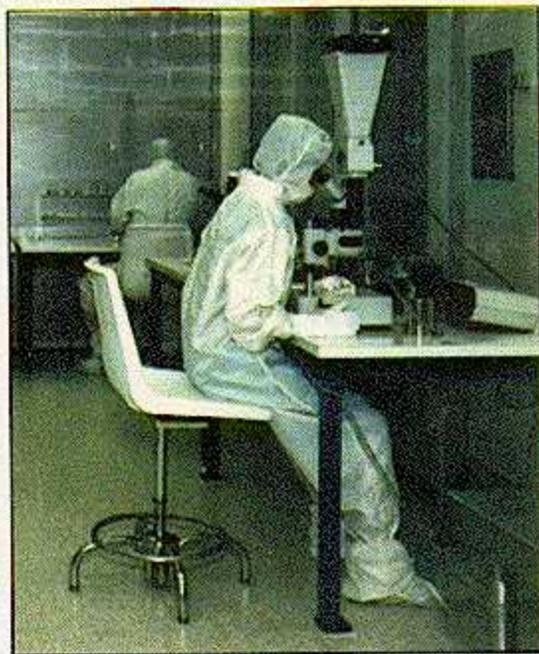
(Izquierda)

La velocidad de impacto prevista de las partículas cometarias con la sonda Stardust es superior a los 20.000 km/h. Con el objetivo de minimizar los efectos del impacto y preservar las partículas lo más intactas posible, la sonda está equipada con un panel recolector que contiene un aerogel, que se muestra en la imagen después de un ensayo de captura de proyectiles terrestres.



(Derecha)

Laboratorio de polvo interplanetario del Johnson Space Center, en Houston, Estados Unidos. La cantidad total de material cometario que quedará atrapado en el aerogel de la sonda Stardust será de unos pocos miligramos, por lo que su análisis posterior en el laboratorio representa un auténtico reto. Será necesario trabajar en ambientes muy bien controlados para evitar cualquier contaminación terrestre.



A pesar de las dificultades técnicas que supone, la posibilidad de obtener directamente una muestra del núcleo de un cometa es realmente excitante, ya que de este modo se mantendrán estrictamente intactas la estructura, composición y concentración de las diversas especies orgánicas allí presentes.

Al igual que Jean François Champolion descifró el alfabeto jeroglífico egipcio en 1822 gracias a la piedra Rosetta, que contiene el mismo texto escrito en tres alfabetos distintos (dos egipcios y uno griego), la misión Rosetta al cometa Wirtanen y la sonda Champolion deben ayudar a descifrar y entender el origen, así como posterior evolución química del material orgánico del Sistema Solar.

polvo interplanetario en la estratosfera terrestre. Naturalmente no todos los cometas son iguales ni tienen la misma composición química, por lo que es difícil saber hasta qué punto van a ser representativos los datos que vaya a obtener la misión Stardust. El cometa Wild-2, no obstante, es un buen candidato a cometa primitivo y, sin lugar a dudas, el análisis de su componente rocoso y orgánico ayudará a entender mejor los procesos relacionados con la evolución prebiótica del Sistema Solar.

Por su parte, la misión europea Rosetta, con lanzamiento previsto para enero del año 2003, estudiará también *in situ* el núcleo del cometa Wirtanen en el año 2012. Durante su encuentro, esta misión enviará la sonda Champolion al núcleo de dicho cometa con el objetivo de tomar una o varias muestras a una cierta profundidad del mismo y traerlas de vuelta a nuestro planeta.

En estos momentos también está programada la realización de otra misión al núcleo de un cometa con la finalidad de coger una muestra del mismo y traerla de vuelta a la Tierra. Se trata de la misión Deep Space 4 de la agencia espacial norteamericana. Su lanzamiento está previsto en abril del 2003, apenas tres meses después de la puesta en órbita de la misión Rosetta. En diciembre del año 2005 tendrá

lugar, a unos 600 millones de kilómetros de nosotros, su encuentro con el cometa Tempel 1, momento en el que se posará una sonda directamente sobre el núcleo y se recogerán diversas muestras a distintas profundidades. En total serán unos 100 cm³ de material cometario que llegarán a la Tierra en el año 2010.

TABLA II.

Misiones espaciales en curso y planificadas para los próximos años, diseñadas especialmente para la recolección y transporte a la Tierra de material cometario.

Nombre de la misión	Stardust	Rosetta	Deep Space 4
Cometa	Wild 2	Wirtanen	Tempel 1
Fecha de lanzamiento	Feb. 1999	Ene. 2003	Abr. 2003
Vehículo	Delta 2 7426	Ariane 5	Delta 7925
Encuentro con el cometa	Ene. 2004	Ago. 2012	Dic.e 2005
Regreso a la Tierra	Ene. 2006	Sept. 2013	Jun. 2010
Agencia espacial	NASA	ESA	NASA

METEORITOS, COMETAS Y EL ORIGEN DE LA VIDA (II)

JORDI LLORCA*

En la primera parte de este artículo, publicada el mes pasado, el autor nos hablaba acerca de los elementos principales que componen un meteorito, especialmente la materia orgánica presente en las condritas carbonáceas, así como sobre los estudios que se están realizando sobre la búsqueda de este tipo de materia en los cometas.

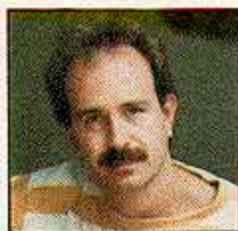
¿CUÁL ES EL ORIGEN DEL MATERIAL ORGÁNICO DE COMETAS Y METEORITOS?

Inicialmente, la nebulosa solar estaba formada por una mezcla no homogénea de gas y polvo a alta temperatura. A medida que se fue enfriando, fueron apareciendo distintas fases sólidas en función, básicamente, de su temperatura de condensación (fotos 1a y 1b).

De este modo, los planetas más cercanos al Sol, los de tipo terrestre, se constituyeron por la acreción de materiales rocosos densos, mientras que los cuerpos más alejados fueron fruto de la suma de materiales volátiles poco densos.

Las condritas carbonáceas se formaron hace unos 4.600 millones de años en una zona de la nebulosa solar que se hallaba a unos 100 ó 150° C de temperatura y de 10^{-5} a 10^{-6} atmósferas de presión.

Los meteoritos primitivos se formaron a partir de la condensación y acreción de material nebuloso bajo estas condiciones físicas. El gas nebuloso estaba formado básicamente por hidrógeno (H_2) y, en mucha menor cantidad, por monóxido de carbono (CO), agua (H_2O), amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S), etc., de manera parecida al gas existente en las nubes moleculares interestelares.



*Profesor del Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Barcelona e Investigador vinculado al Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.

Por tanto, si las moléculas orgánicas de las condritas carbonáceas se sintetizaron a través de procesos químicos en la nebulosa solar, los átomos de carbono que constituyen su esqueleto derivaron, de un modo u otro, del monóxido de carbono del gas nebular; los átomos de nitrógeno del amoníaco, etc.

Desde un punto de vista meramente termodinámico, el monóxido de carbono es la forma más estable del carbono a altas temperaturas bajo condiciones nebulares y, por debajo de los 300-350° C, debería transformarse en metano (CH₄). Ocurre, no obstante, que la transformación del CO en CH₄ está inhibida cinéticamente, por lo que a temperaturas del orden de 250° C, el monóxido de carbono debería sufrir la reacción de *dismutación* a grafito (C) y dióxido de carbono (CO₂). Esto indica que si la nebulosa solar estuvo en equilibrio termodinámico, nunca pudieron sintetizarse en ella las moléculas orgánicas que hoy en día vemos en cometas y meteoritos, por ejemplo.

El razonamiento anterior sería válido considerando únicamente un sistema gaseoso aislado, pero sabemos con certeza que en la nebulosa solar además del gas nebular también existían granos presolares y fases sólidas producto de la condensación del material original, de los cuales tenemos numerosas evidencias precisamente en las condritas carbonáceas.

De entre las distintas fases sólidas destacan algunas fases metálicas que presentan capacidad para comportarse como catalizadores, como por ejemplo la kamacita, una aleación de hierro y níquel abundante en las partículas de polvo interplanetario y condritas carbonáceas.

Harold Urey (premio Nobel de Química en 1934 por descubrir el deuterio, un isótopo del hidrógeno) fue el primero en sugerir en 1953 que el material orgánico presente en los meteoritos podía ser el resultado de reacciones catalíticas similares a la denominada *síntesis Fischer-Tropsch* (una reacción importante desde el punto de vista industrial en la

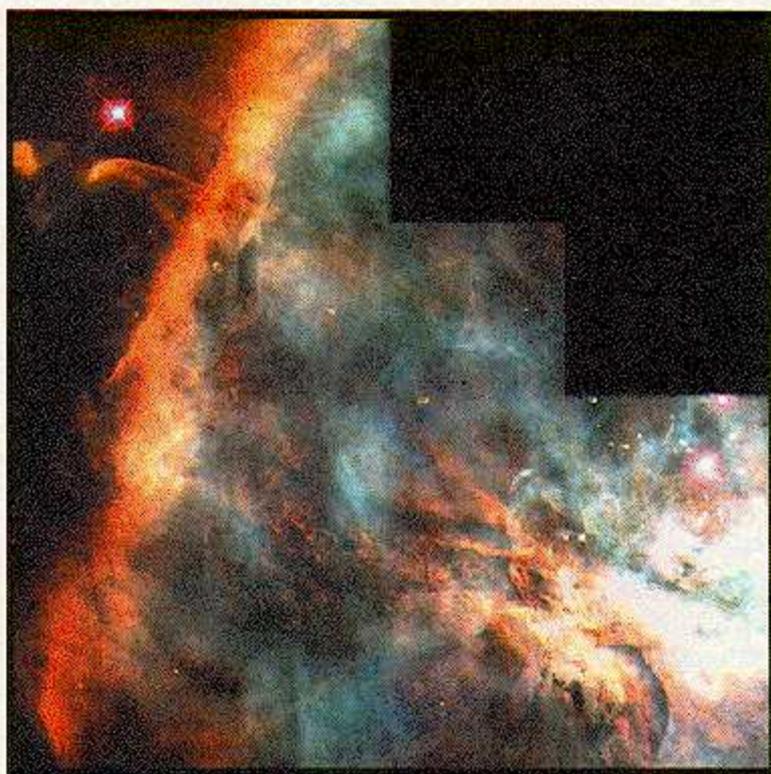


Foto-1a (arriba): Imagen tomada en diciembre de 1993 por el Telescopio Espacial Hubble de una pequeña porción (el campo de visión es de tan sólo 0,14 años luz) de la nebulosa de Orión (abajo foto-1b). De las cinco estrellas jóvenes que se observan, cuatro aparecen rodeadas por presuntos discos protoplanetarios de gas y polvo, al igual que ocurrió en nuestro Sistema Solar hace más de 4.600 millones de años. En ese momento fue posible la síntesis de moléculas orgánicas mediante reacciones catalíticas en fase heterogénea, tal y como se ha puesto en evidencia en distintas simulaciones experimentales. (C.R. O'Dell/Universidad de Rice/ NASA)

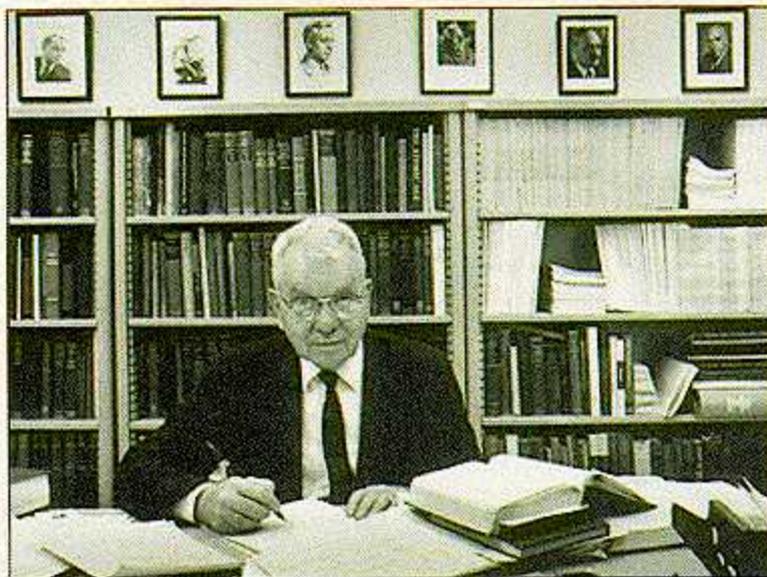
síntesis de hidrocarburos y alcoholes) entre el gas nebular y fases sólidas coexistentes.

Irónicamente, esta idea fue olvidada a causa del éxito de otra de las ideas de Urey (foto 2), la que propugnaba que el efecto de la radiación ultravioleta y las descargas eléctricas en la atmósfera terrestre primitiva pudo resultar en la formación de especies muy reactivas (como por ejemplo radicales libres), las cuales se transformarían espontáneamente en una amplia variedad de compuestos orgánicos, cuya posterior evolución química podría explicar el origen de la vida en nuestro planeta.

En el mismo año, 1953, Stanley Miller demostraba en un experimento histórico que era po-

(En la página anterior): También fue el Hubble el que capturó este brillante asteroide, con una magnitud visual de 18,7, cuando se hallaba alojado en la constelación de Centaurus. Se ha calculado que su diámetro debía ser de 2 km, y que se encontraba a unos 130 millones de kilómetros de nuestro planeta. (R. Evans y K. Stapelfeldt -JPL- y NASA)

Foto 2. Harold Urey.
(Archivo)



sible sintetizar aminoácidos a partir de una mezcla de metano, hidrogeno, agua y amoníaco sometida a descargas eléctricas. El mismo proceso que pudo haber tenido lugar en una atmósfera reductora en la Tierra podría también haber sucedido en la nebulosa solar, dando como resultado los compuestos orgánicos de las condritas carbonáceas.

A partir de este momento se originaron dos corrientes de pensamiento, la que propugnaba que el material orgánico del Sistema Solar era el resultado de reacciones catalíticas en fase heterogénea entre el gas nebular y determinados sólidos con propiedades catalíticas, y la que defendía un origen a través de reacciones entre especies reactivas formadas a partir de descargas eléctricas y radiaciones ionizantes.

A mediados de los años sesenta, Edward Anders realizó en su laboratorio una serie de experimentos en los que hizo reaccionar hidrógeno y monóxido de carbono con diversos catalizadores que se creían presentes en la nebulosa solar, tales como kamacita, magnetita (Fe_3O_4) y filosilicatos.

A pesar de que en la actualidad sabemos que tanto la magnetita como los filosilicatos son fruto de procesos secundarios (y por tanto no existían en la nebulosa solar), y que las condiciones de reacción que usó Anders en sus experimentos difieren notablemente de las condiciones que prevalecían en la nebulosa solar (presiones cuatro o cinco órdenes de magnitud superiores a las nebulares,

mezclas ricas en monóxido de carbono), sus experimentos sirvieron para demostrar que la idea inicial de Urey seguía siendo válida, ya que a partir de la hidrogenación catalítica del monóxido de carbono tuvo lugar la síntesis de numerosas moléculas orgánicas similares a las existentes en las condritas carbonáceas.

En los últimos años se han realizado estudios similares en la Universidad de Barcelona en los que se ha podido demostrar en el laboratorio que la reacción catalítica entre mezclas gaseosas de hidrógeno, monóxido de car-

bono, sulfuro de hidrógeno y amoníaco, y partículas de kamacita bajo condiciones próximas a las nebulares (5×10^{-4} atmósferas, $150-200^\circ C$) también da lugar a la síntesis de moléculas orgánicas, como hidrocarburos y tioles.

Además de la formación de moléculas orgánicas, en estos estudios experimentales también se ha observado la formación de residuos carbonosos sobre las partículas de kamacita, exactamente con la misma estructura y morfología que los presentes en partículas de polvo interplanetario de presunto origen cometario. Parece razonable concluir, por tanto, que la síntesis de moléculas orgánicas en la nebulosa solar mediante reacciones catalíticas en fase heterogénea fue un proceso efectivo y que parte del material orgánico formado se encuentra aún hoy en cometas y meteoritos (foto 3).

Foto 3. Imagen del asteroide Gaspia tomada por la sonda Galileo en 1991. Los asteroides son los cuerpos planetarios donde residieron la mayoría de los meteoritos (unos pocos proceden de Marte, la Luna y posiblemente de cometas que extinguieron todo su componente volátil), y han sufrido procesos de alteración térmica y acuosa que pudieron propiciar la transformación parcial del material orgánico inicial que contenían a estructuras orgánicas más complejas. (JPL/NASA)



Por su parte (y de modo similar al experimento de Miller), Carl Sagan y otros investigadores estudiaron el material orgánico que se produce al someter mezclas compuestas de gases como metano (CH_4), etano (C_2H_6), amoníaco (NH_3), agua (H_2O), formaldehído (HCHO), sulfuro de hidrógeno (H_2S), CH_3OH , etc., a la acción de descargas eléctricas y radiación ultravioleta, con el fin de comprobar hasta qué punto este tipo de reacciones podría haber conducido a la síntesis de material orgánico tanto en cometas y meteoritos como también en la Tierra, Titán y en el medio interestelar.

En este tipo de procesos tiene lugar la disociación de las especies gaseosas moleculares a alta temperatura y la subsiguiente recombinación a baja temperatura de los radicales resultantes, de modo que no existe en principio ningún tipo de selectividad estructural, es decir, que todas las combinaciones estables de radicales son posibles.

La distribución de especies orgánicas en las condritas carbonáceas, en cambio, indica que para cada familia de compuestos solamente existen determinados isómeros, los cuales además son esencialmente los mismos de un meteorito a otro distinto. Por este motivo, si bien en el medio interestelar y en atmósferas planetarias densas pudo tener lugar de un modo extensivo la formación de material orgánico mediante descargas eléctricas y radiación ultravioleta, todo parece indicar que este mecanismo de reacción no predominó en la síntesis de moléculas orgánicas en meteoritos.

NADA ES IMPERTURBABLE

Lógicamente, el material orgánico original de cometas y meteoritos pudo sufrir múltiples procesos de alteración posterior, de modo que parte del mismo podría haber polimerizado a estructuras similares a las presentes en las condritas carbonáceas; podría igualmente haberse degradado a estructuras sin ningún interés prebiótico, como los residuos carbonosos que se observan depositados sobre partículas metálicas en partículas de polvo interplanetario de presunto origen cometario; o podría haber evolucionado químicamente, en el sentido más estricto, a estructuras más complejas.

De hecho, las condritas carbonáceas permiten conocer hasta qué punto el material orgánico original de los meteoritos pudo haber sobrevivido a la larga historia del Sistema Solar. El estudio petrológico e isotópico de estos meteoritos indica que los planetésimos de los cuales proceden sufrieron procesos tanto de alteración térmica como acuosa. La formación de determinadas fases minerales secundarias, la deformación de es-

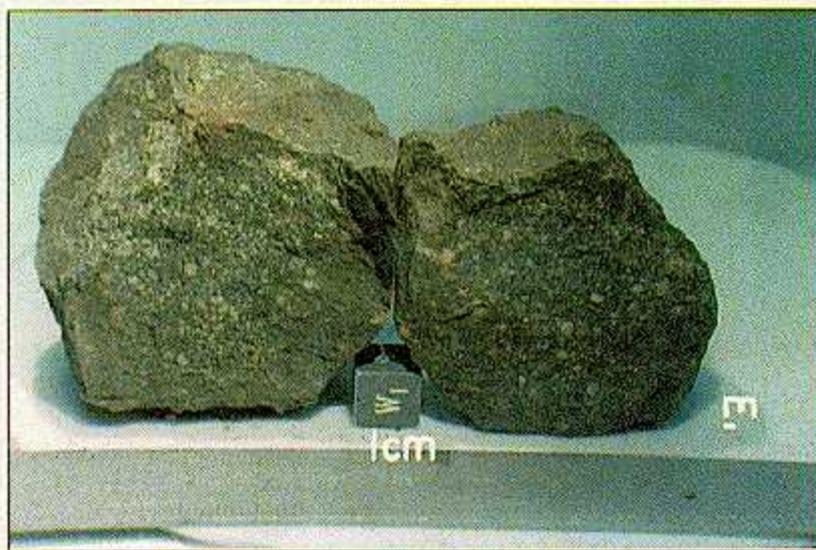


Foto 4 (arriba). Condrita, recogida en Allan Hills (Antártida), que probablemente se formó en la nebulosa solar primitiva, hace unos 4,5 miles de millones de años. (NASA/JPL)

estructuras originales y determinadas relaciones isotópicas constituyen evidencias claras de este tipo de procesos que, con toda certeza, afectaron parcial o totalmente a las moléculas orgánicas presentes (foto 4).

Desde un punto de vista de evolución química, un cambio paulatino en las condiciones ambientales favorece la formación de estructuras más complejas, siempre que éstas no sean por sí mismas destructivas. En el caso de las condritas carbonáceas, la alteración térmica y acuosa dio como resultado la formación de silicatos en capas, o filosilicatos, tales como serpentina, clorita y saponita, a partir de silicatos más simples, como olivino y piroxeno. Los filosilicatos tienen la particularidad de poder actuar también como catalizadores gracias a su estructura en capas; en particular, las moléculas orgánicas con un tamaño y polaridad determinadas pueden interaccionar mediante enlaces débiles con las capas de los filosilicatos y transformarse, mediante reacciones de condensación, dimerización, isomerización, etc., a especies químicas más evolucionadas (foto 5).

Foto 5 (abajo) Meteorito de tipo acondritico, descubierto en Reckling Peak (Antártida). Su composición es basáltica y se formó probablemente cuando, por alguna razón, se produjo la fusión de un asteroide hace 4.500 millones de años. Tras romperse en fragmentos dicho asteroide, esta roca fue capturada por la gravedad terrestre, cayendo sobre la superficie de nuestro planeta. (NASA/JPL)



Un ejemplo bien conocido de la capacidad de los filosilicatos para actuar como catalizadores lo constituye la síntesis de péptidos, que son los componentes básicos de las proteínas, a partir de aminoácidos. Por tanto, es posible pensar en este tipo de procesos en las condritas carbonáceas, donde la formación de filosilicatos por procesos de alteración en los cuerpos progenitores podría haber provocado la consiguiente transformación de las moléculas orgánicas sintetizadas con anterioridad en el medio interplanetario.

Curiosamente, determinados investigadores proponen que las arcillas, que también son filosilicatos, podrían haber jugado un papel determinante en la aparición de la vida en la Tierra, a través de su capacidad para poner en contacto diversas especies orgánicas y facilitar así su transformación en estructuras más evolucionadas.

Por otro lado, el grado de la posible transformación de la materia orgánica de los cometas es, por ahora, una gran incógnita.

Si bien parece ser que los cometas representan el material menos alterado del Sistema Solar, dado que se formaron en las zonas de menor temperatura de la nebulosa solar, también es posible que hayan sufrido procesos de alteración a partir de la energía liberada en la desintegración natural de isótopos radioactivos, tales como el isótopo inestable 26 del aluminio (^{26}Al), la cual, una vez más, se ha puesto en evidencia en los meteoritos gracias al exceso isotópico del magnesio 26 (^{26}Mg) en algunos de sus componentes (el isótopo inestable ^{26}Al se transforma espontáneamente en ^{26}Mg con una vida media de tan sólo 750.000 años).

LA HERENCIA INTERESTELAR

Las reacciones catalíticas en fase heterogénea en la nebulosa solar permiten explicar la existencia de la mayoría del material orgánico residente en cometas y meteoritos.

En el ámbito isotópico, no obstante, existen determinadas anomalías, principalmente en las relaciones D/H (deuterio/hidrógeno), $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (carbono 13/carbono 12) y $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ (nitrógeno 15/nitrógeno 14), que en la actualidad no pueden explicarse a partir de procesos de síntesis nebulares.

En especial, los ácidos carboxílicos y aminoácidos presentes en las condritas carbonáceas están enriquecidos de manera importante en deuterio (D) con respecto al resto del material orgánico e inorgánico de las mismas. El único sitio donde parece posible la síntesis de moléculas orgánicas enriquecidas en deuterio es en el medio interestelar.

Una de las reacciones más eficaces que ocurren en el medio interestelar es la que tiene lu-

gar entre iones y moléculas neutras debido a la falta de energía de activación, de modo que en nubes interestelares densas tiene lugar la siguiente reacción: $\text{H}_3^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3 + \text{H}$.

La razón por la que es posible un enriquecimiento en deuterio en la síntesis de moléculas orgánicas en el medio interestelar es que las reacciones de intercambio entre iones y moléculas neutras favorecen la formación de moléculas deuteradas, ya que el enlace químico entre el carbono y el deuterio es ligeramente más fuerte que el enlace entre carbono e hidrógeno. Una reacción importante es: $\text{H}_3^+ + \text{HD} \rightarrow \text{H}_2\text{D}^+ + \text{H}_2$, y a partir de la especie H_2D^+ ya es posible la síntesis de moléculas más complejas: $\text{H}_2\text{D}^+ + \text{CO} \rightarrow \text{DCO}^+ + \text{H}_2$.

Haciendo un repaso de todas las especies orgánicas identificadas en el medio interestelar mediante técnicas espectroscópicas, se deduce que el grado de complejidad alcanzable mediante reacciones en fase gas entre iones y moléculas neutras en el mismo es limitado.

Por este motivo se cree que los aminoácidos y ácidos carboxílicos de las condritas carbonáceas, por ejemplo, se formaron mediante procesos posteriores a partir de los precursores deuterados de origen interestelar, mediante procesos similares a la denominada *síntesis de Strecker* de aminoácidos: $\text{RCHO} + \text{HCN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{RCH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$, donde la molécula DCN fue la primera molécula deuterada detectada en el espacio interestelar.

En este contexto, parece razonable imaginar que los precursores orgánicos deuterados se *absorben* en la superficie de las partículas de polvo interestelar, donde experimentan reacciones de transformación gracias a la acción de radiaciones ionizantes, etc. De hecho, los datos de absorción infrarroja del medio interestelar son coherentes con la existencia de verdaderos mantos orgánicos alrededor de los granos interestelares, tal y como inicialmente propuso Mayo Greenberg en 1982.

En este sentido es muy posible que los cometas, que muestran un enriquecimiento global en deuterio elevado, sean el resultado parcial de la acreción de granos interestelares recubiertos de mantos orgánicos con un grado de alteración por ahora desconocido. Una vez más hace falta el análisis *in situ* de un cometa (foto 6) para determinar hasta qué punto los cometas han preservado material orgánico interestelar y cómo este material ha sido capaz de evolucionar químicamente.

POLVO DE ESTRELLAS

Según la leyenda, el *fénix* es un ave fabulosa originaria de Etiopía única en su especie y, por tanto, no puede reproducirse como los demás animales. Cuando siente aproximarse el fin de su

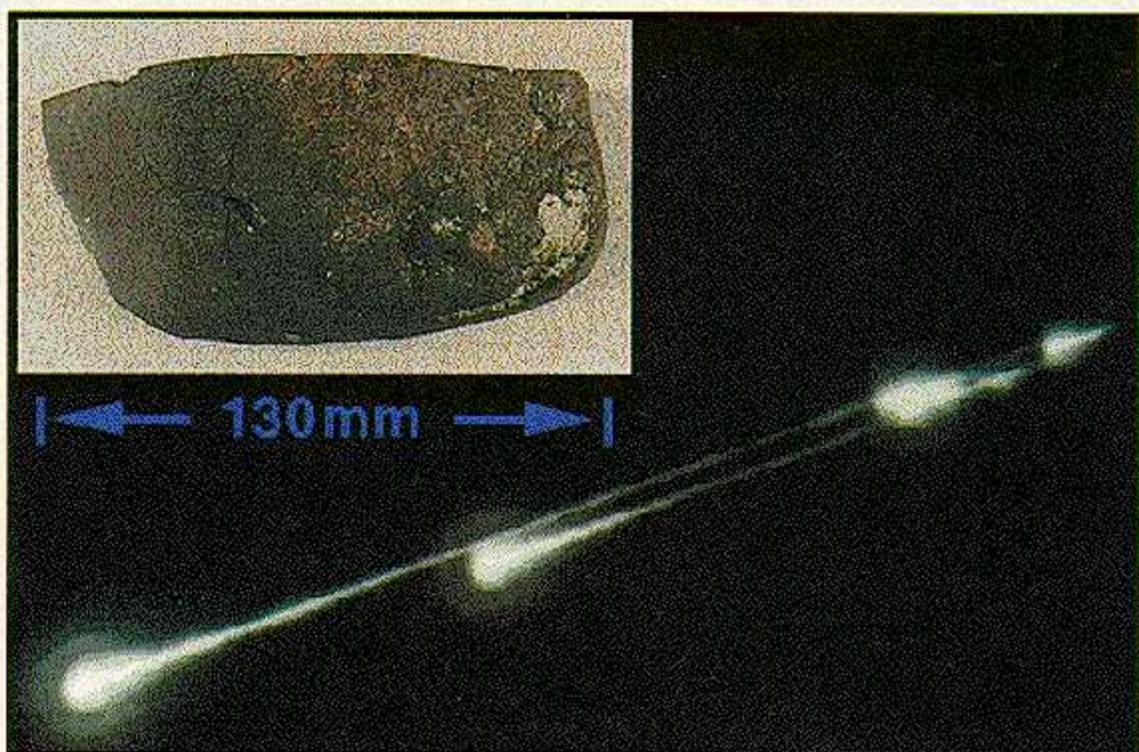


Foto 6: Imágenes del cometa Hyakutake (C/1996 B2), captadas por el Telescopio Espacial cuando se hallaba a unos diez millones y medio de kilómetros de la Tierra. Las imágenes recogen, primordialmente el aspecto de la zona cercana a su núcleo, sólido y helado, proporcionándonos una vista excepcionalmente clara. (H. A. Weaver -Applied Research Corp., HST Comet Hyakutake Observing Team- y NASA)



Foto 7: El Telescopio Espacial captó el trazo de un asteroide, con una magnitud visual de 21,8, cruzando sobre una galaxia en la constelación de Leo. Con un diámetro de 0,8 km (aproximadamente), cuando se realizó la foto estaba situado a una distancia de cerca de 300 millones de kilómetros de la Tierra. (R. Evans y K. Stapelfeldt -JPL- y NASA)

Foto 8. Meteorito de Peekskill, caído el 9 de octubre de 1992 en Nueva York (EE.UU.), y meteorito asociado, observado por miles de personas durante su paso atmosférico. Se hizo famoso por haber impactado contra un coche que se encontraba aparcado. Cada día llegan a la superficie de nuestro planeta más de cien toneladas de material exógeno en forma de meteoritos y polvo interplanetario, la mayoría del cual es de origen cometario. Este material contiene una gran diversidad de moléculas orgánicas sintetizadas en distintos enclaves de nuestro Universo. (Imagen cortesía del autor)



existencia, acumula plantas aromáticas e incienso y fabrica con todo ello una especie de nido. Seguidamente, el ave prende fuego a esta olorosa pira y de sus cenizas surge un nuevo fénix (foto 7).

Haciendo un paralelismo con esta leyenda mitológica, se puede decir que la materia orgánica que existe en nuestro Sistema Solar no ha sido el resultado de un único proceso ni ha tenido lugar en un lugar concreto. Al contrario, sabemos que ha sido el resultado de múltiples procesos de transformación. Al menos una porción de la misma se ha formado en el medio interestelar, posiblemente en lugares muy alejados entre sí, en nubes moleculares distintas, sobre granos interestelares procedentes de atmósferas estelares, explosiones de supernovas, etc.

Quizás parte de estas moléculas, o de precursores orgánicos deuterados, procede a su vez incluso de algún otro sistema planetario. Por su parte, una cantidad importante de moléculas orgánicas parece que fueron sintetizadas en la nebulosa solar, bajo unas condiciones físicas y químicas propicias para que tuvieran lugar reacciones catalíticas en fase heterogénea. Posteriormente, parte de este material orgánico se transformó mediante procesos térmicos y alteración acuosa en los planetesimos donde residieron, dando lugar en algunos casos a estructuras orgánicas con un grado creciente de complejidad.

Durante millones de años la Tierra ha ido acumulando una gran cantidad de material orgánico procedente de partículas de polvo interplanetario. Se estima que la actual incorporación de meteoritos, cometas y polvo interplanetario a nues-

tro planeta es a razón de unos 100.000 kg al día. Teniendo en cuenta que la colisión de cometas y meteoritos con la superficie de un planeta puede llegar a destruir la totalidad del material orgánico que contienen, es lógico concluir que el polvo interplanetario sea el mejor vehículo de transporte de materia orgánica exógena a nuestro planeta (foto 8).

Diversos autores han estimado que se depositaron más de 10^{12} kg de polvo cometario sobre la Tierra durante los primeros 500.000 años de su historia, de modo que el contenido en material orgánico de nuestro mundo en el momento de originarse la vida en ella debió ser considerable.

En este punto existen numerosos argumentos a favor y en contra de una posible relación entre el origen de la vida en nuestro planeta y la existencia de moléculas orgánicas en las condritas carbonáceas y el polvo cometario, ya que, por ejemplo, la posterior evolución química del material orgánico exógeno en el ambiente terrestre es una gran incógnita.

Sea como sea podemos considerarnos como auténtico polvo de estrellas, puesto que la inmensa mayoría de los átomos que constituyen nuestra esencia proceden de antiguas estrellas ahora extintas. Sea como sea formamos parte de un Universo cuya complejidad nos está resultando difícil reconstruir, pero que al mismo tiempo ha propiciado la formación de moléculas orgánicas complejas a partir de unidades más simples, mediante procesos quizás no tan independientes como en un principio podría parecer.