LOS METEORITOS

Son cuerpos sólidos que caen sobre la superficie terrestre procedentes de los espacios interplanetarios. Constituyen objeto de estudio desde diferentes puntos de vista: interesan al astrónomo, que trata de determinar su órbita antes de entrar en contacto con la atmósfera terrestre; al mineralogista, que encuentra en ellos nuevos minerales, junto con otros que ya se conocen en la Tierra; al petrólogo, que estudia la asociación mineralógica que los constituye y su probable modo de formación; al geoquímico, que de su composición química obtiene deducciones sobre la del interior del Globo, pues se presume que los meteoritos proceden de la fragmentación de uno o más cuerpos planetarios análogos a la Tierra, así como sobre la composición media del Universo, o de las regiones extraterrestres de las que proceden los meteoritos. Pero el interés máximo de los meteoritos, que reúne las investigaciones astronómicas con las de los especialistas de las ciencias geológicas mencionadas, estriba en la posibilidad de deducir de su estudio indicios acerca de la formación de los planetas y sobre el origen del sistema solar.

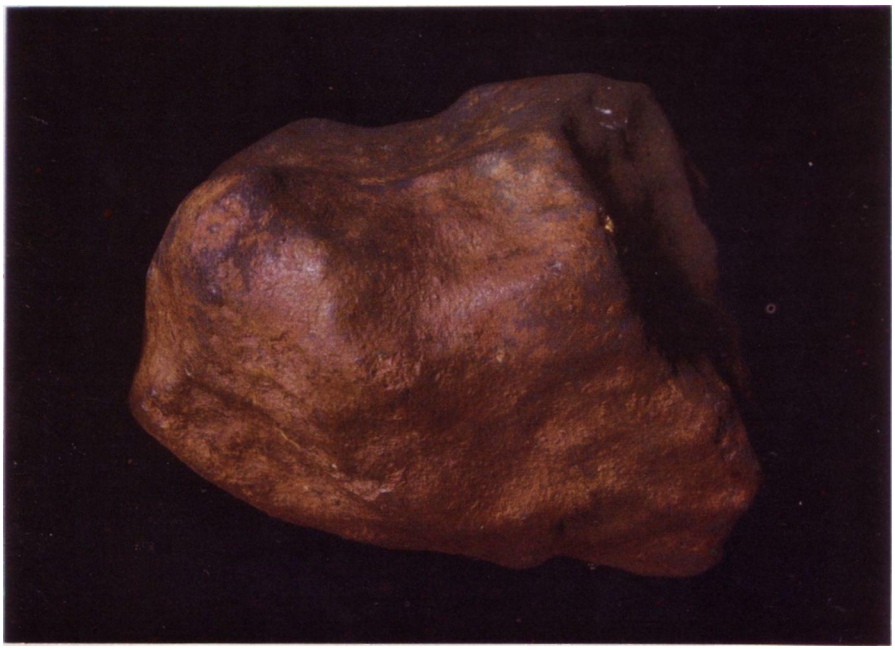
Los cálculos de la trayectoria de los meteoritos se fundaban, hasta hace pocos años, en datos muy aproximados deducidos de la observación visual de los fenómenos luminosos que los acompañan en su curso a través de la atmósfera, pero recientemente han sido confirmados por medidas precisas, que se han obtenido por métodos fotográficos y sobre todo por medio del radar durante el paso de los meteoritos por las regiones más altas de la atmósfera terrestre. Estos cálculos tienden a demostrar que los meteoritos se mueven en ***órbitas elípticas*** y, por tanto, pertenecen al sistema solar. Además, ha sido posible evidenciar que algunos meteoritos proceden de la zona de los asteroides, situada entre Marte y Júpiter, hasta tal punto que muchos autores dan por sentada la identidad entre meteoritos y asteroides de órbita muy excéntrica.

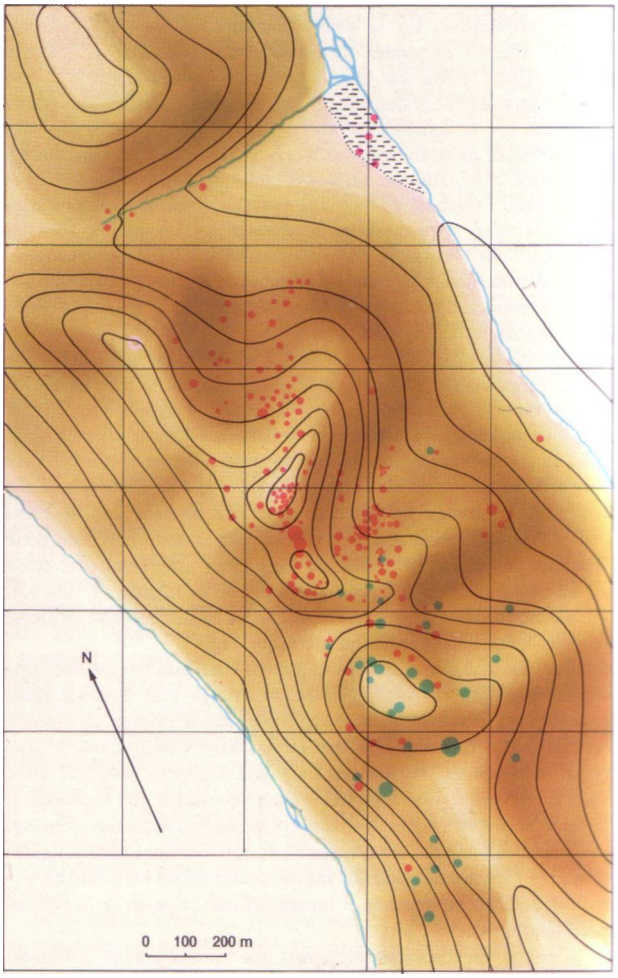
Los meteoritos observados durante su caída suelen considerarse aparte de los que ya se encuentran sobre la superficie terrestre, los cuales han estado sometidos a la alteración meteórica por períodos más o menos largos. Evidentemente, los primeros ofrecen mayor interés, tanto porque su naturaleza de meteorito es segura, como porque su composición química y mineralógica y su forma están inalteradas. La identificación como meteorito de un cuerpo que se encuentra sobre la superficie terrestre es bastante difícil, sobre todo para un profano, en el caso de los meteoritos litoideos o aerolitos; no obstante, éstos constituyen la mayoría de los meteoritos cuya caída ha podido observarse. Esta dificultad se debe a la extraordinaria semejanza de los aerolitos con algunas rocas terrestre y a su mayor posibilidad de alteración con respecto a los sideritas, meteoritos compuestos esencialmente por hierro metálico que atraen con facilidad la atención porque se distinguen bien de las rocas terrestres (por tanto, predominan en número entre los meteoritos que se recogen después de un tiempo más o menos largo de su caída). Por este motivo, cualquier estimación sobre la proporción cuantitativa entre los diversos grupos de meteoritos debe fundarse únicamente en aquellos meteoritos cuya caída ha sido observada.

El paso de un meteorito por la atmósfera origina fenómenos acústicos y luminosos, estos últimos producidos esencialmente por la elevada temperatura de la superficie del mismo, consecuencia de su rozamiento con el aire. El fenómeno luminoso, llamado ***meteoro,*** que se percibe sobre todo por la noche al paso de un meteorito resulta espectacular por la intensa iluminación de regiones **muy** amplias; por lo general sólo dura algunos segundos. Aunque también durante el día la caída de un meteorito produce fenómenos luminosos, lo más evidente es la larga estela de humo blancuzco u obscuro que resulta de la pulverización de su superficie. Esta estela es especialmente visible en los meteoritos metálicos ***(sideritos),*** en tanto que es más débil y a veces imperceptible en los meteoritos litoideos ***(aerolitos).*** Los efectos visuales van acompañados por fenómenos acústicos, que consisten en una o varias detonaciones con un trueno final y prolongado.

Los cuerpos sólidos extraterrestres que penetran en la atmósfera se denominan propiamente **meteoroides.** La mayor parte de ellos, de tamaño más pequeño y dotados de mayor velocidad que la Tierra en el momento de penetrar en la atmósfera, se vaporizan por completo en la ionosfera y en la estratosfera, y se manifies-

A la izquierda, aspecto del meteorito Tenham. A la derecha, mapa de la zona de caída de la lluvia meteorítica de Sikhote Alin (URSS). En rojo se representan los fragmentos simples; en azul verdoso, cráteres meteoríticos. Obsérvese la forma elíptica de la zona de caída (modificado de Krinov).





tan sólo por la luminosidad que acompaña a su vaporización ***(estrellas fugaces).*** Ciertos meteoroides pueden estar constituidos por substancias gaseosas a la temperatura existente en la superficie terrestre, pero sólidas en los espacios interplanetarios. Entre los meteoroides de composición litoidea o metálica, sólo los más grandes, y aquellos cuya velocidad es más pequeña al entrar en la atmósfera, alcanzan la superficie terrestre. Estos cuerpos son los meteoritos, pero el significado de semejante palabra se hace extensivo muchas veces a los cuerpos sólidos que se encuentran aún fuera de la atmósfera terrestre.

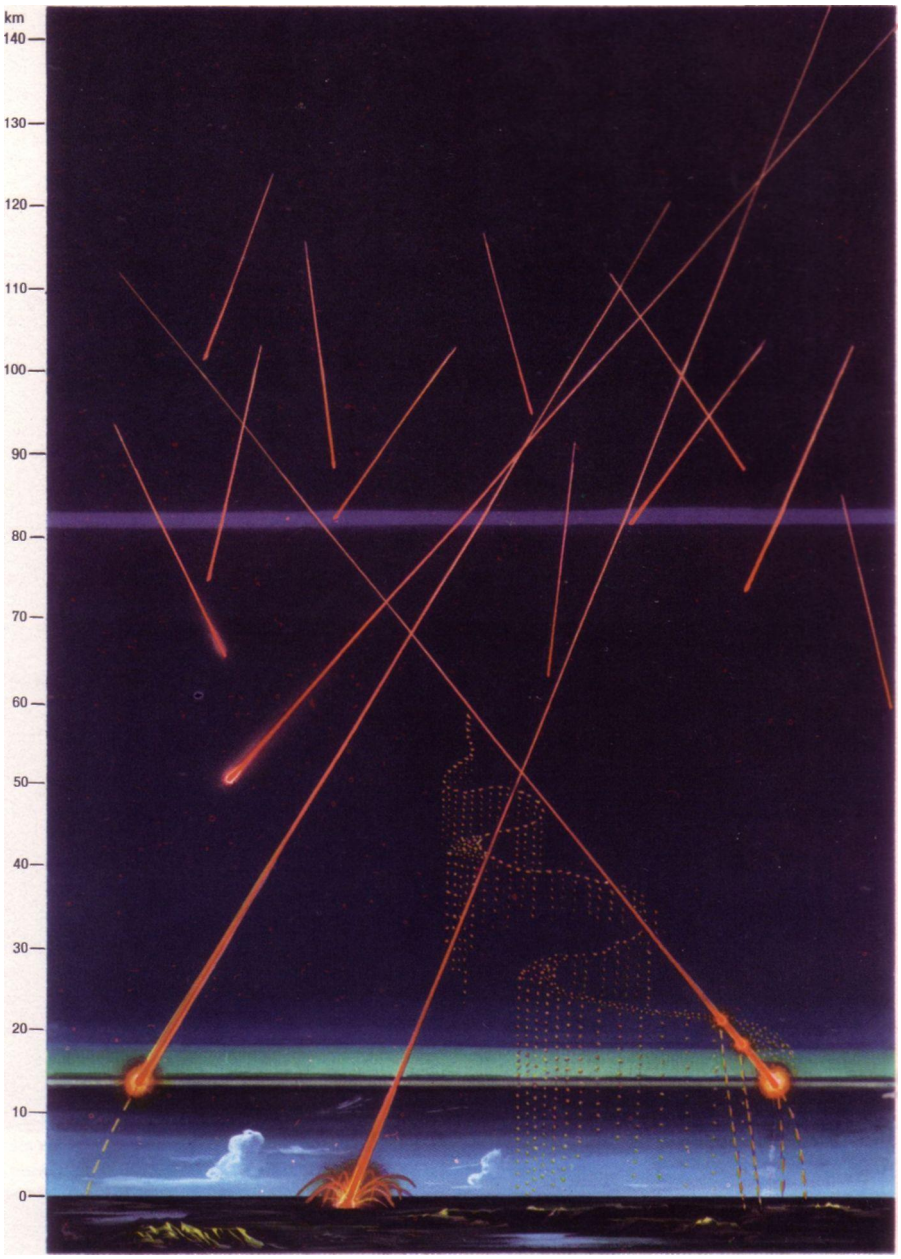
Los meteoritos experimentan notable pérdida de materia al atravesar la atmósfera (incluso más de la mitad de su masa original), y muchas veces explotan antes de llegar al suelo, dividiéndose en gran número de fragmentos que caen en la misma zona ***(lluvia meteorítica).*** La explosión es producida probablemente por la enorme diferencia de presión entre el aire de la parte anterior y el de la posterior del meteorito en movimiento, y también por la diferencia de temperatura entre la superficie del meteorito, que se pone incandescente, y el núcleo relativamente frío, como se hallaba en los espacios interplanetarios. Por esto los fragmentos originados en la caída se encuentran en una área de forma elíptica, con su eje mayor coincidente con la dirección del movimiento del meteorito; los más grandes se concentran en la parte anterior de la elipse (según la trayectoria). El término meteorito se aplica en general al conjunto de fragmentos procedentes de una sola lluvia meteorítica, y con menos frecuencia a cada uno de los fragmentos.

Aunque los meteoritos tienden a fragmentarse en los últimos momentos de su trayectoria por la atmósfera, puede suceder que un meteorito de grandes dimensiones caiga en la superficie terrestre. Esto ocurrió con seguridad en tiempos pasados, como se deduce de la existencia de grandes cráteres producidos por la vaporización y desintegración instantánea del meteorito, el cual estaba dotado de una enorme fuerza viva en razón de su masa y de su velocidad de caída, superior a la velocidad media. Algunos autores han puesto en duda la naturaleza de estos presuntos cráteres por explosión, en contraste con los cráteres por caída, más pequeños y en cuyo interior puede hallarse un meteorito o, más a menudo, un gran número de fragmentos del mismo.

El ejemplo más conocido, y probablemente el de mayores dimensiones, lo constituye el Meteor Crater, de Arizona (EE.UU.), que es una depresión casi circular de unos 1.200 m de diámetro por 175 m de profundidad, con los bordes elevados unos 50 m sobre el terreno circundante. En torno a este cráter se hallan decenas de mulares de pequeños fragmentos de hierro meteorítico, y en su interior se han encontrado dos modificaciones polimorfas de la sílice, la coesita y la stishovita, con densidades de 2,93 y 4,30, respectivamente (el cuarzo tiene 2,65), y que sólo son estables a presiones elevadas. Además, debajo de la capa vegetal del fondo del cráter se halla vidrio silíceo, vacuolar y con densidad aparente 2,1, resultado de la fusión de las areniscas a causa de la brusca elevación de temperatura producida por el impacto del meteorito.

Se han observado también otros cráteres de características análogas en diversas partes del mundo, unas veces aislados y otras asociados en grupos. Los que tienen un diámetro superior a 100 m son probablemente cráteres de explosión, y en sus cercanías se han encontrado pequeños fragmentos de meteoritos o costras de sílice vitrea, así como modificaciones polimorfas de sílice de gran densidad. Algunos de estos cráteres son de dimensiones mayores que el mencionado Meteor Crater, pero no existen pruebas concluyentes de su origen meteorítico. No obstante, hay que tener en cuenta que la alteración y la erosión, muy activas en algunos climas, han podido borrar muchas de las características morfológicas y mineralógicas de los cráteres, sobre todo si éstos se constituyeron en épocas remotas.

A cada meteorito se le distingue con un nombre, que en general corresponde al de la localidad donde se ha encontrado y comprende todos los fragmentos atribuibles a la caída de un mismo cuerpo sólido (a veces, varios centenares). Además, las diferentes categorías petrográficas que pueden reconocerse en los meteoritos se designan, según algunos sistema de clasificación, o bien con un término que deriva de la localidad geográfica en la que se ha encontrado un ejemplar que se considera característico de todo un grupo, o bien con el nombre de los investigadores de los meteoritos. No obstante, deben preferirse los nombres que designen alguna propiedad importante de composición o de estructura.



Esquema de las trayectorias de los meteoritos: En la parte superior, meteoritos que se destruyen antes de alcanzar las capas inferiores de la atmósfera. En la parte inferior: a la derecha, un meteorito que estalla varias veces provoca la caída de numerosos fragmentos y de polvillo meteorítico; en el centro, origen de un cráter meteorítico de explosión; a la izquierda, caída de un meteorito simple.

Características morfológicas de los meteoritos

Las dimensiones de los meteoritos pueden ser desde algunas décimas de milímetro hasta varios decímetros e incluso pocos metros. El mayor meteorito que se conoce (entre los formados por un solo bloque) es el siderito ***Hoba,*** constituido esencialmente por una aleación de hierro y níquel, que se encontró en la República Sudafricana; tiene forma tabular y mide unos 3 x 3 x 1 m.

Los corpúsculos más pequeños, o sea los de dimensiones inferiores a la décima de milímetro ***(polvo meteorítico),*** se pueden clasificar en dos grupos según su forma. Los corpúsculos globulares, a veces con una cavidad interna, representan pequeñas partículas desprendidas en estado de fusión de la superficie del meteorito durante su paso por la atmósfera. Son el principal constituyente sólido de la estela que dejan los meteoritos y que puede observarse si la caída ocurre durante el día. Partículas globulares de este tipo se hallan sobre todo en los sedimentos oceánicos profundos, y están constituidas por glóbulos de magnetita con ferroníquel en el núcleo; junto a ellas se han encontrado a veces glóbulos formados por olivino y piroxeno, de estructura análoga a la de los cóndrulos y que tal vez procedan de la disgregación de meteoritos litoideos. También existen fragmentos de tamaño parecido, pero de forma poliédrica irregular; son el resultado de la fragmentación mecánica del

Aspecto del Meteor Crater, de Arizona (EE.UU.), probablemente debido a la caída de un meteorito.

Una capa negruzca de fusión recubre parcialmente este aerolito caído en el año 1883.

meteorito, producida al chocar con la superficie terrestre o inmediatamente antes, y se encuentran sobre todo en el suelo, alrededor del área de caída. Forman la transición gradual a los ***micrometeoritos,*** que son los fragmentos cuyo tamaño es del orden de 1 mm. Con el nombre de ***polvo cósmico*** se suele designar el conjunto de fragmentos pequeños, de aspecto parecido al de los micrometeoritos, que caen de modo constante y lento, dadas sus dimensiones, en toda la superficie terrestre y que provienen de los espacios interplanetarios, pero que no se deben a la fragmentación de los meteoritos.

El aspecto externo y las principales características físicas de los meteoritos son bastante variables. Así, los sideritos tienen notable densidad (alrededor de 7,5), son muy compactos y están recubiertos por una costra negra de fusión con reflejos azulados; en las regiones de clima cálido y húmedo se forma rápidamente sobre ellos una costra de alteración constituida por limonita rojiza y frágil. Los siderolitos y los aerolitos poseen menor densidad (alrededor de 5 y 3,5 respectivamente). Los aerolitos pueden asemejarse a guijarros de la corteza terrestre; se presentan grisobscuros y están recubiertos, como todos los meteoritos, por una costra de fusión; su compacidad es variable, y algunos tipos se desmenuzan fácilmente al golpearlos con un martillo. Entre los aerolitos, los condritos carbonosos tienen un aspecto bastante peculiar; su densidad es pequeña (alrededor de 2,5), son muy frágiles, y la materia carbonosa, que les da el color negruzco, deja huella con facilidad en los objetos que toca.

Muchas veces, la naturaleza meteorítica de los cuerpos sólidos que se han encontrado en el suelo, más o menos alterados, sólo se puede discernir mediante cuidadosa investigación química y microscópica. En cambio, los meteoritos caídos recientemente, o los

Aspecto de las fosas u oquedades en 2 aerolitos.

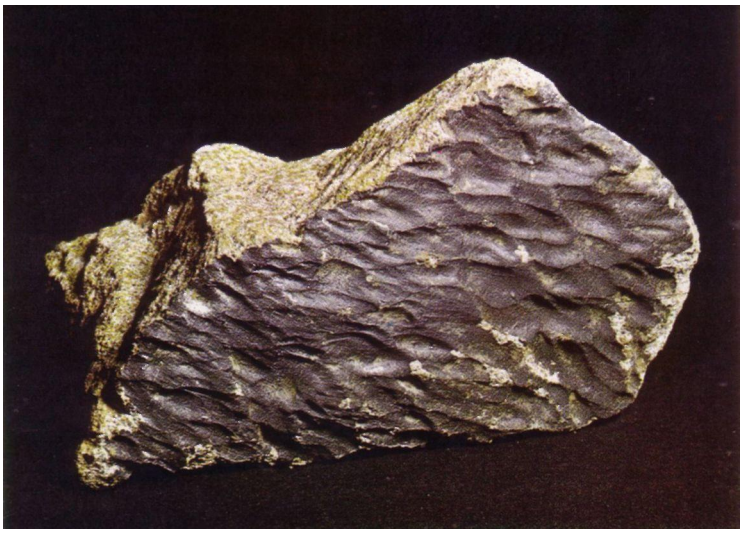
que se han encontrado en regiones de clima árido o frío, presentan muchas características macroscópicas que los hacen reconocibles con facilidad.

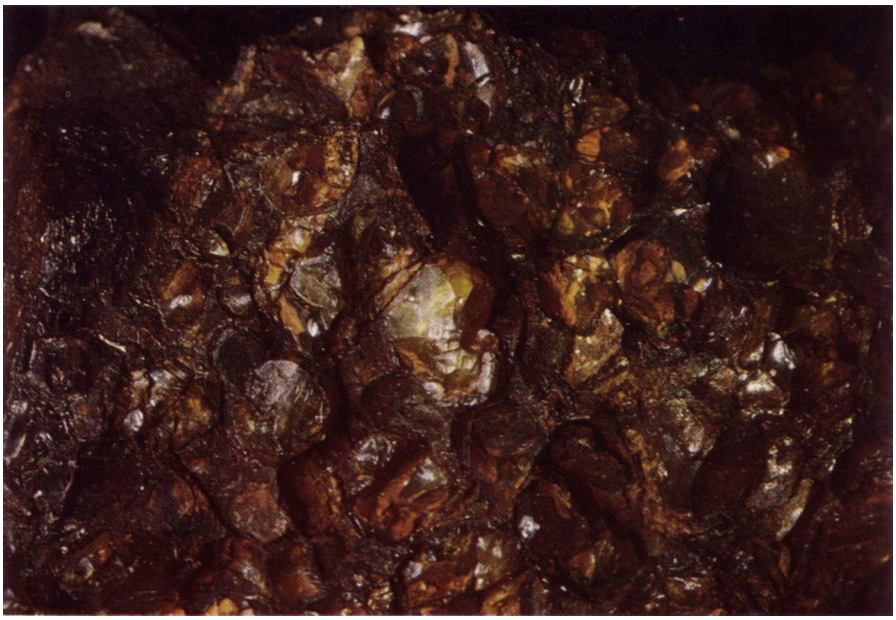
En casi todos los meteoritos se puede observar una ***costra de fusión,*** formada a su paso por la atmósfera terrestre. En general, esta costra es opaca y obscura; en los sideritos es negruzca, a veces con reflejos azulados, y en los aerolitos suele presentarse pardobscura, y sólo en raros casos es transparente, de modo que a su través puede observarse la estructura del meteorito. El espesor de la costra de fusión suele ser de pocas décimas de milímetro y puede variar según el punto que se considere. A veces, parte de la costra de fusión es arrancada por la acción mecánica de fricción con la atmósfera, poco después de haberse formado. En muchos meteoritos poliédricos se observa que algunas caras planas carecen de costra de fusión; esto es debido a la fragmentación del meteorito inmediatamente antes de chocar con el suelo o en el momento del choque, poco después de haberse ***formado*** la costra de fusión, Jo cual ocurre en la fase principal de deceleración del meteorito (al encontrar estratos cada vez más densos de la atmósfera), por lo general en la tropopausa y durante un tiempo del orden de un segundo.

La costra de fusión de los meteoritos presenta algunas características visibles al microscopio o con una lente sencilla. En los meteoritos en que es posible distinguir una porción frontal y otra dorsal (o sea que no han experimentado una rotación irregular sobre sí mismos durante su paso por la atmósfera), la costra de fusión en la porción frontal presenta textura prácticamente lisa, en tanto que en la porción de transición entre la zona frontal y la dorsal se observa a menudo un rizamiento en arrugas subparalelas, formado al fluir la tenue costra en fusión hacia la parte posterior del meteorito. Esta última suele presentarse recubierta por una capa escoriácea, con diminutas burbujas solidificadas, que fueron atrapadas en la fricción de la porción frontal del meteorito y que pasaron a la parte dorsal, sobre todo por la enorme diferencia de presión entre ambas partes durante el movimiento del meteorito. Estas burbujas muestran a veces alargamientos y prolongaciones filamentosas que determinan su primitivo estado de fusión, y tienen la misma naturaleza e idéntica génesis que el polvillo meteorítico, constituido por partículas globulares que caen en abundancia sobre la superficie terrestre. Muchas veces la costra de fusión de los meteoritos está atravesada por una fina red de fisuras, como las que se observan a menudo en la porcelana esmaltada.

Los meteoritos no sólo se distinguen de los fragmentos de rocas terrestres por la presencia y las características microscópicas de la costra de fusión, sino también por la morfología macroscópica de su superficie. Ésta es lisa sólo en los meteoritos de forma aproximadamente equidimensional ***y que presentaron un movimiento de*** rotación desordenado durante su paso por la atmósfera. En la mayoría de meteoritos se observan pequeñas fosas, más o menos irregulares, que se han comparado con las huellas dejadas por los dedos en el barro de modelar. Si un meteorito no equidimensional ha conservado constantemente la misma orientación a su paso por la atmósfera (es decir, con la superficie de mayor extensión por delante, para ofrecer la máxima resistencia al movimiento), estas depresiones presentan aspectos diferentes en las distintas porciones del ejemplar. El centro de la porción frontal, que ha soportado las máximas presiones y temperaturas, carece generalmente de huellas, en tanto que las superficies de esta porción frontal que se encontraban en posición oblicua respecto a la dirección del movimien-

A la izquierda, fosas sobre el meteorito Henbury. A la derecha, acanaladuras aerodinámicas en el meteorito Barwell.

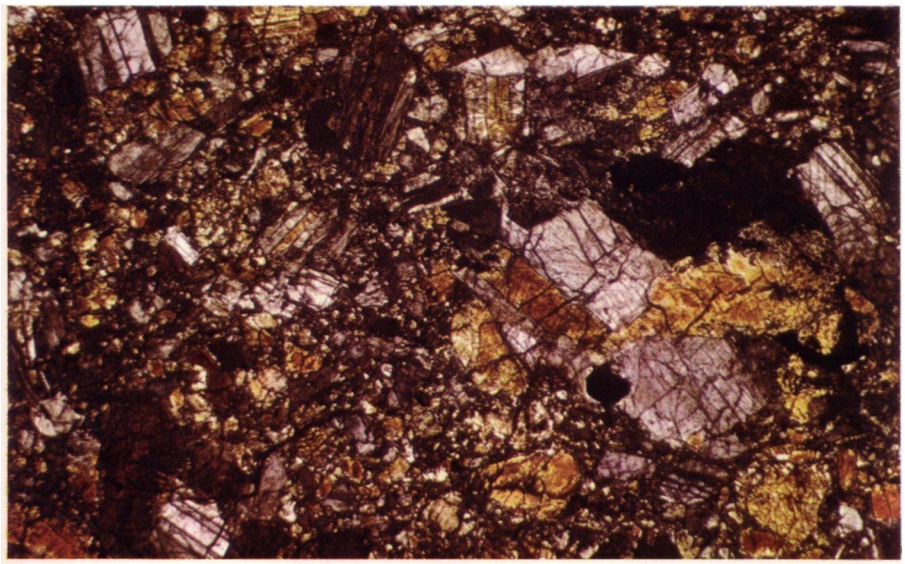




Olivino contenido en un palasito caído cerca de Krasnojarsk (URSS).

to se presentan recubiertas por acanaladuras fusiformes ***(acanaladuras aerodinámicas),*** alargadas hacia la porción dorsal; estas acanaladuras son semejantes a las que se producen a causa del paso de una corriente de agua por un fondo fangoso. La porción dorsal de los meteoritos, que a menudo tiene configuración plana (en tanto que la frontal es convexa y semejante a un cono aplastado), está recubierta por depresiones irregulares sin orientación determinada, pero algo mayores que las aerodinámicas. Las dimensiones de estas depresiones superficiales están en relación con las del meteorito en el que se encuentran, y equivalen a una décima parte de su diámetro (o del espesor, para los meteoritos de forma alargada). Ciertos meteoritos, toscamente poliédricos, presentan depresiones de tamaño muy diverso en sus diferentes caras; las más grandes se forman sobre las caras de mayor extensión, de cuya fragmentación a su paso por la atmósfera se originan otros cuerpos de menor tamaño. Algunas superficies de estos últimos se han recubierto de una nueva costra de fusión con depresiones más pequeñas. Las cavidades de mayor tamaño, que se han observado algunas veces en la porción dorsal de ciertos meteoritos, se han atribuido a la fusión diferencial o a la combustión de inclusiones de composición diferente a la de la masa principal, quizá de sulfuro de hierro o de materias carbonosas. Por otra parte, no puede excluirse la posible acción de la alteración posterior a la caída.

Como se ha indicado, la configuración de los meteoritos puede ser diversa. Es muy común la forma de "umbela" (toscamente cónica) en los meteoritos que han conservado una orientación constante a su paso por la atmósfera. Otros tienen forma de poliedro irregular, pero aproximadamente equidimensional, y están limitados por superficies casi planas; éstos proceden de la fragmentación de una masa de mayores dimensiones, que ha ocurrido cerca del lugar del impacto con la superficie terrestre. En algunos sideritos ***(octaedritos)*** se puede reconocer vagamente una forma octaédrica, muy redondeada a causa de la fusión superficial; otros sideritos ***(hexaedritos)*** pueden presentar superficies de fractura planas y formando entre sí ángulos diedros rectos, que corresponden a los planos de exfoliación de un monocristal cúbico de hierro.



Sección delgada de un acondrito en el que se aprecian cristales maclados de plagioclasa (nícoles cruzados, x 34 x 1,5).

Composición química y mineralógica de los meteoritos

Los meteoritos están constituidos por minerales y, en menor proporción, por substancia vitrea y amorfa. Muchos de los minerales que comprenden los meteoritos no se hallan en las rocas que afloran en la superficie terrestre, o bien se encuentran en ellas en cantidades muy pequeñas; otros, por el contrario, son comunes en las rocas terrestres, sobre todo en las ígneas intrusivas, básicas y ultrabásicas. Faltan o escasean los minerales característicos de las rocas de composición siálica, muy frecuentes en la superficie terrestre.

Los minerales fundamentales de los meteoritos se pueden reunir en 2 grupos: ***aleaciones de ferroníquel*** y ***silicatos.*** Cuando el predominio de las aleaciones de ferroníquel es absoluto, los meteoritos se designan con el nombre de sideritos; sin embargo, este nombre puede inducir a confusión con la siderita (carbonato de hierro), y debiera substituirse quizá por el de ***hierro meteórico.*** Los aerolitos son meteoritos compuestos sobre todo por silicatos, en tanto que los siderolitos están formados por ferroníquel y silicatos en cantidad aproximadamente equivalente. En ciertos aerolitos ***(condritos)*** y siderolitos ***(mesosideritos)*** se encuentra un sulfuro de hierro, la troilita, en proporciones de algunas unidades por ciento (en otros grupos de meteoritos aparece en cantidades mínimas).

Las aleaciones de ferroníquel se presentan en 2 modalidades polimorfas, correspondientes a la clase holoédrica del sistema regular. Una de ellas, cristalina, se designa con el nombre de ***camacita,*** que proviene de una palabra griega que significa "asta", puesto que los cristales de camacita (por lo general aplanados, laminares y de gran tamaño) cuando sus superficies han sido pulidas y tratadas artificialmente, se presentan a la observación como formados por finas estrías paralelas; los cristales laminares pueden alcanzar el espesor de 1 cm. La estructura del retículo cristalino. de la camacita es de células cúbicas centradas, que corresponde a la del hierro α. La cantidad de níquel en solución sólida en el hierro es de un 5,5%, valor prácticamente constante.

La segunda modificación cristalina de las aleaciones de ferroníquel presentes en los meteoritos es la ***tenita,*** cuyo nombre alude a las finas estrías alargadas que suelen presentar sus cristales laminares, bastante más finas que las de la camacita, que corresponden al hierro γ. La cantidad de níquel que puede formar parte de este retículo cristalino es bastante variable (27 - 65 %, aproximadamente); los valores medios del contenido en níquel de la tenita están más próximos al límite unferior de este intervalo.

Los principales silicatos que se encuentran en los meteoritos son los característicos de las rocas ígneas, básicas y ultrabásicas, y en general corresponden a los términos con mayor proporción de magnesio en las series isomorfas a las que pertenecen, pues la mayor parte del hierro se separa en estado metálico. De este **modo** el ***olivino,*** el silicato más importante que entra en la composición de los meteoritos, suele ser crisolita con un máximo del 30 *% del* término ferrífero de la serie isomorfa y de color verdoso o castaño; algunas veces se encuentra también ***forsterita,*** en cristales blanquecinos y opacos. Entre los ***piroxenos,*** son predominantes los rómbicos con gran riqueza de magnesio ***(enstatita),*** siendo raros los elementos más ferríferos de la serie isomorfa ***(broncita*** e ***hiperstena).*** Los piroxenos monoclínicos, menos abundantes que los rómbicos, suelen contener poco calcio; por tanto, no se trata de augita (que, no obstante, se ha encontrado en un meteorito), sino **de** ***clinoenstatita*** o ***pigeonita;*** al ***diópsido*** corresponden variedades más ricas en calcio, pero pobres en aluminio. Otro silicato de magnesio, que se encuentra en un grupo particular de aerolitos **(con**dritos carbonosos), es la ***serpentina.*** Este mineral se presenta en

cristales sumamente pequeños, mezclados con materia carbonosa, pero la observación al microscopio electrónico y el examen rontgenográfico han demostrado que se trata de crisotilo; no obstante, en algunos casos el silicato de magnesio hidratado se halla en estado amorfo.

Junto con el olivino y los piroxenos se puede encontrar una ***plagioclasa,*** a menudo en cristales tabulares lo mismo que en algunas rocas terrestres. La composición de la plagioclasa es variable: en los ***acondritos plagioclásicos,*** que son meteoritos semejantes en el aspecto y composición a los gabros, la composición de la plagioclasa es aproximada a la de la ***anortita*** (es decir, con bastante calcio); por el contrario, en los condritos la plagioclasa, cuando existe, contiene abundante sodio y una pequeña cantidad de potasio (en la mayoría de los casos es una ***oligoclasa).***

En algunos meteoritos, junto con estos minerales se encuentran substancias amorfas que pueden alcanzar proporciones considerables. Se trata de ***compuestos carbonosos*** de diferente naturaleza, en parte constituidos por hidrocarburos y en parte por una substancia vitrea clara y transparente, la cual tiene la misma composición química que la plagioclasa y a veces idéntica configuración tabular; a este vidrio se le ha denominado ***maskelynita.*** Hay una substancia vitrea de composición diferente (con mayor proporción de sílice), que prácticamente es el único constituyente de los tectitos, cuerpos de forma redondeada típica y de probable naturaleza meteorítica.

Entre los minerales accesorios contenidos en los meteoritos en cantidad por lo general inferior al 1 %, se pueden citar el cobre, el oro, el diamante y el grafito (modificaciones polimorfas del carbono), y el azufre. Estas substancias se presentan en cristales muy pequeños incluidos en el ferroníquel o en los silicatos, y a veces no se observa su presencia por análisis químico de los meteoritos.

Otro grupo de minerales accesorios de los meteoritos es el formado por compuestos del carbono, fósforo y nitrógeno con metales; dichos compuestos no se han hallado en las rocas terrestres. Cabe citar la cohenita, Fe_3C, y la schreibersita, $(Fe, Ni, Co)_3P$, mineral accesorio bastante común en los meteoritos; se presenta en láminas delgadas, intercaladas de modo muy regular entre las de camacita, o en cristales aciculares, o bien recubriendo las concentraciones nodulares de troilita.

En el grupo de los sulfuros se encuentra la troilita, único mineral accesorio de los meteoritos que a veces puede alcanzar proporciones considerables. Se trata de un monosulfuro de hierro cuya composición es análoga a la de la pirrotina (bastante frecuente en las rocas terrestres), aun cuando en ésta la cantidad de hierro no corresponde estequiométricamente a la del azufre, sino que es algo inferior. Cuando el monosulfuro de hierro se encuentra en los sideritos, es muy probable que se trate de troilita, teniendo en cuenta la abundancia de hierro presente en el momento de originarse, como se ha comprobado por varios análisis; en los aerolitos a veces se encuentra pirrotina, puesto que en ellos la cantidad de hierro puede ser escasa. En algunos aerolitos que carecen de ferroníquel (o que lo contienen en poca proporción), además de los sulfuros troilita y pirrotina, se ha encontrado pentlandita niquelífera, así como calcopirrotina (sulfuro de cobre y hierro estable a temperaturas elevadas). La daubreelita (sulfuro de hierro y cromo) se ha hallado en muchos meteoritos. Otros sulfuras (pirita, blenda, etc.) se han podido observar a veces en mínimas cantidades.

Un mineral característico de los meteoritos, que se encuentra en muchos sideritos y probablemente también en aerolitos y en siderolitos, es la lawrencita ($FeCl_2$). Este mineral es higroscópico y se descompone en hidróxido férrico y ácido clorhídrico; por esto en las superficies talladas y pulidas de muchos sideratos aparecen manchas pardas de hidróxido férrico, a menos que el meteorito se conserve en un ambiente absolutamente seco.

Entre los óxidos, el cuarzo se encuentra en algunos meteoritos en pequeña cantidad, y mediante un examen rontgenográfico se ha podido determinar la presencia de cristobalita. La tridimita (otra modificación polimorfa de la sílice) aparece con más frecuencia como mineral accesorio en los aerolitos compuestos esencialmente por silicatos. También están representados algunos minerales de la familia de las espinelas, como la magnetita ($FeO\text{-}Fe_2O_3$), tanto en el interior de los meteoritos como en la costra de fusión; en este ultimo caso se ha formado por oxidación del hierro a su paso por la atmósfera. Se ha demostrado la presencia de espinela en pequeña cantidad, así como la de cromita.

Los fosfatos también pueden encontrarse en los meteoritos. Además de apatito (componente normal en la corteza terrestre) existe merrillita, fosfato de sodio y calcio que únicamente se ha encontrado en los meteoritos; es rara la farringtonita, fosfato magnésico exclusivo también de los meteoritos.

Algunos meteoritos contienen sulfatos, cuya proporción puede llegar a algunas unidades por ciento; aparecen siempre en una variedad de aerolitos (condritos carbonosos), que se distingue precisamente por su composición mineralógica muy particular. El sulfato más común es la epsomita (sulfato magnésico hidratado), pero también se han observado yeso y bloedita (sulfato de sodio y magnesio hidratado, muy raro). Estos minerales pueden ser componentes originales de los meteoritos, pero algunos autores sostienen que se han formado de modo secundario, por oxidación de los sulfuras después de la caída. También en los condritos carbonosos se encuentran carbonatos (magnesita ferrífera, calcita, dolomita) en pequeñas cantidades.

La composición de los meteoritos es objeto de investigación minuciosa, sobre todo para poder reconstruir la composición química media de la materia que constituye el Universo, o al menos el sistema solar, y para conseguir datos sobre la composición probable del interior de la Tierra. Estos fines de la investigación corresponden a la ***geoquímica*** y a una ciencia bastante afín a la misma, la ***cosmoquímica,*** simultáneamente con el estudio de la composición isotópica de los elementos químicos que se encuentran en los meteoritos, con cuyos resultados se puede llegar a conclusiones acerca de las transformaciones de la materia en el espacio cósmico y sobre la edad probable de los meteoritos.

Pero el análisis químico de los meteoritos puede realizarse también con carácter petrográfico, sobré todo para estudiar la posibilidad de distinguir un objeto como tal meteorito y después poder definir criterios de clasificación. Principalmente con este fin se emprendió el análisis químico de los meteoritos en el siglo pasado y a principios del actual. Por ejemplo, la distinción entre los hierros meteoríticos y los obtenidos artificialmente por la industria siderúrgica, con los que pudieron confundirse, es posible gracias al contenido de níquel, que resulta mayor en los hierros meteoríticos.

Calentando al vacío muestras de meteoritos se desprenden pequeñas cantidades de gases, seguramente absorbidos en la superficie de determinados cristales de los minerales del meteorito, en su retículo cristalino, o procedentes de la disociación térmica de ciertos minerales (carbonatos). Dichos gases suelen ser hidrógeno y monóxido de carbono para los sideritos, y anhídrido carbónico para los aerolitos. Entre éstos, los condritos carbonosos son los que contienen mayor cantidad de gas. Otras substancias gaseosas que se liberan durante el calentamiento, por lo general en cantidades más pequeñas, son nitrógeno, metano, helio, etc.

La realización del análisis químico de un meteorito y su interpretación presentan algunas dificultades en comparación con el análisis de los materiales terrestres. En primer lugar, los meteoritos tienen a menudo una textura de grano grueso heterogénea, por lo cuál es difícil lograr una muestra que represente con seguridad su composición media. Además, los elementos químicos pueden combinarse de distinta manera a como lo están en las rocas terrestres. En efecto, en los meteoritos el hierro se encuentra casi siempre en estado elemental; el silicio puede hallarse en forma de disolución sólida en la aleación ferroníquel; algunos metales se encuentran muchas veces en forma de sulfuras en lugar de presentarse como silicatos, tal como ocurre en las rocas terrestres. Por tanto, el porcentaje de hierro que resulta del análisis se calcula en parte en forma de sulfuro (teniendo en cuenta la cantidad encontrada de azufre) y en parte en forma metálica, después de haber calculado la cantidad de hierro que se disuelve con determinados reactivos; el resto, o sea el hierro combinado en los silicatos, se halla como óxido ferroso. Los otros elementos se cuentan por lo general como óxidos (del mismo modo que se hace en el análisis químico de las rocas terrestres) o, lo que es lo mismo, se admite que estos elementos se hallan combinados en los silicatos. Sin embargo, muchos autores prefieren presentar la composición química expresando el porcentaje en peso de cada elemento, en lugar de expresarlo en óxidos.

Este ultimo criterio se aplica en particular a los sideritos, que casi no incluyen oxígeno combinado y están compuestos por un 90 % de hierro, en tanto que el resto contiene fundamentalmente

A la izquierda, figura de Widmanstätten en un octaedrito. A la derecha, aspecto de un palasito caído en Kentucky (EE.UU.), en el que se aprecia claramente la estructura brechoide; en una masa de ferroníquel se hallan fragmentos obscuros de olivino.

níquel y, en cantidad muy inferior, cobalto (ambos en solución sólida en el hierro), además de azufre, fósforo, nitrógeno, etc. (combinados con los metales). En los siderolitos, que son los meteoritos compuestos por aleación de ferroníquel y silicatos en proporciones poco más o menos equivalentes (rebasando muy poco el 50 %); el hierro se encuentra en parte combinado con los silicatos. También en este caso el porcentaje de níquel es menor, en tanto que el notable porcentaje medio de magnesio (un 12 %), de silicio (un 8 %) y de oxígeno (poco menos del 20 %), atestiguan la existencia de silicatos, sobre todo de magnesio, que sólo en pequeña cantidad están substituidos isomórficamente por hierro.

La composición química de los aerolitos se representa mejor con los porcentajes de los óxidos de los distintos elementos, como se hace con las rocas terrestres. En efecto, el hierro en estado elemental, o en menor cantidad en forma de sulfuro, se halla en una proporción máxima de pocas unidades por ciento (hasta el 10 % en los condritos y bastante menos en los acondritos). La cantidad de sílice (combinada en los silicatos) es inferior al 50 %, como en las rocas básicas de la Tierra. La alúmina y la cal, que se encuentran sobre todo en las plagioclasas y en la maskelynita, y a veces en pequeñas cantidades en los piroxenos, alcanzan unas pocas unidades por ciento. También hay pequeñas cantidades de álcalis, que están contenidos sobre todo en los feldespatos. Son elevados los porcentajes de magnesio (20 %) y de óxido de hierro (15 %), en su mayor parte combinados con la sílice en el olivino y en los piroxenos.

Estructura de los meteoritos

Con el término estructura se pueden designar las características macroscópicas y microscópicas de los meteoritos, por lo que se refiere a la disposición recíproca de los distintos minerales que los componen y de los cristales de un mismo mineral. Las características comprendidas en el término textura para las rocas ígneas, se incluyen en este caso en la estructura de los meteoritos, hasta el punto de que incluso en las rocas terrestres se utilizan ambos términos con cierta promiscuidad. El estudio de la estructura de los meteoritos es de máxima importancia, para poder reconstruir los fenómenos que han sido causa de su génesis y las sucesivas vicisitudes que han experimentado en el espacio durante el largo período transcurrido entre su formación y su caída en la Tierra. No es posible establecer una clasificación sistemática de la estructura de los meteoritos, y en muchos casos es difícil su interpretación genética. En términos generales se puede lograr una distinción entre la estructura de los sideritos y la de los aerolitos.

La estructura de los hierros meteoríticos se pone de manifiesto puliendo una superficie del meteorito y sometiéndola luego a la acción de determinados reactivos para corroer en distinto grado los diferentes minerales. Una de las clases de hierros meteoríticos (octaedritos) presenta ***estructura laminar,*** de capas paralelas orientadas en determinadas direcciones y de espesor variable, hasta cerca de 1 cm ***(figuras de Widmanstätten).*** Cada lámina o capa, cuya intersección con el plano de la superficie pulimentada se aprecia como una banda, está constituida por un cristal de camacita recubierto por una tenue vaina de tenita. Otro grupo de hierros meteoríticos (hexaedritos) presenta a menudo un tipo distinto de estructura laminar, que se observa en forma de las denominadas ***líneas. bandas*** o ***figuras de Neumann,*** con láminas mucho más delgadas que las de Widmanstätten y dispuestas en diferentes direcciones.

Los cristales de algunos minerales accesorios que se encuentran en los hierros meteoríticos presentan una ***disposición orientada*** con respecto a la dirección seguida por las láminas de ferroníquel. Así, la troilita se halla a veces en laminillas orientadas tic modo regular en el interior de los hierros meteoríticos ***(láminas de Reichenbach),*** y lo mismo puede ocurrir con las inclusiones laminares de schieibersita ***(laminillas de Brezina).*** También las inclusiones aciculares de schreibersita ***(rabdita)*** suelen disponerse segun una dirección cristalográfica determinada por la masa de ferroniquel que las incluye.

Todas estas estructuras orientadas, con excepción de las figuras de Neumann que se admite que son debidas a la macla de un monocristal de hierro producida por deformaciones mecánicas, pueden atribuirse a fenómenos de separación de una mezcla de varias fases de diferente composición que originariamente constituían una fase única, estable a temperaturas más elevadas. Esta separación se habría producido en el seno de una fase sólida, como parece comprobado en el caso de las figuras de Widmanstätten.

En los sideritos se observan otras estructuras, no orientadas, que en algunos casos parece también que deban atribuirse a fenómenos de separación de mezclas, pero que se han producido en condiciones diferentes de las que han determinado las estructuras orientadas. En este caso se trata de ***estructuras nodulares,*** que consisten en la inclusión de nódulos, generalmente de grafito y de troilita, en el interior de la masa fundamental de ferroníquel. Los nódulos presentan forma irregular y tamaño variable, desde algunos centímetros hasta fracciones de milímetro. Los pequeños nódulos de grafito y troilita de tamaño más pequeño tienen configuración semejante a la de los cóndrulos. Algunas veces estos nódulos presentan una envoltura de schreibersita, y a menudo de camacita. que los separa de la masa fundamental de ferroníquel, la cual tiene generalmente estructura laminar.

Pocas veces en los sideritos, pero más a menudo en los siderolitos y en los aerolitos, se presenta una ***estructura granular*** análoga a la de las rocas ígneas intrusivas. El tamaño granular de esta estructura es variable, pasando de microcristalina a macrocristalina, con cristales de incluso algunos centímetros; esto ultimo ocurre en determinados sideritos, en los que los cristales de camacita no tienen forma laminar, sino equidimensional. En cambio, en algunos siderolitos y aerolitos se observa una estructura granular de grano medio, como en la mayoría de las rocas ígneas intrusivas; las dimensiones del cristal aislado corresponden a pocos milímetros. En muchos sideritos es frecuente un caso particular de estructura microcristalina; estos sideritos están constituidos, en par-

te o totalmente, por ***plesita,*** una mezcla microcristalnia de camacita y tenita. A veces las dos modificaciones alotrópicas del ferroníquel constituyen una estructura micropertítica como la de los feldespatos, debida también a la separación de dos fases de un conjunto original sólido. Varios aerolitos presentan ***estructura porfídica,*** porque algunos cristales tienen un tamaño superior al medio.

De aspecto análogo a las estructuras granular y porfídica es la ***estructura brechoide,*** característica de algunos aerolitos, pero que se observa también en los siderolitos cuando se encuentran cristales de olivino de contornos agudos o irregulares, englobados en la masa fundamental de ferroníquel. Los contornos de minerales cuya forma no corresponde a una facies cristalina se encuentran englobados en una especie de pasta (o masa) de fondo, constituida, completamente o en parte, por pequeños cristales de tamaño variable de los mismos minerales. Seguramente la estructura brechoide está relacionada con violentas deformaciones mecánicas experimentadas por el meteorito cuando formaba parte todavía de un cuerpo planetario. Los aerolitos de estructura brechoide se han subdividido en ***monomíticos*** y ***polimíticos,*** según que los fragmentos que los constituyen sean iguales por su composición o estructura, o bien diferentes, de modo que deban atribuirse a dos o más meteoritos de distintos tipos. La ***estructura venada,*** la más frecuente en los condritos, consiste en la presencia de delgadas venas de materia vitrea rica en sílice y que lleva incluidos glóbulos diminutos de troilita.

La ***estructura condrítica*** es característica de muchos aerolitos y los diferencia de las rocas terrestres que tienen la misma composición mineralógica. Esta estructura es el resultado de la presencia de ***cóndrulos*** (o ***condros),*** que son corpúsculos nodulares de dimensiones del orden de un milímetro y englobados en una pasta de fondo microcristalino o amorfa. Los cóndrulos pueden estar compuestos por diferentes silicatos (olivino, piroxenos y más raramente plagioclasas), y muchas veces contienen porcentajes variables de materia vitrea; algunos autores consideran cóndrulos también pequeñas inclusiones globulares de ferroníquel o de otros compuestos metálicos. Al microscopio puede apreciarse que la microstructura interna de los cóndrulos es múltiple. Es muy común la ***estructura radiada excéntrica,*** de pequeños cristales aciculares de silicatos (por lo general enstatita) que crecen a partir de un núcleo situado cerca de la periferia del cóndrulo, pero también se observan estructuras ***microgranulares, microporfídicas, microlaminares,*** etc. Algunos cóndrulos están constituidos por un único cristal de un solo mineral, frecuentemente olivino. Los cóndrulos pueden presentarse incluidos en una envoltura de ferroníquel, de troilita o de otros minerales metálicos.

Algunos meteoritos, en general aerolitos, presentan ***estructuras de recristalización,*** análogas a las que se observan en las rocas terrestres sometidas a diagénesis o a metamorfismo. De este modo, existen aerolitos constituidos por un mosaico cristalino de grano fino, del que si se somete una sección delgada a observación microscópica se aprecian trazas de estructura condrítica original, o sea alineaciones circulares de diminutos cristales de componentes metálicos (la envoltura de los cóndrulos) en el interior de una masa cristalina de grano esencialmente homogéneo. Las fases iniciales de la transformación consisten en la desaparición de las zonas vitreas incluidas en los cóndralos, las cuales se convierten en agregados microcristalinos; en los céndralos de estructura radiada se forman cristales aciculares que penetran en la masa circundante. Estos fenómenos son idénticos a los que se verifican durante la diagénesis de las rocas sedimentarias, por ejemplo de los sílex y de las calizas oolíticas.

Un estadio de recristalización más avanzado que el indicado por la casi completa obliteración de la estructura condrítica y por su transformación en una estructura granular homogénea, está caracterizado por la aparición de la ***estructura céntrica,*** que consiste en la disposición irregular de cristales de olivino alrededor de núcleos constituidos por minerales metálicos o por maskelynita. Análoga estructura puede observarse en algunas granulitas, rocas que se han originado a gran profundidad en la corteza terrestre. También se atribuye a fenómenos de elevación de temperatura la formación de meskelynita, que conserva los contornos de los cristales idiomorfos de plagioclasa, de cuya fusión proceden.

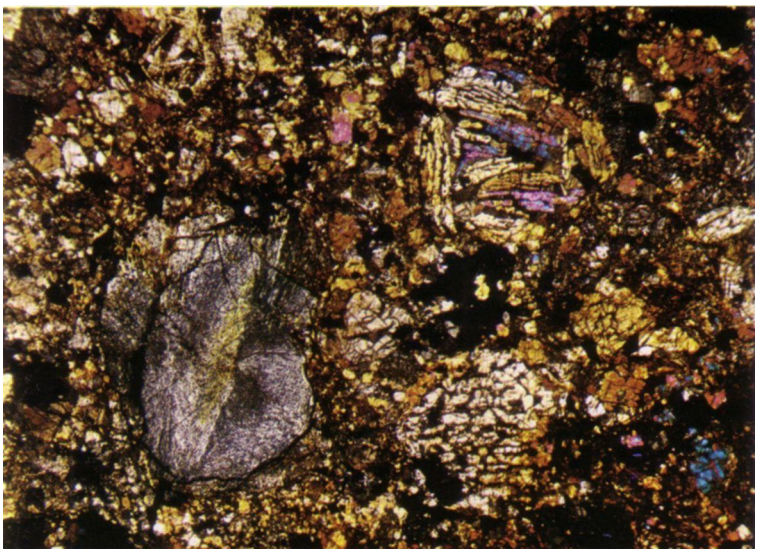
SIDERITOS
(Hierro meteorítico)

Son meteoritos constituidos con predominio absoluto de las dos formas mineralógicas de las aleaciones ferroníquel, la camacita y la tenita. Los principales minerales accesorios de los sideritos son sulfuros, fosfatos y carburos metálicos, además de grafito y cromita. Según sea su composición mineralógica y química, y sobre todo su estructura, estos meteoritos se clasifican en 3 grupos: hexaedritos, octaedritos y ataxitos; los primeros son, con mucho, el tipo más abundante entre los sideritos.

Los hexaedritos están compuestos casi únicamente por camacita, y por ello su composición química es de una constancia notable; el hierro alcanza de promedio el 93,5 %, y el níquel el 5,5 %, puesto que ésta es la proporción en que el níquel puede substituir al hierro en el retículo cúbico cristalino de cuerpos centrados de la camacita. No se conocen sideritos con menos de un 4 % de níquel; los resultados más bajos que han podido citarse se deben probablemente a imprecisión del análisis, sobre todo cuando en la muestra del meteorito analizado se hallan otros minerales que, por lo general, están en los sideritos en cantidad accesoria.

Los hexaedritos pueden estar constituidos por uno o varios cristales grandes de camacita, con exfoliación cúbica perfecta. A menudo el meteorito está compuesto por un solo cristal de camacita, que al chocar con el suelo puede romperse en varios trozos limitados por caras planas y que forman entre sí ángulos diedros rectos. Si se ataca con ácido la superficie pulida de un hexaedrito, suele observarse un fino retículo de líneas que se entrecruzan en varios án-

A la izquierda, sección delgada del condrito hipersténico Aigle, cuyos cóndrulos presentan estructura diversa ¡nícoles cruzados, x 14 x 1,3). A la derecha, sección delgada de otro condrito, el Ergheo (nícoles cruzados, x 27 x 1,3).



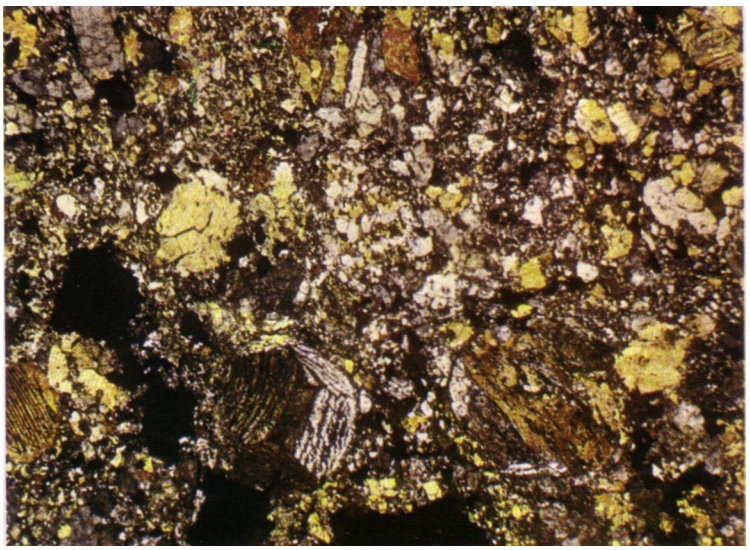
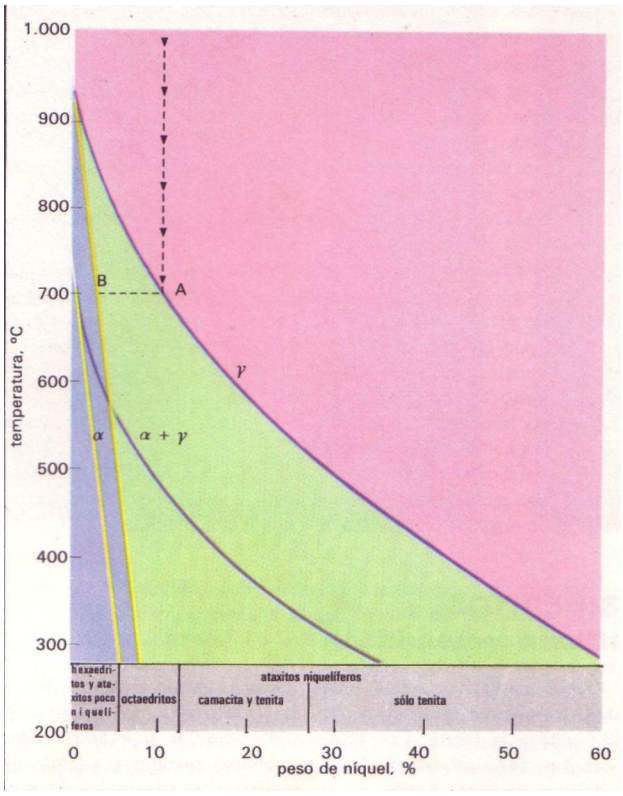


Diagrama de fases de las mezclas de ferroníquel: α = camacita; γ = tenita (modificado de Uhlig).



gulos; son las ***figuras de Neumann,*** debidas a la macla de un cristal de camacita según planos orientados de un modo determinado (paralelos a las caras de un trisoctaedro). Esta macla ha sido producida por una intensa deformación mecánica experimentada por la camacita a temperaturas no muy elevadas (300-600 °C, según algunos autores). Cuando el meteorito está compuesto por varios cristales de camacita, las figuras de Neumann cambian de orientación al paso de un cristal a otro.

Se conocen pocos sideritos con escasa proporción de níquel, o sea afines a los hexaedritos en cuanto a composición química y mineralógica, pero con estructura microcristalina. Estos sideritos se llaman ***ataxitos poco niquelíferos,*** por su analogía estructural con los ataxitos niquelíferos, que presentan níquel en abundancia.

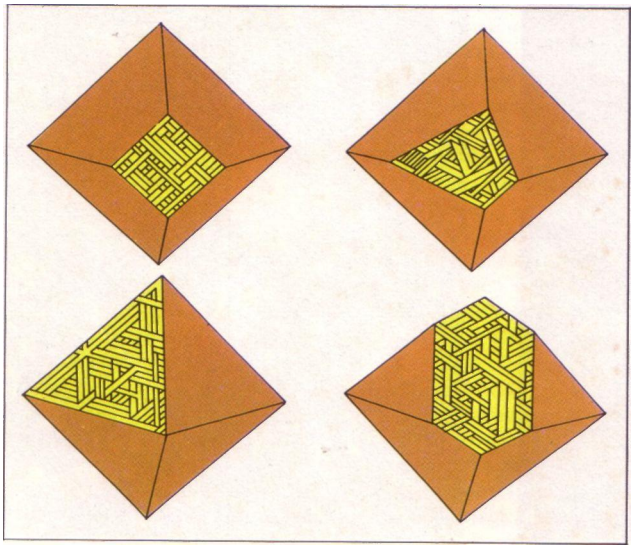
Los sideritos que contienen más del 5,5 % de níquel están constituidos por dos modificaciones cristalinas de ferroníquel; es decir, con la camacita aparece también la tenita, en cuyo retículo cristalino se aloja el níquel en exceso, respecto a la cantidad que puede ser incluida en el retículo de la camacita. La tenita, cuyo contenido de níquel es muy variable (con predominio de un 30 %), suele formar cristales laminares muy delgados, los cuales rodean a las láminas de camacita de espesor mucho mayor y se sitúan en sentido paralelo a las caras de un octaedro.

Esta estructura, característica de los sideritos que contienen más del 5,5 % de níquel y por la que se les denomina octaedritos. se manifiesta por las características ***figuras de Widmanstätten,*** que aparecen en la superficie pulida de un octaedrito atacada cor ácido. Según sea la orientación de esta superficie con relación al octaedro, a cuyas caras son paralelas las láminas de camacita y de tenita de los octaedritos, las figuras de Widmanstätten están constituidas por 2 sistemas perpendiculares de bandas cuando sección es paralela a una cara del cubo, o sea normal a uno de los 3 ejes principales de simetría del octaedro, o bien por 3 sistema- de bandas, que forman entre sí ángulos de 60°, cuando la sección es paralela a una cara de octaedro, o de 70° 32' y 54° 44' cuando sección es paralela a una cara de rombododecaedro. Si la sección tiene una orientación diferente, aparecen 4 sistemas de bandas paralelas.

Las bandas que pueden apreciarse macroscópicamente en figuras de Widmanstätten corresponden a cristales de camacita. que es la modificación mineralógica del hierro más pobre en níquel: las bandas de tenita adyacentes son bastante delgadas y más resistentes al ataque ácido que las de camacita. El volumen poliédrico comprendido entre las bandas de camacita y las de tenita, que ¡ veces puede ser superior al volumen de las mismas láminas, está ocupado por plesita, un agregado de tenita y camacita generalmente de estructura granular. En las preparaciones pulidas de los meteoritos, estos volúmenes interlaminares aparecen como figuras poligonales entre las bandas de camacita.

El espesor de las láminas de camacita presentes en los octaedritos depende del porcentaje total de níquel en el meteorito. Si este porcentaje es de 1,8-6 %, o sea poco mayor que el que puede incluir la camacita en solución sólida, el espesor de las láminas es superior a 2 mm, y a veces estas láminas son toscas e irregulares, indicando la transición entre los octaedritos y los hexaedritos policristalinos. Para contenidos más elevados de níquel el espesor de las láminas de camacita va disminuyendo de modo regular, al mismo tiempo que aumentan el número y el volumen total de las láminas de tenita y de las zonas de plesita.

Si el porcentaje de níquel de un siderito es superior a 12-14 %, las láminas de camacita, que son muy delgadas para contenidos próximos a estos valores, empiezan a hacerse discontinuas y ya no son visibles directamente; entonces quedan representadas por pequeñas inclusiones laminares con una débil envoltura de tenita y con tendencia a disponerse en sistemas paralelos que forman



A la izquierda, figuras de Widmanstätten según la orientación de la sección pulimentada respecto al octaedro, a cuyas caras son paralelos los sistemas de láminas. A la derecha, sección pulimentada del meteorito Springwater, de Saskatchevan (Canadá); Hay cristales de olivino incluidos en una masa de ferroníquel.

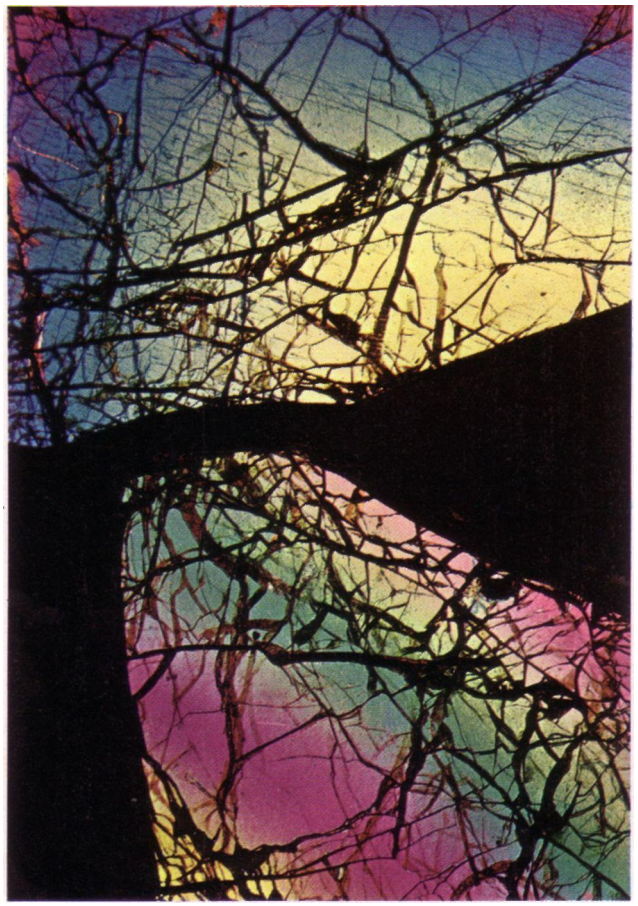
entre sí ángulos diferentes en el seno de una masa microgranular de plesita. Puesto que en este caso la camacita y la tenita ya no presentan la disposición regular característica de los octaedritos, sino que se encuentran entremezcladas sin guardar un orden aparente, estos meteoritos toman el nombre de **ataxitos niquelíferos,** o simplemente **ataxitos,** puesto que los meteoritos con estructura análoga pero con poco níquel constituyen una variedad de los hexaedritos. La proporción cuantitativa entre la camacita y la tenita en los ataxitos, puede variar en función del contenido en níquel; si éste rebasa el 30 %, los ataxitos están compuestos sólo por tenitas. Los ataxitos, y sobre todo los abundantes en níquel, son poco frecuentes entre los meteoritos, ya que el contenido medio de níquel de los sideritos es ligeramente inferior al 10 %; por tanto, la mayor parte de los sideritos son octaedritos.

Las diferencias estructurales de los sideritos dependen de la proporción cuantitativa hierro-níquel en el meteorito. Este hecho puede interpretarse basándose en los resultados experimentales sobre la solidificación de mezclas en fusión de hierro y níquel y sobre las modificaciones que se producen en las aleaciones así obtenidas en función de la temperatura y la presión. De estas experiencias, realizadas a 1 atm, resulta que el hierro y el níquel constituyen un sistema binario con temperatura mínima de fusión de 1.430 °C, correspondiente a una mezcla que contiene el 32 % de hierro y el 68% de níquel. Las temperaturas de fusión de las mezclas que poseen una composición diferente, o de los metales puros, son más elevadas; la del hierro es de 1.550 °C. Las mezclas fundidas de hierro y níquel, con porcentajes de este ultimo elemento comprendidos entre el 5 y el 62 % (que son los límites del contenido en níquel de los sideritos), se solidifican a temperaturas próximas a los 1.500 °C (valor variable según la relación cuantitativa entre los dos elementos) y forman aleaciones de ferroníquel con estructura cristalina cúbica de caras centradas, como la de la tenita.

Esta gran miscibilidad de hierro y níquel en estado sólido sólo existe a temperaturas elevadas; si la temperatura desciende por debajo de un cierto límite (que disminuye al aumentar la proporción de níquel de la aleación y al elevarse la presión a que está sometido el sistema, y que para los octaedritos puede haber sido de unos 500 °C), se producen fenómenos de difusión en estado sólido, por lo que se forman dos fases cristalinas en el seno de la masa sólida que se enfría. De la aleación con abundante níquel y con estructura cristalina de cubos de caras centradas (tenita), se separa una aleación con poco níquel y estructura de cubos centrados (camacita). En general, esta separación se realiza a lo largo de superficies orientadas del mismo modo que las caras de un octaedro en el interior de los cristales cúbicos de tenita originales; pero en los meteoritos con abundante níquel este fenómeno se origina sobre todo en zonas irregulares, dando lugar a la plesita, que es una mezcla microcristalina de tenita y camacita.

Debido a la separación de la camacita, rica en hierro, la proporción de níquel en la tenita aumenta progresivamente con el enfriamiento, al mismo tiempo que disminuye la cantidad total de tenita. También en la camacita aumenta el porcentaje de níquel al progresar el enfriamiento, pero en menor proporción que en la tenita. Estos procesos se van paralizando hasta cesar por completo, pues la difusión en estado sólido, gracias a la cual se verifican dichos fenómenos, se detiene prácticamente al llegar a temperaturas del orden de 300 °C, en las cuales la cantidad de níquel que puede entrar a constituir parte del retículo de la camacita es, a presiones elevadas, el 5,5 %. Si el contenido original de níquel de la mezcla en fusión no superaba este valor, durante el enfriamiento de la masa sólida la tenita, que es estable a altas temperaturas, se transforma en camacita. Finalizado el enfriamiento, todo el níquel está contenido en esta fase, en tanto que la tenita ha desaparecido; este es el caso de los hexaedritos.

Es muy posible que los sideritos se hayan formado por consolidación de masas de níquel y hierro en fusión y, según los principios que se acaban de exponer, en el interior de uno o más cuerpos planetarios de considerables dimensiones y a presión elevada. Además, la regularidad de la estructura cristalina de los sideritos y la presencia muy común de cristales equidimensionales y laminares de grandes dimensiones, hacen pensar en una serie de transformaciones que han tenido lugar de modo muy lento y en un período de tiempo muy largo. De un modo experimental, por lenta solidificación de aleaciones de ferroníquel se han obtenido estructuras análogas a las figuras de Widmanstätten, aunque a escala microscópica.



A la izquierda, sección delgada del mesosiderito Mincy, caído en Missouri (EE.UU.); contiene masas opacas de ferroníquel unidas a cristales de piroxeno y olivino (nícoles cruzados, x 27 x 1,5). A la derecha, sección delgada del palasito Breuham, cuido en Kansas (EE.UU.), en la que se pueden apreciar dos grandes cristales de olivino separados por una zona opaca de ferroníquel (nícoles cruzados, x 11 x 1,5).

Sección delgada del condrito Pultusk, de Polonia; se aprecian cóndrulos con diversas estructuras internas (nícoles cruzados, x 23 x 1,5).

los acondritos ricos en calcio; como mineral accesorio se encuentra una plagioclasa.

En otros tres ejemplares de meteoritos, el olivino va asociado a la pigeonita, que es un piroxeno monoclínico pobre en calcio; estos meteoritos se diferencian de los demás acondritos porque los minerales que los constituyen se encuentran englobados en una matriz carbonosa negruzca. Ciertas características, como la presencia de ferroníquel accesorio en pequeños gránulos que forman la envoltura de los cristales de los minerales principales, hacen pensar en que estos acondritos procedan de los acondritos carbonosos.

Según muchos investigadores los acondritos se formaron en el interior de un cuerpo planetario por cristalización de un magma en ambiente intrusivo, por lo que son análogos a las rocas ígneas intrusivas terrestres. Tal teoría podría aplicarse de manera especial a los acondritos con estructura granular, en tanto que la estructura brechoide de estos meteoritos u otros tendría una génesis más dudosa. Un argumento en favor del origen intrusivo de los acondritos de estructura granular es el proporcionado por la presencia, en uno de ellos, de una isorientación de determinadas direcciones cristalográficas de la plagioclasa y del piroxeno; tal isorientación, según los investigadores que la han descrito, sería debida a una sedimentación regular de los cristales que se han separado del magma y han caído al fondo de la reserva magmática, exactamente como en las primeras fases de consolidación de las rocas ígneas intrusivas básicas y ultrabásicas terrestres. El olivino, primer mineral separado del magma, habría reaccionado con el residuo en fusión para dar origen al piroxeno; las diferentes proporciones cuantitativas entre hierro y magnesio contenidos en los piroxenos serían la consecuencia de un progresivo enriquecimiento en hierro de estos minerales durante el enfriamiento del magma. Por tanto, los distintos tipos de acondritos, incluyendo los de composición diversa de la media que están representados por pocos ejemplares, se habrían producido por fenómenos de diferenciación magmática en condiciones intrusivas en el interior de uno o más cuerpos planetarios.

Los **condritos** forman el grupo más abundante de meteoritos; su número no es sólo superior al de los demás meteoritos litoideos (de los que representan más del 90 %), sino también al de los sideritos y al de los siderolitos. Este tipo de meteoritos se caracteriza por la estructura condrítica, que por lo general se puede apreciar por visión directa o con una lente; tal estructura consiste en la presencia de pequeños glóbulos de forma más o menos regular ***(cóndrulos),*** que están constituidos esencialmente por silicatos y presentan diversas estructuras internas. En algunos condritos la estructura condrítica queda borrada casi por completo debido a fenómenos de recristalización. De ordinario, el tamaño de los cóndrudos es inferior a 1 mm; a veces se pueden separar extrayéndolos de la masa del meteorito, cuando ésta es suficientemente frágil. Sin embargo, otros condritos son compactos y los cóndrulos forman un cuerpo con la pasta de fondo, que está constituida por cristales diminutos de silicatos y minerales metálicos, además de material amorfo que varía tanto en cantidad como en composición. El porcentaje de los cóndrulos con relación a la masa total del meteorito es también variable; algunos condritos están constituidos casi exclusivamente por cóndrulos, mientras que en otros los cóndrulos son muy escasos o pueden incluso faltar ***(condritos carbonosos);*** no obstante, estos últimos meteoritos se clasifican entre los condritos por la gran analogía que presenta su composición química.

En algunos condritos se observan delgadas venas negruzcas, constituidas por una substancia vitrea compuesta por silicatos y con diminutas inclusiones de troilita. Muchos condritos tienen estructura brechoide, a menudo monomíctica; es decir, están formados por fragmentos de condritos de la misma composición, pero de color ligeramente diferente. A veces se trata de brechas polimícticas, ya que los fragmentos que constituyen el meteorito son muy diferentes entre sí, tanto en su aspecto como en su naturaleza.

Las composiciones química y mineralógica de los condritos revelan que éstos constituyen un grupo perfectamente diferenciado entre los meteoritos; respecto a los acondritos presentan relaciones de analogía, pero también diferencias bien definidas. El porcentaje de ferroníquel es netamente más elevado en los condritos que en los acondritos (cerca del 10 % de promedio, frente al 1,1 % aproximadamente), y lo mismo ocurre con el porcentaje de olivino (40 %, frente a poco más del 10 %); el olivino es el componente fundamental de los condritos, en tanto que el porcentaje de piroxeno, que es el mineral más abundante en los acondritos, es un poco inferior al de olivino. También la plagioclasa, que es un constituyente fundamental de algunos acondritos, se encuentra en pequeña cantidad en los condritos, y suele estar representada por una oligoclasa, o sea una plagioclasa sódica (con cierto porcentaje de potasio), en lugar de ser una plagioclasa cálcica como en los acondritos.

Estas diferencias de composición mineralógica se reflejan también en diversidades de composición química entre los dos grupos de aerolitos. Las variantes fundamentales consisten en el menor contenido de calcio y aluminio de los condritos (correspondiendo a la escasez de plagioclasa y a su composición sódica) y en el estado diferente del hierro, que en los acondritos se encuentra en su mayoría combinado con sílice, más abundante en ellos, en tanto que en los condritos se halla parcialmente en estado metálico, correspondiendo también con un contenido mayor de sulfuros de hierro (troilita). Por estas ultimas características de composición química y mineralógica, los condritos se parecen mucho más a los siderolitos que los acondritos.

Los condritos enstatíticos son los aerolitos más ricos en ferroníquel, el cual se presenta en forma de pequeños cristales equidimensionales de camacita, englobados en la masa de fondo entre los cóndrulos de enstatita. El piroxeno rómbico es únicamente magnesífero y no contiene hierro, el cual se encuentra sobre todo en estado metálico y a veces como sulfuro. La cantidad total de hierro puede llegar al 35 %, por lo que los condritos enstatíticos constituyen el término de transición a los mesosideritos. Como en estos últimos, el ferroníquel se encuentra en concentraciones aisladas. También se hallan otros elementos metálicos, como calcio, manganeso y cromo, principalmente en forma de sulfuros, y no de silicatos ni de óxidos, debido quizás al ambiente reductor que dominaba en el curso de la formación de estos meteoritos, lo cual queda atestiguado por la existencia en ellos de cierta cantidad de carbono. Además, el silicio en estado metálico se encuentra en cantidades mínimas aleado con hierro y con níquel.

En los condritos olivínicos, el olivino es un mineral fundamental y se presenta asociado a un piroxeno que contiene cierta cantidad de hierro, y no únicamente magnesio como en los condritos enstatíticos. En correspondencia, el porcentaje de hierro metálico es también menor; sin embargo, es más rico en níquel, que se concentra en la fase metálica. Según sea la composición del piroxeno, se distinguen algunas variedades de condritos olivínicos.

Los ***condritos olivínicos con broncita*** presentan una considerable cantidad de ferroníquel (15-20 %) en diminutos cristales entre los cóndrulos, por lo que estos condritos ofrecen una notable compacidad. En cambio, los ***condritos olivínicos con hiperstena*** son más pobres en ferroníquel (menos del 10 %), puesto que el hierro

Ejemplares de tectitas halladas en Thailandia.

se encuentra en los silicatos y el olivino contenido en estos condritos es rico en el térmnio ferrífero; por esto muchos condritos olivínicos con hiperstena son bastante frágiles. En algunos condritos olivínicos el piroxeno, que no constituye más que unas pocas unidades por ciento, cristaliza en el sistema monoclínico y posee un cierto contenido de calcio; este piroxeno es la pigeonita. Los ***condritos olivínicos con pigeonita*** están constituidos fundamentalmente por un olivino muy ferrífero, y en menor cantidad por plagioclasa, pigeonita, troilita y ferroníquel; este ultimo es bastante rico en níquel y se encuentra en forma de tenita.

Unos pocos condritos olivínicos con pigeonita accesoria contienen una pequeña cantidad de materias carbonosas que, sin embargo, es suficiente para darles una tonalidad negruzca. Estos condritos constituyen el término de transición a un grupo muy particular de meteoritos, el de los **condritos carbonosos,** cuya composición química y mineralógica es diferente de la que se ha observado en los otros meteoritos. Presentan color negruzco y suelen ser frágiles; el análisis microscópico no proporciona datos interesantes porque están constituidos por una masa opaca a la luz, en la que se encuentran esparcidos unos pocos cóndrulos de olivino. Estos cóndrulos a veces faltan, y entonces el meteorito se clasifica entre los condritos sólo por su analogía de aspecto y de constitución con los condritos carbonosos propiamente dichos. La masa principal del meteorito, negruzca por estar impregnada de materia orgánica, la compone un silicato de magnesio hidratado, amorfo o finamente cristalino. Su composición y su estructura cristalina, cuando existe, permiten reconocerlo como un mineral perteneciente a la familia de las serpentinas. Otra particularidad de los condritos carbonosos la constituye el que estos meteoritos, prácticamente carentes de ferroníquel, contienen cantidades substanciales de azufre, tanto libre como en forma de sulfatos (en su mayoría epsomita, sulfato de magnesio hidratado). ***Sin*** tener en cuenta el porcentaje de materia carbonosa, azufre, sulfatos y agua contenido en los condritos carbonosos, su composición química es análoga a la de los condritos olivínicos.

Los componentes carbonosos incluidos en estos meteoritos son parcialmente solubles en los disolventes orgánicos (ej.: éter y benzol). Su naturaleza constituye un motivo de estudio muy interesante, porque podría apuntar la posible existencia de vida en otros planetas, o al menos la existencia de compuestos orgánicos procedentes de la transformación de restos de organismos, al igual que el carbón o el petróleo en la Tierra. En realidad, algunas de las substancias que constituyen el residuo carbonoso son hidrocarburos, en tanto que la naturaleza de otras está bastante menos definida; no obstante, se trata de compuestos de carbono, hidrógeno y oxigeno, que contienen también azufre, nitrógeno y otros elementos. Mientras que unos investigadores sostienen que estos compuestos de carbono son de naturaleza orgánica, dada la forma de los corpúsculos de contorno circular o hexagonal contenidos en algunos condritos carbonosos, otros rechazan tal hipótesis, fundándose en la observación de que estos compuestos de carbono, disueltos en productos adecuados, no desvían el plano de polarización de la luz que atraviesa la solución, al contrario de lo que ocurre con los hidrocarburos naturales que se encuentran en la Tierra, cuyo origen orgánico está casi universalmente admitido. Estos últimos autores atribuyen la génesis de la materia carbonosa a procesos de polimerización de compuestos de carbono de origen inorgánicos, los cuales contienen los radicales CH, CN, etc., que se han podido identificar por el examen espectrográfico de la luz emitida por algunos cometas. Además, entre los componentes fundamentales de la atmósfera de algunos planetas se encuentran substancias, como anhídrido carbónico, metano y amoníaco, que contienen elementos esenciales en la composición de los organismos vivos, como son el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno.

Los diferentes grupos de condritos muestran analogías de composición química y mineralógica, así como particularidades estructurales, que hacen pensar que todos ellos corresponden a diferentes estados de evolución de un mismo material original. Según algunos autores, este material sería precisamente el que constituye los meteoritos carbonosos amorfos, en los que un aumento de temperatura, producido a su paso por las proximidades del Sol, o bien debido a otros factores, habría dado lugar a una serie de deshidrataciones y a la eliminación de los compuestos volátiles, como el anhídrido carbónico. A causa de esta elevación de temperatura, un silicato de magnesio amorfo habría cristalizado y formaría crisotilo (mineral del grupo de la serpentina), el cual, por deshidratación, constituiría un olivino magnesífero, como el que se encuentra formando cóndrulos en algunos condritos carbonosos. A consecuencia, de la formación de cantidades cada vez mayores de olivino, y después de piroxeno rómbico, se habrían originado los condritos olivínicos con piroxeno y, finalmente, los condritos enstatíticos. La transformación de olivino en piroxeno, acompañada de la separa-

Tectita de Thailandia, en la que se aprecian claramente las fosas y las arrugas superficiales atribuibles a la fusión al atravesar la atmósfera terrestre.

ción en estado metálico del hierro contenido en el mismo y en los piroxenos rómbicos, se habría producido por la acción reductora del material carbonoso, que se habría ido volatilizando poco a poco en forma de anhídrido carbónico.

En cambio, otros investigadores proponen un proceso evolutivo inverso, según el cual los condritos carbonosos serían el producto final de la transformación de condritos enstatíticos originales por adición de compuestos de carbono, oxígeno e hidrógeno (óxido de carbono, metano) existentes en los espacios interplanetarios.

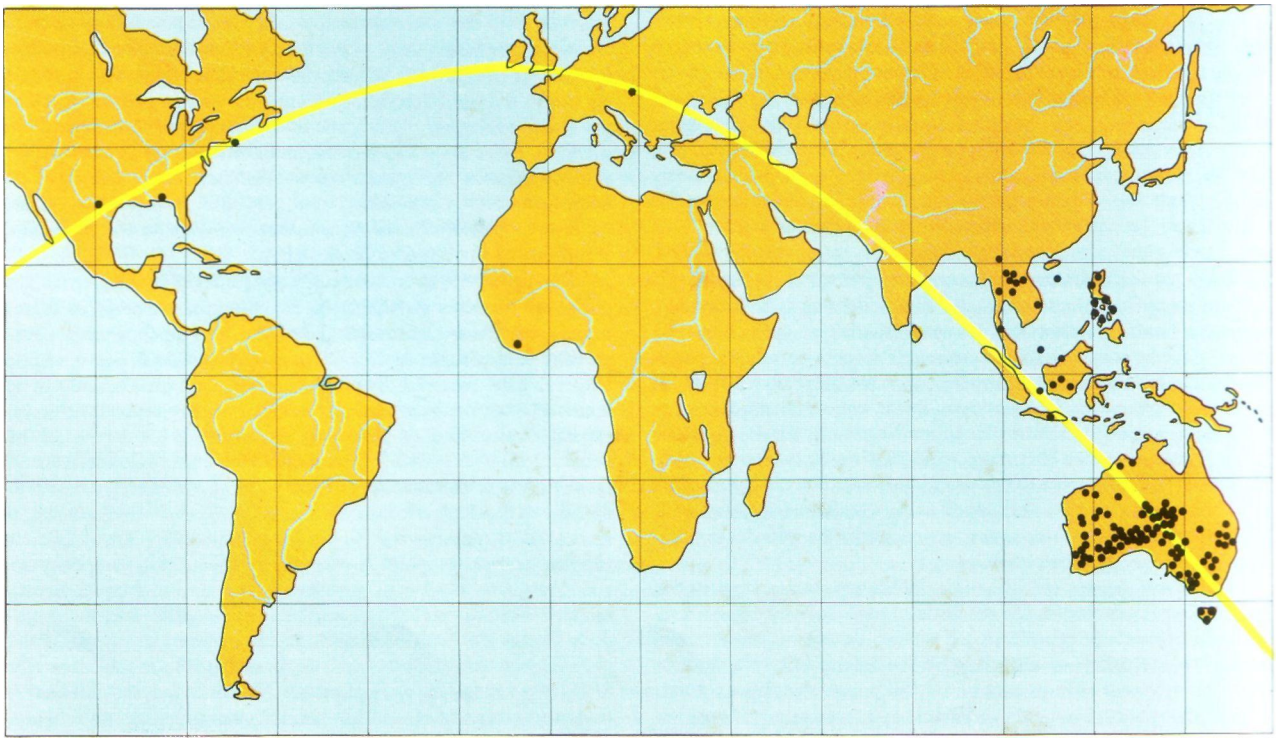
TECTITAS

Son pequeños cuerpos sólidos de color negruzco, de aspecto semejante a cantos rodados, y a los que se atribuye origen extraterrestre por algunas características. Sin embargo, la naturaleza meteorítica de las tectitas no es segura, sobre todo porque no se ha podido comprobar ninguna relación entre ellas y los fenómenos luminosos (meteoros) que acompañan a la caída de los meteoritos; por esto algunos autores sostienen que las tectitas son de origen terrestre.

Las tectitas, lo mismo que los meteoritos, se han encontrado en todas las regiones de la Tierra, pero únicamente en áreas perfectamente delimitadas, situadas casi todas a lo largo de un circulo máximo terrestre, inclinado respecto al ecuador. En efecto, se han hallado en gran cantidad (más de medio millón de ejemplares), y aún se siguen descubriendo, en Checoslovaquia, Indochina, Malasia, Filipinas, Australia y en algunas regiones de los EE.UU. (principalmente, Texas, Georgia y Massachusetts). La única localidad en la que se han encontrado tectitas fuera de esta faja, está situada en la Costa de Marfil (África occidental). Las tectitas de Checoslovaquia, denominadas ***moldavitas*** por encontrarse en los alrededores del río Moldava (del mismo modo que las tectitas procedentes de otras regiones se llaman ***filipinitas, australitas,*** etc.), se conocen desde la segunda mitad de siglo XVIII y eran talladas y pulidas para obtener piedras y objetos ornamentales. Se hallan en una área de unos 35 km de anchura por 150 km de longitud, con su eje mayor aproximadamente en dirección este-oeste.

Las tectitas suelen encontrarse enterradas en la capa superficial del suelo; también se hallan incluidas en depósitos sedimentarios del Cuaternario, del Terciario y, tal vez, del Mesozoico; esto indica que las tectitas han caído (si se acepta su origen extraterrestre) en eras geológicas pasadas. En los sedimentos recientes que cubren los fondos oceánicos del sur de Australia se han encontrado pequeños glóbulos transparentes de materia vitrea, de tamaño inferior a 1 mm. considerados como tectitas ***(microtectitas).***

Las tectitas suelen presentar dimensiones del orden de uno a pocos centímetros; están constituidas por materia vitrea con elevada proporción de sílice y poseen configuración diversa, por lo general redondeada (esferoidal, biconvexa, cilindrica, etc.); son opacas ***y*** negruzcas, pero transparentes cuando su espesor es delgado; en este último caso se presentan pardobscuras o verdeobscuras. Su superficie no es completamente lisa, sino algo rugosa o con cavidades diminutas que a veces se asemejan a burbujas de gas; algunas tectitas son huecas. Muchas de las que se han encontrado en Australia (australitas) tienen una forma que es muy difícil de explicar sin admitir su naturaleza meteorítica. Se trata de esferoides que presentan un reborde situado aproximadamente a lo largo de una circunferencia máxima, que ha sido originado por la concentración del estrato superior de la tectita, la cual resultó incandescente y pastosa por la fricción producida a su paso por la atmósfera. La zona de la tectita dirigida hacia delante en el momento de la caída tiene la superficie bastante lisa y puede presentar finas estrías que se dirigen al reborde, en tanto que la parte posterior presenta una superficie bastante irregular, recubierta por filamentos vitreos que han resultado proyectados en estado viscoso durante la caída. Estas mismas características son las que se observan en los meteoritos.



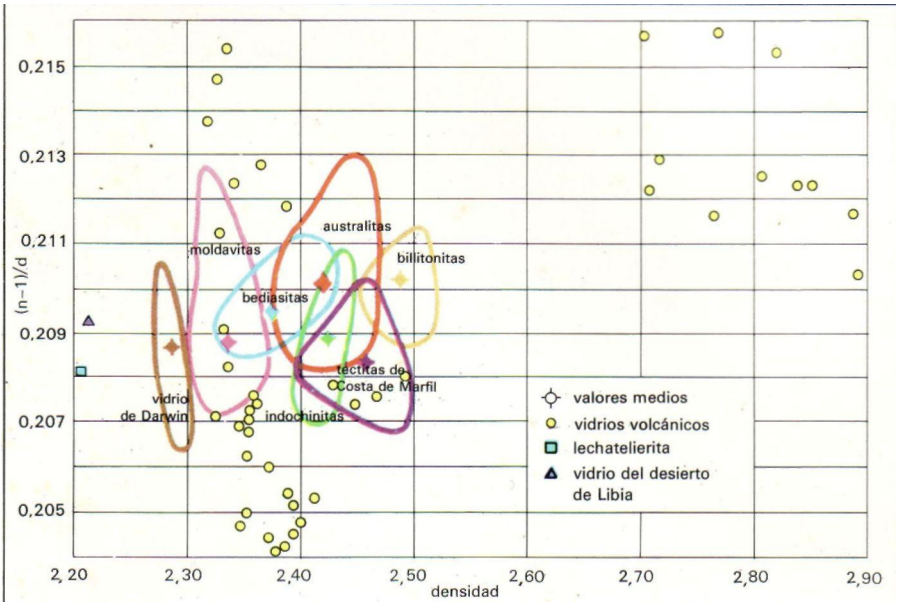
Los lugares en donde se han encontrado tectitas se hallan aproximadamente en un circulo máximo terrestre, excepto el ejemplar de Costa de Marfil.

La mayoría de las tectitas presentan la superficie opaca y áspera a consecuencia de los fenómenos de disolución y corrosión que se han originado durante los largos períodos en que han estado incluidas entre los sedimentos o en el terreno. El aspecto rugoso de la superficie de muchas de ellas corresponde a una estructura fluidal interna, subrayada por la alternancia, en la masa vitrea, de delgadas bandas de composición y color ligeramente diferentes. Las líneas de flujo no muestran la menor relación con el contorno de la tectita, sino que la cortan en cualquier dirección. Esto ha hecho pensar que las tectitas hayan podido formarse en el seno de masas vitreas de mayor tamaño, las cuales se han fragmentado en los últimos momentos de su estancia en la atmósfera. También la abrasión superficial durante su paso por la atmósfera ha podido originar la envoltura exterior de las tectitas.

Además de las líneas de flujo, en secciones delgadas del interior de la masa vítrea de las tectitas se observan a veces pequeñas áreas de color más claro constituidas por ***lechatelierita*** (vidrio compuesto exclusivamente por sílice). Estas inclusiones de lechatelierita pueden proceder de primitivos cristales de cuarzo que han experimentado fusión; en tal caso, la temperatura alcanzada en el interior de las tectitas debe haberse aproximado a 1.700 °C. La gran viscosidad del material vítreo que constituye las tectitas, durante el brevísimo tiempo en que ha permanecido en fusión, ha impedido que las gotas de cuarzo fundido hayan podido mezclarse con el resto de la masa vítrea, de composición algo diferente. En algunas tectitas se han observado también pequeños glóbulos de ferroníquel.

La composición química de las tectitas es bastante uniforme; el vidrio que las constituye está compuesto aproximadamente de un 75 % de sílice, 12 % de alúmina y cantidades menores de óxidos de hierro, magnesio, calcio, sodio, potasio, etc. Por tanto, las tectitas se diferencian bastante, en cuanto a composición química, de los meteoritos litoideos propiamente dichos, que son mucho más ricos en hierro y magnesio y más pobres en sílice. La composición química de las tectitas se parece mucho a la de varias rocas ácidas terrestres (ej.: granitos y pórfidos cuarcíferos) y también a la de algunas rocas sedimentarias (ej.: areniscas y arcillas).

Antes de que se admitiera como probable el origen extraterrestre de las tectitas se elaboraron varias hipótesis sobre su naturaleza terrestre, las cuales son aún mantenidas por algunos estudiosos. Varios autores las han interpretado como bombas volcánicas y lapilli; sin embargo, las tectitas se encuentran también en áreas geográficas en las que no existen volcanes activos ni extinguidos, y que por lo general no tienen asociación alguna con rocas volcánicas ni piroclásticas. Por otra parte, aunque su composición química es análoga a la de muchas ***obsidianas*** (vidrios volcánicos), se diferencian de ellas por su escaso o nulo contenido en agua, siempre inferior al 0,05 %, en contraposición con las varias unidades por ciento que contienen las obsidianas. Esto apoya la teoría de que las tectitas se han originado debido a la fusión de una materia vitrea en un lugar a baja presión, por ejemplo en los niveles más altos de la atmósfera terrestre. Además, algunas de las propiedades físicas del vidrio de las tectitas (como el índice de refracción y la densidad) son un poco diferentes a las de los vidrios volcánicos y a las de otros vidrios silíceos de origen terrestre. Por lo tanto, es igualmente improbable la identidad de las tectitas con las ***fulguritas,*** que son cuerpos alargados originados por acción de rayos sobre diversos materiales incoherentes (arenas) que se encuentran en la superficie terrestre, como también es improbable la identidad con los vidrios silíceos que se hallan en los cráteres de caída de los meteoritos. Asimismo, es poco probable la hipótesis de que las tectitas sean debidas a la fusión de materiales silíceos terrestres como consecuencia de un incendio, o de suponer que se trata de escorias de antiguos hornos de vidrio. Por tanto, el origen extraterrestre de las tectitas aparece como el más lógico, aun cuando las particularidades de su composición química planteen problemas que no puedan ser resueltos con certeza debido a la escasez de conocimientos sobre la composición de los cuerpos celestes, lo cual hay que tener siempre presente al formular hipótesis sobre el origen de los meteoritos.



Representación de la refracción específica de diversas tectitas y vidrios naturales en función de la densidad (n, **índice de refracción;** ***d,*** **densidad). Las tectitas corresponden a puntos dentro de áreas bien definidas, mientras que los valores de los vidrios volcánicos se indican en puntos diseminados por todo el diagrama (según Barnes).**

ORIGEN DE LOS METEORITOS

El origen extraterrestre de los meteoritos se reconoció de modo universal únicamente a finales del siglo pasado. Con anterioridad, habían tenido gran aceptación las teorías aristotélicas, modificadas después (hacia el año 1000) por Avicena. Según Aristóteles, los meteoritos eran cuerpos sólidos formados en la superficie terrestre por influencias celestes, los cuales habían sido proyectados posteriormente hacia el cielo por un fuerte viento (o por fenómenos naturales, como las erupciones volcánicas, los terremotos, etc.) y que habían caído de nuevo a la Tierra. Avicena suponía que los meteoritos se habían formado en las regiones superiores de la atmósfera. En la Edad Media muchos cuerpos naturales eran tenidos por meteoritos, entre ellos algunos fósiles, como los dientes de los escualos y los belemnites, así como algunos objetos producto de la elaboración humana en la Antigüedad. En los últimos años del siglo XVIII, el alemán E. F. Chladni sostuvo que los meteoritos eran fragmentos de cuerpos celestes, resultado de fenómenos explosivos o de choques entre ellos. Estas ideas se fueron afirmando poco a poco hasta la actualidad, en que constituyen el factor común de la mayor parte de las diversas teorías que se han formulado sobre el origen de los meteoritos, cuyos detalles suelen basarse en datos que difícilmente corresponden a hechos objetivos.

Los meteoritos, a pesar de la diversidad de su composición química, forman una serie continua en la que los términos principales están unidos entre sí por todos los intermedios. Esto habla en favor de un origen común a partir de un cuerpo celeste único, del que los distintos términos de la serie representan diferentes porciones, o bien a partir de unos pocos cuerpos celestes de composición semejante. Tales cuerpos celestes pertenecían probablemente al sistema solar, puesto que las pocas órbitas de meteoritos que se han calculado son elípticas; además, el afelio de estas órbitas se encuentra en la zona de los asteroides. Esta consideración y otras permiten admitir que los meteoritos son asteroides de órbita excéntrica, que al llegar a la proximidad de la Tierra han sido atraídos por ella.

Disponiendo los meteoritos en orden de densidad, se obtiene una serie que comienza con los sideritos (densidad aproximada, 7,5), continúa con los siderolitos (densidad aproximada, 5) y llega a los aerolitos (densidad aproximada, 3,5). Si es válido postular una analogía de composición y de estructura interna entre la Tierra y el cuerpo o cuerpos celestes de cuya desintegración resultaron los asteroides y por tanto, con toda seguridad, los meteoritos, se puede imaginar la composición interna del Globo e interpretar de este modo las variaciones de densidad y de otras propiedades físicas de la Tierra que nos indican los datos geofísicos. Este paralelismo puede admitirse como posible, puesto que el proceso de formación y evolución de los distintos cuerpos planetarios fue seguramente el mismo para todos, y se realizó, según la hipótesis que hoy prevalece, por separación y enfriamiento progresivo de núcleos de materia solar de una nebulosa en rotación, o bien por agregación de materia originalmente dispersa y a baja temperatura, con sucesivo recalentamiento de los cuerpos así formados, debido a la compresión adiabática producida por su progresiva concentración o a fenómenos de radiactividad. De acuerdo con la mayor parte de estas teorías, en la

Sección delgada del condrito Mezô-Madaras, de Checoslovaquia (nícoles cruzados, x 15 x 1,5).

actualidad el núcleo terrestre se considera constituido por hierro y níquel (como los sideritos), y el manto por una mezcla de ferroníquel y silicatos, con cantidad cada vez mayor de estos últimos a medida que aumenta su distancia al centro, hasta quedar constituido casi sólo por silicatos en los niveles situados inmediatamente debajo de la corteza terrestre. Quizás en las tectitas puede apreciarse una analogía de composición química con la corteza terrestre, constituida predominantemente por rocas muy ricas en sílice y alúmina.

Algunos estudiosos afirman que el constituyente primitivo de los cuerpos planetarios, del que después se fueron diferenciando niveles de composición distinta que corresponden a las diversas clases de meteoritos, estaría representado por los condritos carbonosos. Éstos se habrían formado por agregación de polvo cósmico, y el carbono contenido en este polvo tendría un origen inorgánico. Las elevadas temperaturas producidas gradualmente en el interior del cuerpo planetario provocaron seguramente su diferenciación en niveles concéntricos.

Cerca de la superficie los condritos carbonosos quedaron prácticamente inalterados, formando la corteza del planeta, pero el aumento de temperatura con la profundidad provocó una deshidratación y una fusión, parcial o total, de la materia sólida, con procesos simultáneos de reducción gracias a las materias carbonosas. A consecuencia de estos procesos el hierro, que en los condritos carbonosos se encuentra en su totalidad en estado de ion ferroso y combinado con los otros elementos, fue reducido a hierro metálico y se concentró en el núcleo del planeta; al mismo tiempo, los niveles más profundos se empobrecían en oxígeno y carbono, por escapar éstos en forma de anhídrido carbónico.

Durante el lentísimo enfriamiento del núcleo del planeta tuvo lugar la solidificación del ferroníquel en grandes cristales y la consiguiente separación en fases con distinta proporción de níquel. La formación de los pocos meteoritos que se conocen muy ricos en níquel (ataxitos niquelíferos) se ha atribuido a fenómenos de diferenciación por gravedad, análogos a los de solidificación de las rocas ígneas intrusivas. De este modo, los primeros cristales que se separaron por enfriamiento de la mezcla metálica en fusión, más ricos en hierro de lo que corresponde a la mezcla original, habrían sido causa del progresivo enriquecimiento en níquel del residuo fundido y de la cristalización final de una tenita muy niquelífera, que por enfriamiento ulterior pudo dar origen a una mezcla microcristalina de tenita y camacita (plesita).

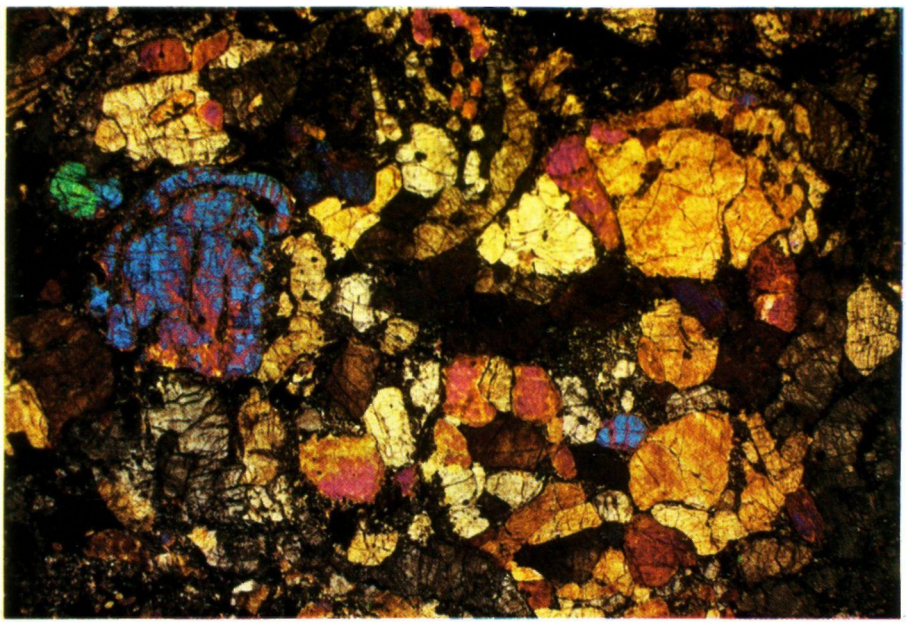
En el interior del cuerpo planetario, y a menos profundidad, se formó un nivel continuo o de focos de magma litógeno, los cuales cristalizaron en parte en ambiente intrusivo y originaron los acondritos, que son los meteoritos más parecidos, por su estructura y composición, a algunas rocas ígneas intrusivas terrestres. Asimismo, durante la solidificación de los acondritos se produjeron fenómenos de diferenciación magmática análogos a los que se admiten para las rocas ígneas terrestres.

Algunos autores sostienen que en el transcurso de la solidificación del magma en el interior del planeta, o planetas, existieron fenómenos volcánicos acompañados de grandes desprendimientos de gases y con expulsión y solidificación de lava en la superficie del planeta. El paso de los gases magmáticos a través de las rocas ya consolidadas habría producido la estructura venada, muy frecuente en los aerolitos, y quizá también la estructura brechoide (que pudo producirse asimismo por deformaciones mecánicas de las rocas). Según algunos autores, los condritos representarían el resultado de la consolidación efusiva del magma en la superficie del planeta; según otros, se habrían formado por consolidación rápida de materiales en fusión, como consecuencia de la explosión y fragmentación del cuerpo planetario, o quizás en condiciones intrusivas, a causa de un fenómeno de diferenciación magmática en estado líquido. Además, la forma redondeada de muchos meteoritos la interpretan algunos autores como consecuencia de la solidificación de gotas de silicatos fundidos; es de notar que a veces los cóndrulos se encuentran rotos o incluso tienen la impresión de cóndrulos adyacentes. Otros, por el contrario, sostienen que los cóndrulos se han formado en el interior de cuerpos litoideos sólidos, constituidos por materia amorfa, debido a la cristalización producida por un aumento de temperatura. Esto pudiera ser posible para algunos condritos carbonosos, en los que se observan cóndrulos y agrupaciones irregulares de olivino englobados en la masa amorfa o criptocristalina.

Después de la formación del material sólido que constituye los meteoritos, hubo algunas modificaciones de la estructura debidas a elevaciones de temperatura producidas, probablemente, al paso del meteorito por las proximidades del Sol. Estas modificaciones consisten en una recristalización general y en el desarrollo de estructuras análogas a las que se encuentran en las rocas metamórficas terrestres. Los ataxitos poco niquelíferos, con estructura microcristalina, y algunos aerolitos, con estructura condrítica casi borrada, serían el resultado del metamorfismo térmico de hexaedritos y condritos respectivamente.

En este cuadro general de las posibles relaciones genéticas entre los distintos tipos de meteoritos, no es fácil encontrar un lugar para las tectitas, sobre todo debido a la gran diferencia de su composición química con respecto a los meteoritos propiamente dichos; por este motivo no se ha reconocido de modo universal la naturaleza meteorítica de las tectitas. Éstas podrían representar el nivel más externo del cuerpo o cuerpos planetarios de los que se han producido los meteoritos, de composición análoga al sial terrestre, constituido por cuarzo y aluminosilicatos de metales alcalinos. Este nivel superficial habría tenido estructura vítrea y se habría formado por consolidación, en condiciones efusivas, de un residuo ácido resultante de la diferenciación del magma litógeno básico. La estructura vítrea de la tectitas podría haberse originado también por la fusión resultante de su paso por la atmósfera; en efecto, las rocas de composición granítica funden a temperatura más baja que las básicas y ultrabásicas, que pueden considerarse como equivalentes a los aerolitos,

Sección delgada del condrito Bluff Settlement, de Texas (EE.UU.); se aprecian huellas de cóndrulos policristalinos (nícoles cruzados, x 19 x 1,5).



pero la fusión está favorecida por la presencia de vapor de agua a presión, en tanto que las tectitas son muy pobres en agua.

La aplicación de los criterios que fijan la edad absoluta de los meteoritos ha permitido obtener la edad probable de su existencia como tales cuerpos sólidos. Las diferencias en los resultados obtenidos por los distintos métodos (del plomo, del potasio-argón y muchos otros) deben atribuirse, en gran parte, a la complicada serie de eventos que han sufrido los meteoritos y que han sido la causa de repetidas modificaciones de estructura y composición, sobre todo en lo que afecta a la composición isotópica de los elementos y a la cantidad de los mismos que se encuentran sólo en trazas, por varios motivos (acción de los rayos cósmicos, metamorfismo térmico en la proximidad del Sol, etc.). Además, es digno de observar que la edad máxima alcanzada por los meteoritos no supera los 4.5000 millones de años, y una gran parte de los valores determinados concuerda con esta cifra. Puesto que se admite que ésta es la edad aproximada de la formación de los planetas del sistema solar, se puede confirmar la idea de que los meteoritos son fragmentos de uno o más cuerpos planetarios.

Al realizar las mismas observaciones con las tectitas se han obtenido resultados discordantes, lo cual puede atribuirse en gran parte al hecho de que los diversos métodos de medida se basan en procesos que han podido producirse en épocas diferentes de la existencia de las tectitas. En algunos casos la edad determinada cae dentro de las cifras obtenidas para los meteoritos, pero en otros corresponde a la edad geológica de los terrenos en que se encuentran las tectitas. Sin embargo, estos últimos valores se referían al momento en que ha ocurrido la fusión de los materiales que constituyen las tectitas, lo cual se ha originado durante la caída, y no a la edad de las tectitas como tales cuerpos sólidos. Por otra parte, se desconoce la composición mineralógica de las tectitas antes de atravesar la atmósfera (si es que se trata de meteoritos).

Bibliografía

GEISS J. y GOLDBERG E. D., ***Earth Science and Meteorites,*** Wiley, New York, 1963. HEIDE F., ***Kleine Meteoritenkunde,*** Springer, Berlin, 1957. KRINOV E. L., ***Principies of meteoritics*** (trad. de ***Osnovy meteoritiki),*** Pergamon, Oxford, 1960. MASON B., ***Meteorites,*** Wiley, New York, 1962. MOORE C. B. (ed.), ***Researches on meteorites,*** Wiley, New York, 1962. NININGER H. H., ***Out of the sky,*** Dover, New York, 1959. PRIOR G. T. y HEY M. H., ***Catalogue of meteorites,*** British Museum, London, 1953.

SALVAT, S. A. DE EDICIONES, Pamplona, 1968
e ISTITUTO GEOGRAFICO DI AGOSTINI

Depósito legal B. 17.666-1968 (VIII)

IMPRESO EN:

IMPRENTA HISPANO-AMERICANA, S. A. - Mallorca, 51 - Barcelona-1970
MATEU CROMO. - Carretera Fuenlabrada, s/n., Pinto, Madrid.
FOURNIER - Heraclio Fournier, 17 - Vitoria
IMPRESO EN ESPAÑA