

Meteoritos: Química e Historia*

Jordi Llorca Piqué

Resumen: Actualmente, los meteoritos constituyen una de las fuentes de información más valiosas acerca de la formación y evolución química de nuestro entorno y, gracias a ellos, hoy sabemos, por ejemplo, que hay fullerenos y centenares de moléculas orgánicas en el espacio. Pero antes de ser aceptados como objetos de interés científico, los meteoritos también escribieron algunas de las páginas más curiosas e interesantes de la ciencia. En este artículo, se describen los primeros pasos de la química en el estudio de los meteoritos, así como algunas de sus singularidades.

Palabras clave: Meteoritos, Historia de la Química, elementos químicos, carbono.

Abstract: At present, meteorites are one of the most valuable sources of information about the formation and chemical evolution of our environment and, through their analysis, we know, for instance, that there are fullerenes and hundreds of organic molecules in the space. But before being accepted as interesting objects for science, meteorites also wrote some of the most curious and interesting pages of science. In this article, the first steps of chemistry towards the study of meteorites are described, as well as some of their singularities.

Keywords: Meteorites, History of Chemistry, chemical elements, carbon.

Introducción

La Tierra adquiere cada día unas doscientas toneladas de material que procede del espacio. Por supuesto, si todo este material nos cayera de golpe sería catastrófico, pero la mayor parte está constituido por pequeñas partículas que se vaporizan completamente en la atmósfera por el roce con las moléculas del aire. Las estrellas fugaces son un ejemplo y se originan a partir de la volatilización de partículas de unos pocos milímetros de tamaño. A diferencia de éstas, los meteoritos proceden de objetos interplanetarios lo suficientemente grandes como para sobrevivir a la fricción con la atmósfera y alcanzar así la superficie de nuestro planeta. De este modo, los meteoritos son objetos que provienen del espacio y que podemos estudiar con detalle en el laboratorio para obtener información de gran valor acerca de la composición y evolución química de nuestro entorno.¹ Gracias a su estudio se ha podido determinar, junto a la espectroscopia, cuál es la abundancia y distribución de los elementos químicos en el universo, en las estrellas y en la Tierra. También han servido para estudiar la formación y reactividad de los primeros sólidos en el Sistema Solar, la formación de las primeras moléculas orgánicas en el espacio, y un largo etcétera que incluye aspectos fundamentales tanto de la química como de la física, geología y otras áreas. La historia es rica en episodios relacionados con los meteoritos debido a que su caída suele estar acompañada de fenómenos espectaculares,



Figura 1. Meteorito Hoba, Namibia (cortesía de Albert Casanovas).

tales como bolas de fuego que surcan el cielo originadas por la fricción de estos cuerpos con la atmósfera. No es extraño, por tanto, que las civilizaciones antiguas consideraran a los meteoritos como mensajeros divinos y que se hayan encontrado meteoritos en tumbas, acuñados en monedas, preservados en templos, plasmados en grabados y pinturas, etcétera.

De algún modo, la interpretación y estudio de los meteoritos a lo largo de la historia nos muestra la evolución del pensamiento científico en muchos aspectos, entre los que destaca la química. Podría parecer que el estudio científico de los meteoritos es una disciplina relativamente reciente, pero sus orígenes se remontan a finales del siglo XVIII. En este artículo se describe el trabajo de los primeros químicos en el análisis de los meteoritos y su contexto histórico.

Existen tres grandes tipos de meteoritos. Cerca del noventa y dos por ciento de los meteoritos son del tipo *rocoso*, constituidos esencialmente por silicatos y aluminosilicatos de magnesio, hierro y calcio. El segundo tipo más abundante, con un siete por ciento, son los meteoritos *metálicos*, constituidos básicamente por hierro y níquel y pequeñas cantidades de otros elementos como cobalto, carbono, silicio, azufre y fósforo. Por último, apenas un uno por ciento de los meteoritos es del tipo *metalorrocoso* y están constituidos por dos fases bien diferenciadas de silicatos y metal. El mayor meteorito encontrado hasta el momento es el meteorito metálico Hoba, en Namibia, de unos tres metros de largo y ancho y un metro de altura (Figura 1). Pesa unas sesenta



J. Llorca Piqué

Instituto de Técnicas Energéticas, Universitat Politècnica de Catalunya,
Diagonal 647, 08028 Barcelona.
C-e: jordi.llorca@upc.edu

Recibido: 31/08/2010. Aceptado: 21/09/2010.

* Este artículo es un resumen de la conferencia presentada por el autor en el NoSIC 4 (*Not Strictly Inorganic Chemistry*) Meeting (Prullans, 9–11 de junio de 2010).

Tabla 1. Lista de los meteoritos caídos en España que en la actualidad se conservan en museos.

| METEORITO | LUGAR | AÑO |
|-----------------------|-------------|-------------------|
| Barea | Logroño | 1842 |
| Berlanguillas | Burgos | 1811 |
| Cabezo de Mayo | Murcia | 1870 |
| Cangas de Onís | Asturias | 1866 |
| Cañellas | Barcelona | 1861 |
| Colomera | Granada | 1912 (encontrado) |
| Garraf | Barcelona | 1905 (encontrado) |
| Girona | Girona | 1899 (encontrado) |
| Guareña | Badajoz | 1892 |
| Los Martínez | Murcia | 1894 |
| Madrid | Madrid | 1896 |
| Molina de Segura | Murcia | 1858 |
| Nulles | Tarragona | 1851 |
| Ojuelos Altos | Córdoba | 1926 |
| Olivenza | Badajoz | 1924 |
| Olmedilla de Alarcón | Cuenca | 1929 |
| Oviedo | Asturias | 1856 |
| Quesa | Valencia | 1898 |
| Puerto Lápice | Ciudad Real | 2007 |
| Reliegos | León | 1947 |
| Roda | Huesca | 1871 |
| Sena | Huesca | 1773 |
| Sevilla | Sevilla | 1862 |
| Valencia | Valencia | 1932 (encontrado) |
| Villalbeto de la Peña | Palencia | 2004 |

toneladas, es decir, algo así como quince elefantes adultos juntos. El meteorito rocoso más grande encontrado hasta el momento es Jilin, en China, del que cayeron más de tres mil fragmentos el ocho de marzo de 1976, el mayor de los cuales, de casi dos toneladas de peso, originó un hoyo en el suelo de seis metros de profundidad.

En España, como en todos sitios, también han caído meteoritos, la mayor parte de los cuales se preservan en el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid.² Las caídas y los hallazgos se han registrado por toda la geografía española (Tabla 1).

El meteorito Ojuelos Altos, en Córdoba, de casi seis kilogramos de peso, cayó el diez de diciembre de 1926 en un campo de cultivo de cereales y originó un hoyo de unos treinta y cinco centímetros de profundidad, lo que ocasionó la burla de los pueblos vecinos: *¡Cómo serán los de Ojuelos Altos, que hasta desde el cielo los apedrean!* El trozo más grande del meteorito que cayó el veinte de julio de 1892 en Guareña, Badajoz, pesaba unos treinta y dos kilogramos y cayó a tan sólo cincuenta metros de unos labradores, quienes lo extrajeron del hoyo de setenta y cinco centímetros de profundidad que hizo el meteorito al caer en tierra de labor. También en Badajoz, diversos fragmentos del

meteorito de Olivenza cayeron el diecinueve de junio de 1924 a seis metros de cuatro hermanos que estaban faenando en un olivar. El meteorito que cayó en Molina de Segura, Murcia, en 1858, pesaba ciento trece kilogramos, y el trozo de metal encontrado bajo el suelo de un patio de una casa de Colomera, Granada, en 1912 era de ciento treinta y cuatro kilogramos. A las nueve y media de la mañana del diez de febrero de 1896 tuvo lugar una lluvia de meteoritos sobre Madrid, uno de los cuales atravesó el periódico que estaba leyendo en ese momento un transeúnte en el Paseo de la Castellana. Otra lluvia de meteoritos se registró en Cangas de Onís, Asturias, el seis de diciembre de 1866, con ejemplares de más de once kilogramos. Dos de los meteoritos caídos en las inmediaciones de la ciudad de Oviedo el día cinco de agosto de 1856 atravesaron el tejado de una casa y fueron recogidos en una habitación. La caída más antigua de un meteorito en España de la que se tiene constancia y de la que se conserva aún algún fragmento es la que tuvo lugar el diecisiete de noviembre de 1773 en Villanueva de Sigena, cerca de Sena, Huesca. Pero también existen registros de caídas de meteoritos más antiguas, a pesar que de éstas no se conservan ejemplares. Según Averroes (1126–1198), en el siglo XII cayó un meteorito de tipo metálico de unos cuarenta y cinco kilogramos de peso en las cercanías de Córdoba, que fue utilizado para forjar una espada. Otras crónicas recogen la caída de meteoritos en Roa (Burgos, 1438), Gandía (Valencia, 1520), Los Rábanos (Soria, 1791–1795) y Terrassa (Barcelona, 1704). Precisamente la caída de este último se utilizó con fines propagandísticos en la Guerra de Sucesión Española (Figura 2).³



Figura 2. Documento escrito por Joan Solà, médico de Barcelona, en el que se describe la caída de un meteorito en 1704 y cómo éste debía favorecer a Carlos III en la Guerra de Sucesión Española (Biblioteca Lambert Mata, Ripoll).



Figura 3. Alrededor de las seis de la tarde del día 4 de enero de 2004 se fotografió desde León la bola de fuego que originó el meteorito Villalbeto de la Peña, Palencia (cortesía de Salvador Díez).

Recientemente, han caído dos meteoritos en la geografía española, el cuatro de enero de 2004 en Villalbeto de la Peña, Palencia,⁴ y el 10 de mayo de 2007 en Puerto Lápice, Ciudad Real.⁵ La caída del meteorito Villalbeto de la Peña fue acompañada por una bola de fuego tan espectacular que fue vista por miles de personas desde toda la parte septentrional de la península ibérica, Baleares y sur de Francia (Figura 3). La bola de fuego, más brillante que la Luna llena, se empezó a ver cuando estaba sobrevolando Portugal a unos ochenta kilómetros de altura. Al cabo de unos instantes explotó entre las provincias de León y Palencia, a unos veintiocho kilómetros de altura. La explosión, que fue registrada por la estación sísmica de Arriondas en Asturias y por la estación de infrasonidos de Flers, en Normandía, Francia, causó un estruendo que hizo temblar los cristales de las casas de los pueblos más cercanos. A continuación, una lluvia de meteoritos (Figura 4) cubrió un área elíptica de unos cien kilómetros cuadrados. Según se ha calculado a partir de medidas fotométricas (luminosidad), sísmicas (durante la explosión) y radioisotópicas (⁶⁰Co), el cuerpo que originó el meteorito Villalbeto de la Peña tenía una masa de unos seiscientos kilogramos y entró en la atmósfera a una velocidad de unos sesenta mil kilómetros por hora.⁴ Durante su volatilización parcial en la atmósfera, el hierro metálico de los meteoritos origina magnetita, Fe₃O₄, y los silicatos originan un vidrio que se mezcla con la magnetita. El resultado es una *corteza de fusión* de apenas unos milímetros de grosor de color oscuro. Es muy importante destacar que por debajo de la corteza de fusión el meteorito no se ve alterado, de manera que el estudio de su interior refleja fielmente su estado tal y como era en el espacio.



Figura 4. Fotografías de un ejemplar orientado del meteorito Villalbeto de la Peña. El ejemplar mide unos 10 cm de largo.

Los meteoritos en la antigüedad

A veces los cielos se abren y caen piedras que parecen sangre y fuego que golpean la Tierra.
Plinio el viejo (Historia Natural, s. I d.C.).

En la antigüedad, la caída de un meteorito era casi siempre considerada una fatalidad y/o una señal divina. Pero, al mismo tiempo, siempre que el ser humano ha tenido meteoritos metálicos a su alcance los ha utilizado para elaborar todo tipo de utensilios. Así, los análisis químicos efectuados con objetos de hierro encontrados en múltiples yacimientos arqueológicos anteriores a la edad de hierro han confirmado en todos los casos que fueron fabricados a partir de meteoritos metálicos.⁶ En la tumba del faraón Tutankhamon, del siglo XIV a.C., se encontró una daga y diecisiete herramientas más de hierro hechas con meteoritos metálicos. De la misma manera, se han encontrado broches, collares, amuletos y hachas anteriores a la edad de hierro realizados con meteoritos metálicos en la tumba de la princesa Aashait, Egipto (2050–2025 a.C.), en la tumba de Alaça Hüyük, Turquía (2400–2200 a.C.), en el cementerio, en Ras Shamra, Siria (1450–1350 a.C.), y en Creta, Grecia (1600–1400 a.C.). Se entiende, entonces, que los egipcios llamaran posteriormente al hierro como *trueno del cielo*, los sumerios y los hititas como *fuego del cielo*, los asirios como *metal del cielo* y los griegos como *sideros*, es decir, que *tiene relación con los astros*.

Después de la Edad de Hierro, éste era abundante y fácilmente accesible, de manera que su uso se extendió de manera rápida, pero no en todos los lugares. Por eso en la Edad Moderna los conquistadores españoles se quedaron boquiabiertos al ver que algunas tribus de indios americanos utilizaban hierro para hacer las puntas de sus flechas. ¿Cómo era posible si aquellos indios no dominaban el arte de la forja ni la extracción de hierro de los minerales? ¿De dónde habían obtenido el hierro? Únicamente existía una respuesta posible, y ésta era que los indios trabajaran en frío pedazos de meteoritos metálicos. Cuando Hernán Cortés preguntó a los jefes aztecas de dónde obtenían el hierro de sus flechas y cuchillos, éstos señalaron el cielo. Los esquimales también utilizaron meteoritos metálicos para confeccionar puntas de arpones (Figura 5). En los años 1895–1897, Robert Peary se llevó varios de los fragmentos que utilizaban los esquimales de Cape York, Groenlandia, de más de treinta toneladas, y los vendió al Museo de Ciencias Naturales de Nueva York para sufragar los gastos de su expedición al Polo Norte.⁷



Figura 5. Arpón utilizado por esquimales en Groenlandia en cuya punta se utilizaron trozos del meteorito Cape York.

Los primeros análisis

Qué triste es ver a todo un municipio certificando historias fantásticas. Que cada uno saque sus propias conclusiones acerca de este documento que intenta certificar un hecho falso, un fenómeno físicamente imposible.

Pierre Berthelon (*Journal des Sciences Utiles* 1791, 4, 224), con ocasión de la caída el 24 de julio de 1790 del meteorito Barbotan. Trescientos lugareños testificaron ante notario acerca de la caída de piedras del cielo.

Con la llegada de la Ilustración en el siglo XVIII, la ciencia se fue imponiendo frente a creencias obscuras y supersticiones. Ya no había nada que no pudiera ser estudiado con el método científico. La caída de piedras y trozos de metal del cielo y, sobretudo, las historias fantásticas asociadas con aquellas, no pasaron desapercibidas a los científicos de la época, que de manera mayoritaria creían que eran el resultado de la imaginación de la gente poco acostumbrada a la observación de los fenómenos naturales. Esta creencia se enraizó de manera especialmente fuerte en Francia, entre otras cosas, porque Antoine Lavoisier (1743–1794) dijo que los meteoritos que cayeron el trece de septiembre de 1768 en Lucé eran piritas que habían sido alcanzadas por un rayo y no piedras que hubieran caído del cielo.⁸ Según Lavoisier, “no pueden caer piedras del cielo porque no hay piedras en el cielo”. Esta interpretación ya la había dado doscientos años antes Paracelso (Theophrastus von Hohenheim, 1493–1541) en su libro *Liber Meteorum* para el meteorito que cayó en Ensisheim, Alsacia (el cual, por cierto, aceleró la declaración de una guerra entre Francia y el imperio Germánico).⁷ Bajo la influencia de Lavoisier otros científicos franceses continuaron creyendo durante mucho tiempo que no era posible la caída de cuerpos del espacio y que las piedras y trozos de metal que en ocasiones caían se formaban por fenómenos atmosféricos. Entre estos científicos se encontraban Pierre Simon Laplace (1749–1827) y Siméon Denis Poisson (1781–1840). También había otros científicos que argumentaban que las piedras y trozos de metal que caían del cielo eran objetos expulsados del Sol o por los volcanes de la Luna.

Pero la naturaleza es como es y los meteoritos siguieron cayendo por todos lados y bajo todo tipo de condiciones atmosféricas: días nublados, días claros, días soleados, ..., lo que hacía difícil creer que éstos tuvieran relación con algún tipo de fenómeno atmosférico. De este modo, las numerosas evidencias de caídas de piedras y trozos de metal del cielo empezaron a interesar e intrigar cada vez más a los científicos, puesto que no encontraban ninguna explicación lo suficientemente convincente. La primera investigación profunda que se llevó a cabo para discernir la posibilidad que realmente pudieran caer piedras y trozos de metal del cielo la llevó a cabo Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827), miembro de la Academia de Ciencias de San Petersburgo. Chladni disponía de buena reputación por haber asentado previamente los principios de la acústica moderna.

Ernst Florens Friedrich Chladni

Chladni se interesó por el estudio de los meteoritos a raíz de una conferencia impartida por Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799), profesor de la Universidad de Göttingen, en la que defendió la idea que las estrellas fugaces

las provocaban cuerpos que procedían del espacio cuando éstos entraban en la atmósfera a gran velocidad. De manera inmediata, Chladni quiso dar un paso más e investigar si el mismo argumento podía aplicarse a los meteoritos y registró a fondo las bibliotecas de Göttingen para estudiar los numerosos documentos que, a lo largo del tiempo y en lugares muy alejados entre sí, explicaban caídas de meteoritos en todo el mundo.⁹ Chladni expuso su teoría en un pequeño libro de sesenta y tres páginas publicado en Riga en abril de 1794, *Über den Ursprung der von Pallas gefundenen and anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen*¹⁰ (“Sobre el origen del hallazgo de Pallas y otras masas de hierro parecidas y sobre algunos otros fenómenos naturales relacionados”). Por primera vez se publicaba un libro donde se establecía una conexión entre los meteoritos y el espacio exterior.

El “hallazgo de Pallas” del que trataba el libro de Chladni se refería a un meteorito metalorrocoso que encontraron casualmente en 1749 un cosaco de nombre Yakov y un ingeniero de minas, Johan Caspar Mettich, que buscaba metales preciosos en las montañas de Bolshoi, Siberia.⁷ El meteorito tenía una superficie irregular, era más o menos esférico y de unos setenta centímetros de diámetro. En un principio Mettich vio con interés al bloque de metal, pero al no encontrar ningún otro fragmento parecido en los alrededores, descartó la presencia de ninguna mina y se olvidó del objeto extraño que habían encontrado. Pero Yakov no, sino que volvió al invierno siguiente con un caballo y un trineo para llevarse aquella cosa curiosa de setecientos kilogramos de peso a su casa. En esa época, Pyotr Simon Pallas (1741–1811) estaba haciendo un inventario de la Historia Natural de Siberia por encargo de la Academia de Ciencias de San Petersburgo (la misma a la que pertenecía Chladni). Cuando Pallas examinó el meteorito se dio cuenta que no tenía ningún parecido con cualquier otro objeto que hubiera visto antes. Se trataba de un pedazo de metal macizo con incrustaciones de olivino (un meteorito metalorrocoso). En mayo de 1776, el meteorito fue trasladado a San Petersburgo, y allí estaba Chladni para darlo a conocer al mundo.

En el momento en que se publicó el libro de Chladni, los astrónomos hacía tiempo que estaban preocupados por llenar el vacío planetario aparente que había entre Marte y Júpiter, porque justo allí fallaba la *regla de Titius-Bode*, que racionalizaba perfectamente el número y ubicación de todos los planetas conocidos. Faltaba un planeta entre Marte y Júpiter que aún no se había descubierto y los astrónomos se lanzaron a buscar el planeta perdido, sobre todo después que en 1781 Sir William Herschel (1738–1822) descubriera Urano a la distancia que preveía dicha regla. Finalmente, el uno de enero de 1801, Giuseppe Piazzi (1746–1826) descubrió lo que se creyó que era el planeta perdido y lo llamó Ceres, en honor a la diosa romana de la agricultura. Pero Ceres no era lo suficientemente brillante como para ser considerado un planeta y otros astrónomos siguieron buscando. El año siguiente, Heinrich Wilhelm Olbers (1758–1840) descubrió otro cuerpo también pequeño, que bautizó con el nombre de Pallas, a la misma distancia que Piazzi había encontrado Ceres. Poco después, en 1804 y 1807, ya se habían descubierto dos cuerpos más entre Marte y Júpiter, Juno y Vesta, y el número fue creciendo año tras año. Lo que los astrónomos encontraron

no fue un planeta sino una colección de pequeños planetas, los *asteroides*. Ante el hecho de la existencia de numerosos asteroides, la teoría de Chladni según la cual las piedras y trozos de metal que caían del cielo provenían de cuerpos en el espacio en órbita alrededor del Sol fue adquiriendo cada vez más consistencia y credibilidad. Por otro lado, y de manera casi paralela al descubrimiento de los asteroides, se empezaron a realizar los primeros análisis químicos detallados de meteoritos. El pionero en el análisis de meteoritos metálicos fue Joseph Louis Proust, mientras que Edward Howard se dedicó a los de naturaleza rocosa.

Joseph Louis Proust y el meteorito Campo del Cielo

En 1799, mientras estaba en España, Joseph Louis Proust (1754–1826) leyó en los *Annales de Chimie* un artículo que Miguel Rubín de Celis (1746–1799) escribió sobre el meteorito Campo del Cielo,¹¹ encontrado en Argentina. A Proust le pareció tan interesante el artículo que escribió a Rubín de Celis pidiéndole un trozo del meteorito para analizarlo. Lo primero que sorprendió a Proust fue el estado nativo del metal, es decir, encontrar el metal libre, dado que en la corteza terrestre el hierro se presenta en los minerales en estado oxidado debido a la presencia de oxígeno de la atmósfera. Realizó los ensayos químicos pertinentes y encontró que la muestra de Campo del Cielo consistía en una aleación con una cantidad aproximada de 90% de hierro y 10% de níquel¹² (no fue hasta unos años antes que Proust analizara el meteorito que el níquel fue reconocido como un elemento químico nuevo tras su descubrimiento, en 1751, por Axel Cronstedt). A partir de ese momento, uno de los criterios más utilizados para identificar meteoritos es, precisamente, la cantidad de níquel que contienen, puesto que la concentración de níquel en un meteorito es un orden de magnitud mayor que la de cualquier roca de la corteza terrestre.

Proust fue el primero en encontrar níquel en un meteorito y señaló que posiblemente su interior brillante (Figura 6) habría sido el responsable que en su día se pensara que el meteorito contenía plata. Efectivamente, la historia arranca en 1576, cuando el capitán Hernán Mexia de Miraval condujo una expedición a la península del Chaco, Argentina, con la finalidad de hallar una gran masa de metal que utilizaban los indígenas para fabricar puntas de flecha y otros utensilios.⁷ Fue la primera expedición destinada a encontrar un meteorito de la cual se conservan documentos escritos. Mexia de Miraval encontró el bloque de metal, de varios metros de longitud, y pensó que se trataba de la parte más externa de una gran mina de hierro. Durante los años siguientes nadie dio un paso para explotar la supuesta mina hasta que en siglo XVIII apareció la noticia que la mina de hierro también contenía plata... Así fue cómo doscientos años después Bartolomé Francisco de Maguna capitaneó la segunda expedición a Campo del Cielo en 1774. La expedición de Francisco de Maguna encontró el bloque de metal con facilidad gracias al informe de Mexia de Miraval, y calculó su peso en veintitrés toneladas. Francisco de Maguna sacó muestras del bloque de metal (*Mesón de fierro*) y las envió a las Cortes Reales de Madrid. Unos meses más tarde llegó un informe de las Cortes Reales en el que se decía que el metal estaba

constituido por un 80% de hierro de pureza extraordinaria, ¡y que el 20% restante era plata! El virrey de Buenos Aires, Pedro de Ceballos, solicitó urgentemente al rey de España un cargamento de mercurio para poder hacer la extracción de la plata. El cinco de junio de 1778 se enviaron cerca de noventa toneladas de mercurio desde Almadén a Buenos Aires. Mientras todo esto ocurría, otro oficial, Francisco de Serra y Canals, no se acababa de creer el informe de las Cortes Reales y realizó, por su cuenta, más análisis químicos, encontrando que en las muestras del Mesón de fierro no había rastro alguno de plata. Cuando el virrey se enteró que los análisis realizados por Serra y Canals no concordaban con el informe de las Cortes Reales no dudó en encargar a otro explorador una nueva expedición al Chaco para extraer nuevas muestras. La tercera expedición a Campo del Cielo partió el veinte de julio de 1779 y fue capitaneada por Francisco de Ibarra. Francisco de Ibarra volvió con nuevas muestras del bloque de metal y el Virrey las envió a Madrid para que fueran analizadas otra vez, ¡ya no había más plata! No se sabe qué es lo que hicieron en Buenos Aires con las noventa toneladas de mercurio, pero lo cierto es que a finales del siglo XVIII el hierro ya era lo suficientemente interesante en sí mismo y su demanda era cada vez mayor, de modo que en 1783 el virrey organizó otra expedición, esta vez encabezada por el académico Miguel Rubín de Celis, que tenía como objetivo delimitar el potencial del Campo del Cielo como mina de hierro. Rubín de Celis mandó cavar a los más de doscientos hombres que lo acompañaban una fosa alrededor del Mesón de fierro y lo que encontraron fue una masa de hierro muy irregular y llena de cavidades. Pero lo que más sorprendió a todos fue que se trataba de un bloque aislado de metal, no una mina como se creía. Rubín de Celis no contempló la posibilidad que el Mesón de fierro pudiera ser un meteorito, sino que concluyó que se trataba de un bloque expulsado por un volcán. De este modo llegó a la conclusión que el bloque de metal no tenía ningún interés como para ser explotado como fuente de hierro y allí lo dejó. Rubín de Celis escribió un informe detallado de su expedición y del Mesón de fierro que fue traducido al inglés, francés y alemán y publicado en las principales revistas científicas de toda Europa, incluyendo los *Annales de Chimie*, donde lo leyó Proust.



Figura 6. Meteorito de Campo del Cielo. El aspecto metálico y brillante de su interior se debe a que está constituido esencialmente por aleaciones de hierro y níquel junto a otros elementos en estado metálico. El ejemplar mide unos 6 cm de lado.

Edward Howard y Jacques Louis de Bournon

Mr. Howard está analizando ciertas piedras producidas por meteoros feroces, cuyos componentes abrirán con toda probabilidad nuevas especulaciones y discusiones.

Joseph Banks (1800), con ocasión de la entrega de la medalla Copley de la Royal Society a Edward Howard.

Con todo esto, mientras Proust hablaba del metal que caía del cielo como un material con características propias y completamente distinto a todas las aleaciones que hasta entonces se conocían, empezaron a estar disponibles otros meteoritos que se habían visto caer en distintos lugares y que añadían material fresco al que ya existía. Así, por ejemplo, el dieciséis de junio de 1794, poco después que el libro de Chladni viera la luz, cayó una auténtica lluvia de piedras en Siena, Italia, donde se recogieron más de doscientos fragmentos. Un año y medio después, el trece de diciembre de 1795, un meteorito de gran tamaño cayó en Wold Cottage, Reino Unido. También hubo una lluvia de meteoritos sobre Benarés, India, el diecisiete de diciembre de 1798, y en el mismo año otra en Salles, cerca de Lyon, Francia. La sucesión de todas estas caídas y el interés creciente que había suscitado el libro de Chladni en las sociedades científicas hizo que Sir Joseph Banks, presidente de la Royal Society de Londres, al ver que las muestras que había obtenido de las caídas de Siena y Wold Cottage guardaban un parecido intrigante, pidiese al químico Edward Howard (1774–1816) que las analizase para tratar de saber qué eran.

Howard se tomó el reto muy en serio y en unos meses consiguió además muestras de otros meteoritos rocosos, como el que cayó en Senegal en 1716 y en Steinbach y Tabor, Bohemia, en 1724 y 1753. Con todo este material en sus manos, Howard pidió la ayuda de Jacques Louis de Bournon, conde de Bournon (1751–1825), otro destacado químico que se vio obligado a huir de Francia durante el periodo del Terror. Jacques Louis de Bournon disgregó de manera manual y con mucha paciencia cada una de las piedras y clasificó su contenido en cuatro tipos de componentes bien diferenciados. Estos eran granos de metal, granos de sulfuros, unas esférulas pequeñas de entre 0,2 a 1 milímetro de diámetro que llamó con el nombre de “glóbulos curiosos” y el resto o matriz que mantenía unidos a los componentes anteriores (Figura 7).



Figura 7. Interior de un meteorito rocoso como los analizados por Howard y Louis en el que se distinguen los “glóbulos curiosos” o cóndrulos, los granos de metal y de sulfuro y la matriz. La fotografía corresponde a unos 6 cm de lado.

A continuación, Howard analizó cada uno de los componentes¹³ de cada meteorito de forma separada y encontró, en primer lugar, que los granos de metal eran aleaciones de hierro y níquel similares a las que Proust había encontrado en los trozos de metal errático de Campo del Cielo. En segundo lugar, los granos de sulfuro tenían la composición estequiométrica correspondiente al sulfuro de hierro(II), o FeS. Howard y de Bournon bautizaron a esta fase mineral inicialmente como *pirita rara* (la pirita es FeS₂), que más tarde se llamaría troilita, en honor al monje benedictino Dominic Troili, quien describió en el año 1766 la caída de un meteorito sobre Albareto, en Italia. En tercer lugar, fueron los primeros en describir y estudiar los “glóbulos curiosos”, que ahora conocemos con el nombre de *cóndrulos* y son gotas de silicatos fundidos y enfriados de manera repentina en el espacio. Los dos investigadores observaron, además, que todos los meteoritos que habían estudiado con tanto detalle eran muy parecidos entre ellos, pero en cambio muy diferentes a cualquier otra roca de la Tierra.

Jean Baptiste Biot y el meteorito L’Aigle

Al final encontré algunas de las piedras, y sus características físicas me parecieron que no admitían duda alguna acerca de la veracidad de su caída. Jean Baptiste Biot (Bibliotheca Britannica. 1803, 23, 394), con ocasión de la caída del meteorito de L’Aigle.

El veintiséis de abril de 1803, alrededor de la una del mediodía, tuvo lugar la caída de más de tres mil piedras en L’Aigle, Normandía, Francia, a unos ciento cuarenta kilómetros al noroeste de París. La Academia de Ciencias francesa, inquieta con los resultados de Proust y Howard que contradecían a Lavoisier, encargó el estudio del acontecimiento al joven Jean Baptiste Biot (1774–1862), de veintinueve años. Biot guardaba en un bolsillo los meteoritos que iba encontrando o que la gente le iba dando, y en el otro llevaba una libreta donde anotaba con todo detalle los relatos que contaban los campesinos, militares, curas, comerciantes, ... Biot realizó un estudio sistemático y muy meticuloso acerca de la caída del meteorito de L’Aigle. Fue el primero en realizar un trabajo de campo para estudiar la distribución de los fragmentos de la lluvia de meteoritos (Figura 8), que resultó ser la de una elipse de once kilómetros cuadrados con una distribución granulométrica perfecta, con los ejemplares más pesados en el extremo más alejado del eje mayor respecto a la bola de fuego y los más pequeños en el otro extremo. Esta distribución estaba de acuerdo con la explosión en el aire de un cuerpo viajando de manera oblicua a gran velocidad que, además, tuvo lugar en un día totalmente soleado. En palabras del mismo Biot: “...le mardi 6 floréal de l’an XI [en esa época en Francia se utilizaba el calendario revolucionario] vers une heure de l’après-midi, l’air était tranquille, le ciel était serein, quand on aperçut de Caen, de Pont-Audemer, et des environs d’Alençon, de Falaise et de Verneuil, un globe en flammes, d’un éclat très brillant, et qui se mouvait dans l’atmosphère avec beaucoup de rapidité.” (“... el martes 6 de floreal del año XI hacia la una de la tarde, el aire estaba en calma, el cielo estaba sereno, cuando se vio desde Caen, desde Pont-Audemer y desde los alrededores de Alençon, desde Falaise y Verneuil, un globo en llamas, de un brillo extraordinario, y que se movía en la atmósfera con gran rapidez.”).



Figura 8. Mapa elaborado por Jean Baptiste Biot que muestra la elipse de distribución de los fragmentos del meteorito de L'Aigle.

Los meteoritos que recogió Biot en L'Aigle eran, una vez más, muy parecidos a los que se habían recogido en los últimos años en todo el mundo. Las conclusiones de Biot, recopiladas en un extenso informe,¹⁴ estaban totalmente de acuerdo con las ideas expuestas en el libro de Chladni. La descripción de la distribución elíptica de las piedras caídas en L'Aigle junto con todos los datos y relatos recogidos del acontecimiento permitieron a Biot ingresar en la Academia de Ciencias francesa. En el día de su ingreso, el presidente de la Academia dijo de Biot que “*se descubre a un hombre que con su penetración, pensamiento y paciencia había constatado este trastorno aparente de la naturaleza.*”

Gracias a los trabajos de científicos como Chladni, Proust, Howard y Biot se pasó en pocos años de considerar a las piedras y trozos de metal que caían del cielo como rarezas fantásticas a tenerlas como una de las muestras más apreciadas y valiosas desde el punto de vista científico. Si estos objetos eran fragmentos de otros mundos que se encontraban deambulando por el espacio, entonces su estudio tenía que ser fascinante y tenía que permitir, por primera vez, saber cómo podían ser otros cuerpos del universo. Los meteoritos dejaron de ser “trastornos de la naturaleza” para convertirse en muestras científicas exclusivas. Así fue como los museos de ciencia de todo el mundo se interesaron por conseguir muestras de meteoritos en sus vitrinas. Hoy en día, algunas de las colecciones de meteoritos más antiguas y emblemáticas se encuentran en la Smithsonian Institution, en Washington, y en los Museos de Historia Natural de Londres, París, Nueva York, Chicago, Berlín y Viena. Todas ellas juntas suman decenas de miles de fragmentos correspondientes a unas tres mil caídas distintas.

El carbono y los meteoritos

En 1868, el químico francés Pierre Eugène Marcelin Berthelot (1827–1907) identificó en el meteorito caído cuatro años antes en Orgeuil, al sur de Montauban, Francia, compuestos orgánicos.¹⁵ En aquella época, las técnicas analíticas no pudieron discernir si aquellos compuestos procedían del espacio o bien eran debidos a la contaminación terrestre y el tema de la posible existencia de compuestos orgánicos en

meteoritos no quedó claramente establecido. Los químicos tuvieron que esperar un siglo para disponer de material fresco proveniente de otro meteorito rico en carbono, el meteorito Murchison, caído el veintiocho de septiembre de 1969 en Australia. La llegada del meteorito Murchison tuvo lugar en el momento oportuno, precisamente unos pocos meses después que el ser humano fuera a la Luna, es decir, justo en el momento que muchos laboratorios habían estado años preparándose para analizar las muestras que los astronautas tenían que traer consigo. El análisis minucioso efectuado con el meteorito Murchison, justo después de su caída, permitió demostrar que, verdaderamente, en algunos meteoritos rocosos hay moléculas orgánicas que proceden del espacio. Hasta el momento se han encontrado más de seiscientos moléculas orgánicas distintas con una amplia variedad de estructuras y grupos funcionales y aún quedan otras muchas por identificar (Tabla 2).¹⁶ Los aminoácidos encontrados en los meteoritos, por ejemplo, a diferencia de los aminoácidos de los seres vivos terrestres, que, en su mayoría, son isómeros del tipo L, son mezclas racémicas de isómeros L y D. Además, se han encontrado más de ochenta aminoácidos distintos en los meteoritos, muchos más de la veintena habitual de aminoácidos en los seres vivos. Otra evidencia del origen no terrestre de los aminoácidos en los meteoritos radica en que su distribución isotópica de carbono, nitrógeno e hidrógeno está enriquecida en ¹³C, ¹⁵N y deuterio con respecto a los estándares terrestres.

Tabla 2. Familias de moléculas orgánicas encontradas en el interior del meteorito Murchison (#id se refiere al número de moléculas identificadas).

| Tipo de compuesto | ppm | # id | ejemplos |
|--------------------------------|---------|------|---|
| Hidrocarburos alifáticos | 35 | 210 | isobutano |
| Hidrocarburos aromáticos | 25 | 87 | fenantreno |
| Alcoholes | 11 | 8 | etanol |
| Aldehídos y cetonas | 27 | 9 | formaldehído |
| Ácidos carboxílicos | 350 | 63 | ácido valérico |
| Ácidos hidroxicarboxílicos | 15 | 101 | ácido láctico |
| Aminas | 8 | 10 | propilamina |
| Amidas | 62 | 4 | urea, guanilurea |
| Aminoácidos | 60 | 78 | glicina |
| Purinas y pirimidinas | 2 | 5 | adenina, uracilo |
| Otros heterociclos | 7 | 38 | dibenzotiofeno |
| Carbohidratos | 60 | 27 | glucitol |
| Ácidos fosfónicos y Sulfónicos | 65 | 12 | metilsulfónico |
| Polímeros | >14.300 | - | C ₁₀₀ H ₄₈₋₇₁ N _{1,8-3} O ₁₂ S ₂ |
| Total | >15.000 | 652 | |

Parte de las moléculas orgánicas o sus precursores pudieron formarse en nubes interestelares densas (esto explicaría las relaciones isotópicas encontradas), donde posiblemente se adsorbieron sobre la superficie de granos minerales o hielos. Las radiaciones ionizantes pudieron aportar la energía necesaria para formar nuevos enlaces químicos y originar así nuevas moléculas más complejas. Posteriormente, y ya en la nebulosa solar, se pudieron sintetizar nuevas moléculas orgánicas a través de reacciones entre los gases nebulares (H_2 , CO, H_2S ,...) y granos sólidos con propiedades catalíticas, como las partículas metálicas de hierro-níquel que abundan en los meteoritos. Una de las reacciones más plausibles en este escenario es la síntesis *Fischer-Tropsch*,¹⁷ que utiliza hidrógeno y monóxido de carbono para originar hidrocarburos y compuestos oxigenados en presencia de un catalizador de hierro.

Todavía no sabemos si las moléculas orgánicas que han llegado a la Tierra acompañando a los meteoritos y los cometas (también en los cometas hay una gran diversidad de moléculas orgánicas)¹⁸ han podido tener relación con el origen de la vida en nuestro planeta. Es una cuestión muy estimulante que sigue abierta, porque ahora sabemos muy bien que la química orgánica no es exclusiva de la Tierra. Existe el consenso que antes de la aparición de la vida en la Tierra tuvieron que existir *sopas primitivas* en las que las moléculas orgánicas simples empezaron a interactuar entre ellas en un medio acuoso para originar nuevas moléculas orgánicas más complejas. Posiblemente, las arcillas jugaron aquí un papel importante, puesto que pudieron actuar como catalizadores de estas reacciones. Justamente los meteoritos como Orgueil y Murchison son ricos en arcillas originadas a partir de la alteración acuosa de otros silicatos. Además, se ha demostrado que las moléculas orgánicas de los meteoritos se encuentran en contacto con las arcillas, es decir, o bien se han formado o bien se han adsorbido en éstas.¹⁹

Otra estructura de carbono que se ha identificado en algunos meteoritos rocosos son los fullerenos.²⁰ La cantidad de fullerenos presentes en los meteoritos es realmente pequeña, alrededor de 0,02 partes por millón, pero suficiente para que los podamos estudiar con las técnicas analíticas actuales. Una de las características más notables de los fullerenos es su estructura cerrada, con una cavidad interior capaz de encerrar otras especies químicas. Al sintetizarse en el espacio, los fullerenos encapsulan principalmente helio, dada su gran abundancia elemental. Si ahora analizamos la distribución isotópica del helio capturado en los fullerenos encontramos que la relación $^3He/^4He$ es más del doble de la que tenemos en la Tierra, lo que demuestra que el helio y el fullereno de los meteoritos tienen un origen presolar (el 3He se formó en grandes cantidades en el big bang). Además de su interés intrínseco como material presolar, los fullerenos han resultado ser una herramienta muy útil para determinar el origen de la extinción masiva que tuvo lugar en la Tierra hace unos sesenta y cinco millones de años (límite K-T) y en la que desaparecieron los dinosaurios. En la capa de sedimentos del límite K-T se han encontrado fullerenos con la misma relación isotópica de helio que los fullerenos de los meteoritos,²¹ lo que indica que esta extinción masiva estuvo relacionada con el impacto de un gran meteorito.

Bibliografía

1. J. Llorca, "Aprendre química amb els meteorits", *Revista de la Societat Catalana de Química* **2005**, 6, 70–77.
2. C. Martín Escorza, "Fenómenos meteoríticos ocurridos en España", *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza* **1987**, 3, 51–68.
3. J. Llorca, S. Vega, "Foc sobre Terrassa", *Sàpiens* **2004**, 17, 36–39.
4. J. Llorca, J. M. Trigo, J. L. Ortiz, J. A. Docobo, J. García, A. Castro, A. E. Rubin, O. Eugster, W. Edwards, M. Laubenstein, I. Casanova, "The Villalbeto de la Peña meteorite fall: I. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field and petrography", *Meteoritics and Planetary Science* **2005**, 40, 795–804.
5. J. Llorca, I. Casanova, J. M. Trigo, J. M. Madiedo, J. Roszjar, A. Bischoff, U. Ott, I. A. Franchi, R. C. Greenwood, M. Laubenstein, "The Puerto Lápice eucrite", *Meteoritics and Planetary Science* **2009**, 44, 159–174.
6. J. K. Bjorkman, "Meteors and meteorites in the ancient near east", *Meteoritics* **1973**, 8, 91–132.
7. J. Llorca, *Meteoritos y cráteres*, Ed. Milenio, Lleida, **2004**.
8. A. D. Fourgeroux, L. C. Cadet, A. Lavoisier, "Rapport fait à l'Académie Royale des Sciences, d'une observation communiquée par M. L'Abbe Bachelay, sur une pierre qu'on prétend être tombée du ciel pendant un orage", *Journal de Physique, de Chimie et d'Histoire Naturelle* **1777**, 2, 251–255.
9. U. B. Marvin, "Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827) and the origins of modern meteorite research", *Meteoritics and Planetary Science* **1996**, 31, 545–588.
10. E. F. F. Chladni, *Über den Ursprung der von Pallas Gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und Über Einige Damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen*, Johann Friedrich Hartknoch, Riga, **1794**.
11. M. Rubín de Celis, "An account of a mass of native iron found in South America", *Philosophical Transactions of The Royal Society of London* **1788**, 78, 37–42.
12. J. L. Proust, "Sur le fer natif de Pérou", *Journal de Physique, de Chimie et d'Histoire Naturelle* **1799**, 49, 148–149.
13. E. C. Howard, with J. L. de Bourmon and J. L. Williams, "Experiments and observations on certain stony and metallic substances, which at different times are said to have fallen on the Earth; also on various kinds of native iron", *Philosophical Transactions of The Royal Society of London* **1802**, 92, 168–175.
14. J. B. Biot, "Relation d'un voyage fait dans le département de l'Orne pour constater la réalité d'un météore observé à l'Aigle le 6 floréal an XI", Baudouin, Paris, **1803**.
15. P. E. M. Berthelot, "Carbonaceous Matter of the Orgueil Meteorite Purified as much as possible by Solvents Following Complete Oxidation", *Journal für Praktische Chemie* **1869**, 106, 254.
16. J. Llorca "Organic matter in meteorites: A review", *International Microbiology* **2004**, 7, 239–248.
17. J. Llorca, I. Casanova, "Formation of carbides and hydrocarbons in chondritic interplanetary dust particles: A laboratory study", *Meteoritics and Planetary Science* **1998**, 33, 243–251.
18. J. Llorca, "Organic matter in comets and cometary dust: A review", *International Microbiology* **2005**, 8, 5–12.
19. O. Arteaga, A. Canillas, J. Crusats, Z. El-Hachemi, G. E. Jellison, J. Llorca, J. M. Ribó, "Chiral biases in solids by effect of shear gradients: A speculation on the deterministic origin of biological homochirality", *Origin of Life and Evolution of the Biosphere* **2010**, 40, 27–40.
20. L. Becker, J. L. Bada, R. E. Winans, T. E. Bunch, "Fullerenes in Allende meteorite", *Nature* **1994**, 372, 507.
21. D. Heymann, L. P. F. Chibante, R. T. Brooks, W. S. Wolbach, R. E. Smalley, "Fullerenes in the Cretaceous-Tertiary boundary layer", *Science* **1994**, 265, 645–647.