

EL METEORITO ESQUEL

UNA GEMA QUE CAYÓ DEL CIELO

Un meteorito formado por cristales de olivino inmersos en metal, de excepcional estética e interés científico.

Isabel Giraudo de Lucio

Los meteoritos son fragmentos de cuerpos rocosos o metálicos que alcanzan la Tierra provenientes del espacio exterior. Aunque hay un pequeño número de meteoritos procedentes del planeta Marte y de la Luna, el lugar de origen de su gran mayoría es el Cinturón de Asteroides, una extensa franja situada entre el planeta Marte y el planeta Júpiter, en la que orbitan cuerpos subplanetarios de tamaños que oscilan entre casi 1.000 km y pocos metros de diámetro.

Al presente se han catalogado y descrito miles de asteroides, y se estima que deben ser más de un millón los de tamaños mayores a un kilómetro, y quizás miles de millones los más pequeños. Paralelamente, se han estudiado y clasificado miles de meteoritos y se los interpreta como muestras de unos -como mínimo- 50 distintos asteroides de origen.

El interés por estos fragmentos pétreos o metálicos reside en que retienen claves que nos permiten decodificar la historia del sistema solar primitivo y la historia temprana de nuestro propio planeta.

El meteorito Esquel tiene la particularidad de ser metálico y al mismo tiempo contener gran proporción de cristales transparentes inmersos en él. Un enjambre luminoso de transparencias en matices de verde resplandeciendo a través del brillo del metal (ver Figura 1).

En el principio...la nube molecular

Observaciones astronómicas han permitido interpretar que los sistemas solares se forman cuando fragmentos de grandes nubes moleculares colapsan. Estas son nubes interestelares cuya densidad y tamaño

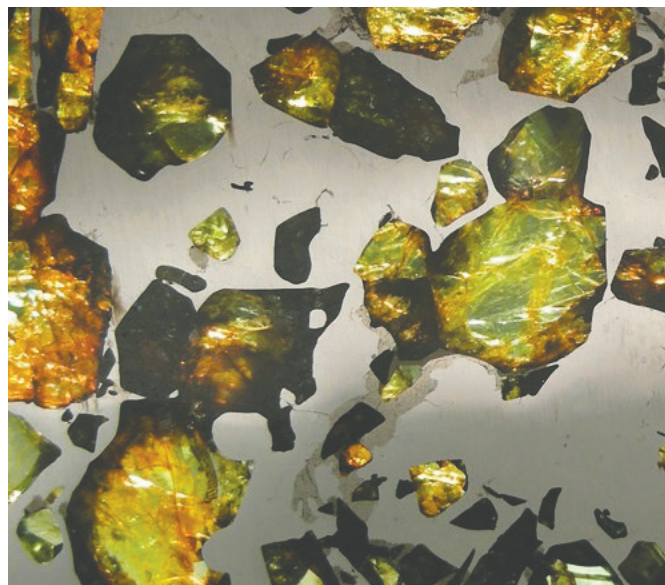


Figura 1. Corte del meteorito Esquel.

permiten la formación de moléculas, a diferencia de otras zonas del espacio interestelar que consisten predominantemente en gas ionizado. Cerca del 1% de la masa de estas nubes consiste en partículas de polvo de tamaños inferiores al micrón, otro 1% son moléculas gaseosas más pesadas que el helio, y lo restante es hidrógeno y helio gaseoso.

El colapso gravitatorio de un fragmento de la nube molecular conduce a la formación de una nebulosa protosolar (ver Glosario), con una protoestrella (ver Glosario) en su interior, y un disco circumestelar de materia sólida y gas rotando a su alrededor. Los pequeños volúmenes de materia sólida (partículas de polvo, granos, corpúsculos) se unen unos a otros inmersos en el gas del disco y permanecen unidos incorporando materiales nuevos para formar cuerpos mayores en un proceso llamado acreción.

La protoestrella crece concentrando casi el 99% de la masa de la nebulosa protosolar, generando una alta energía térmica y gravitatoria en su entorno. Alcanza su dimensión de estrella cuando la densidad en su interior es tal que desencadena el proceso de fusión nuclear de hidrógeno (ver Glosario). En el disco circumestelar, en donde orbita el 1% restante de la masa de la nebulosa, el proceso de acreción dará origen al

Palabras clave: asteroides, Esquel, meteoritos, olivinos, pallasitas.

Isabel Giraudo de Lucio¹

Licenciada en Filosofía y en Geología
piedrasdepatagonia@elbolson.com

¹ Museo de Piedras Patagónicas
Mallín Ahogado, El Bolsón, Río Negro, Argentina.

Recibido: 11/09/2020. Aceptado: 20/11/2020.

resto del sistema solar: planetas, asteroides, cometas, cuerpos menores orbitantes y polvo interplanetario (ver Figura 2).

Las fases estelares se infieren a partir de observaciones astronómicas de nebulosas y estrellas en formación. También algunos de los procesos de formación y evolución de los asteroides pueden ser inferidos a partir de estas observaciones.

Sin embargo, tanto la inferencia sobre los elementos contenidos en la nebulosa protosolar, como la reconstrucción de los procesos de crecimiento y evolución de los cuerpos planetarios y asteroidales, sólo es posible de manera tangible a través del estudio de los meteoritos.

Mensajes remotos encriptados

Algunos tipos de meteoritos son la muestra de mano de la composición inicial de la nebulosa. Otros, constituyen registros de cada fase sucesiva de los procesos tempranos acaecidos en el sistema solar en formación.

Hay meteoritos que retienen los primeros sólidos acrecionados: son pequeños agregados, de formas irregulares o más o menos esféricas, de minerales formados mayormente por calcio y aluminio, llamados CAIs (acrónimo de "Inclusiones de Calcio y Aluminio"). Calcio y aluminio son elementos altamente refractarios (se encuentran en fases sólidas a muy altas temperaturas) y se interpreta que se condensaron formando minerales a partir de una fase vapor, sin pasar por una fase líquida intermedia. Además, pequeñas cantidades de elementos radiactivos contenidos en esas inclusiones han permitido datar con precisión el nacimiento de ellas, hace 4.567 millones de años. Así, las CAIs marcan el tiempo cero del Sistema Solar.

En esos mismos meteoritos que contienen las CAIs, llamados "meteoritos primitivos", se encuentran, además, pequeñas esférulas, llamadas "cóndrulos", cuyos tamaños oscilan entre décimas de milímetros a pocos milímetros. Se las interpreta como pequeñas gotas de fluido solidificadas, formadas a partir de una fase líquida, un fundido efímero en condiciones de ingravidez.

Los cóndrulos están formados en gran parte por olivino, un mineral que contiene silicio, magnesio y hierro, los elementos más abundantes de la Tierra sólida, junto con oxígeno, uno de los elementos más abundantes y ubicuos del Sistema Solar entero, capaz de formar fases sólidas, líquidas y gaseosas. El olivino se encuentra dentro del grupo de minerales llamados silicatos, que son los principales formadores de rocas en nuestro planeta y los restantes planetas del Sistema Solar interno: Mercurio, Venus y Marte, además de muchos asteroides.

La composición de los meteoritos primitivos también permite saber que, además de minerales de calcio y



Imagen: NASA Telescopio Espacial Hubble

Figura 2. Fotografía de una estrella en formación -de un millón de años- con un disco circunestelar rico en gas y polvo.

aluminio, y de silicatos como el olivino, a partir del polvo de la nebulosa condensaron también metales, fundamentalmente hierro y níquel, lo mismo que sulfuros, que son compuestos de azufre y metales, siendo un sulfuro de hierro el predominante.

Estos meteoritos primitivos, llamados "condritos"- por contener cóndrulos- retienen así los primeros sólidos formados en el disco circunestelar, ese flujo turbulento de gas y polvo a partir del cual se van a condensar planetas, satélites, cometas y asteroides (ver Figura 3).

La fragua asteroidal

En el disco circunestelar, además de estar presentes todos los elementos que forman hoy los cuerpos orbitantes del Sistema Solar, distribuidos de manera mayormente uniforme, también se encontraban algunos isótopos (ver Glosario) radiactivos de corta vida como el aluminio-26 (^{26}Al) y el hierro-60 (^{60}Fe). Éstos son llamados "de corta vida" porque sus períodos de semidesintegración abarcan, como mucho, unos pocos millones de años, a diferencia de los más conocidos, como el torio o el uranio, por ejemplo, cuyos períodos de semidesintegración abarcan miles de millones de años.

Los procesos de desintegración radiactiva, además de la emisión de rayos de alta energía, también liberan mucho calor. Se piensa que la desintegración de estos isótopos radiactivos de corta vida generó, en algunos cuerpos ya acrecionados, de unos cinco a siete km de diámetro como mínimo, temperaturas a las cuales funden metales y silicatos, cercanas a los 1.700°C .

Los modelos térmicos postulan que, a partir de un material primigenio similar al contenido en los meteoritos primitivos, en algunos cuerpos, al ser calentados por la acción de los isótopos radiactivos de



Figura 3. Secuencia de condensación en la nebulosa protosolar. A. Minerales refractarios de calcio y aluminio en CAIs. B. Metales como hierro y níquel. C. Olivino y otros silicatos de alta temperatura en cóndrulos. Tiempo en millones de años (Ma).

corta vida mencionados, y al alcanzar temperaturas de entre 950°C y 980°C, comenzarían a fundir metales asociados a sulfuros.

Los metales, entre los cuales predomina una aleación de hierro y níquel, tienen densidades promedio de entre 7,8 y 7,9 gramos por centímetro cúbico, mientras que los sulfuros de metales tienen densidades cercanas a los 5 gramos por centímetro cúbico. Los silicatos presentes en esos mismos meteoritos, como el olivino, tienen, en cambio, densidades cercanas a los 3,3 gramos por centímetro cúbico. Así, los fundidos de metales y sulfuros, más densos que los silicatos, que a esas temperaturas todavía permanecerían sólidos, comenzarían a separarse por gravedad, y a migrar hacia las partes más profundas del cuerpo protoplanetario o protoasteroidal.

Al continuar el proceso de incremento del calor, y alcanzar temperaturas cercanas a los 1.050°C,

comenzarían a fundir también algunos silicatos, acelerando el proceso de separación con los metales.

Algunos fundidos tempranos de silicatos, productos de fusión parcial y menos densos aun que el olivino, migrarían hacia la parte más superficial del cuerpo asteroidal, y serían expulsados en parte a través de erupciones volcánicas o cubrirían la superficie del protoplaneta o asteroide con un "océano de magma".

Al generalizarse el proceso de fusión, a temperaturas cercanas a los 1.700°C, los silicatos más densos, como los olivinos, separados ya por gravedad, tanto de metales más densos como de otros silicatos menos densos, comenzarían a recristalizar formando la capa intermedia y más voluminosa del cuerpo entero: el manto.

El resultado de la culminación de estos procesos es la estructura interna de la Tierra, de los planetas rocosos y de los asteroides diferenciados: una capa

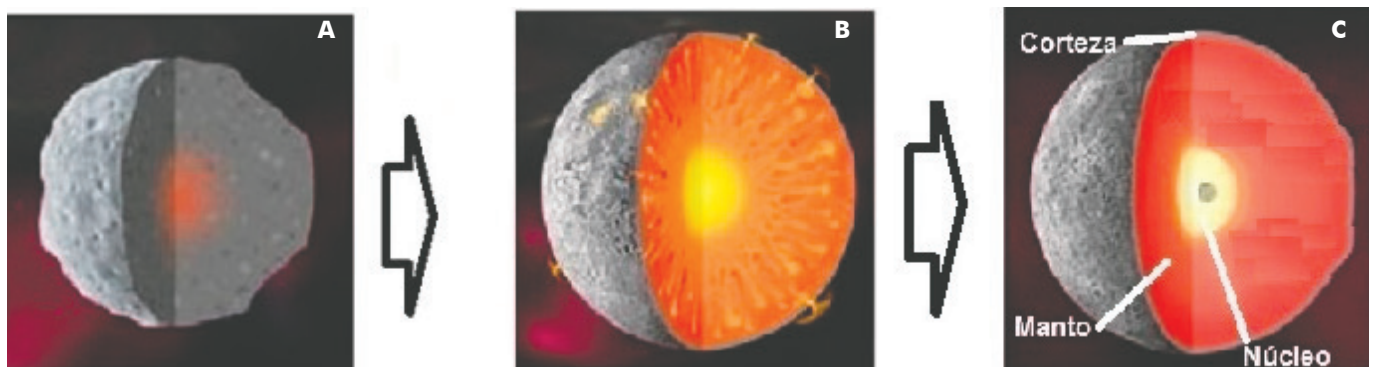


Figura 4. A. Al comenzar la acreción de protoplanetas y asteroides se formarían cuerpos no diferenciados de material condritico. Algunos de ellos seguirían acrecionando material sólido hasta alcanzar un tamaño mínimo de 100 km, como para comenzar el proceso de diferenciación. En tanto, el calor generado por radionúclidos de corta vida, como ^{26}Al y ^{60}Fe , provocaría un aumento de las temperaturas. B. A 950°C comenzarían a fundir metales asociados a sulfuros, y luego a segregarse y migrar hacia el centro por diferencia de densidades. A 1.050°C comenzaría la fusión parcial de silicatos. Los primeros fundidos migrarían a la superficie y parte de ellos sería eyectada por vulcanismo explosivo. C. Al completarse la diferenciación, los metales concentrados en el centro formarían el núcleo, los silicatos más densos formarían el manto, y los silicatos menos densos, la corteza.

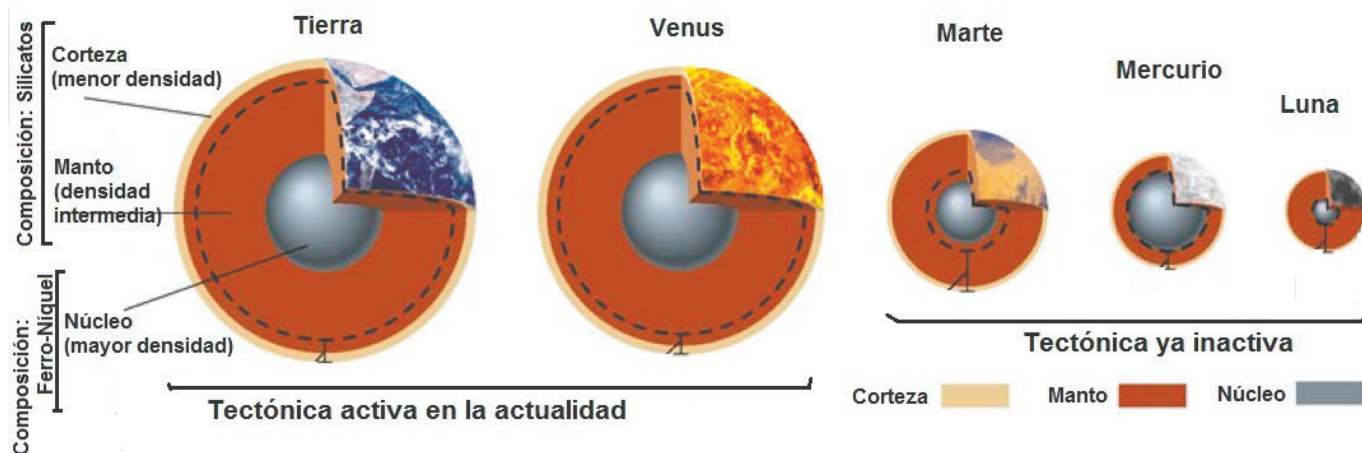


Figura 5. Estructura interna de los planetas terrestres y la Luna.

más externa formada por silicatos menos densos (corteza), una capa intermedia formada por silicatos más densos entre los que se encontraría un gran porcentaje de olivino (manto) y un núcleo interno esencialmente metálico, formado por hierro y níquel con algún porcentaje de sulfuros (ver Figuras 4 y 5).

Colisiones y catástrofes siderales

Hay meteoritos no condriticos, provenientes de planetas rocosos o asteroides diferenciados, que consisten en rocas similares a los basaltos de la corteza terrestre, y otros que consisten en rocas de idéntica composición a las halladas en el manto superior terrestre, constituidas fundamentalmente por el mineral olivino y otros silicatos que cristalizan también a altas temperaturas, como ese mineral, y que tienen densidades semejantes.

Hay también otros meteoritos, quizás los más conocidos, aunque no los más abundantes, que consisten esencialmente en aleaciones naturales de hierro y níquel, y que tienen una composición similar a la que se estima tiene el núcleo terrestre, que se encuentra a una profundidad de 2.900 km.

Las composiciones de los meteoritos nos permiten inferir los procesos acaecidos en los asteroides de los cuales provienen.

Los modelos muestran que cuerpos del tamaño de la Luna (con masas 80 veces menores a la masa de la Tierra), podrían haberse formado en el Sistema Solar interno entre los cien mil y los diez millones de años desde el comienzo del Sistema Solar. Se piensa que en tanto los cuerpos protoplanetarios adquirirían grandes volúmenes, por acreción de cuerpos menores, las colisiones entre ellos debieron ser muy frecuentes, en cuanto se encontraran en órbitas todavía imprecisas e inestables.

Pero pronto la gravedad comenzaría a estabilizar órbitas. Los cuerpos más grandes crecen más rápido, en tanto atraen a otros cuerpos en áreas más grandes, además, tienden a adquirir órbitas más regulares, lo que concentra las fuerzas gravitacionales y retroalimenta el

proceso, generando un nuevo aumento en los ritmos de crecimiento. En la medida en que unos pocos cuerpos grandes se volvieran dominantes, el crecimiento comenzaría a desacelerarse hasta culminar con unos pocos grandes cuerpos planetarios (ver Figura 6).

Sin embargo, no todas las colisiones parecen haber finalizado en una acreción exitosa. Modelos numéricos recientemente desarrollados muestran que, tomando en cuenta las masas y las velocidades estimables, y en el escenario propuesto, cerca de la mitad de las grandes colisiones no terminarían en acreción de masas. En muchos casos, especialmente en impactos tangenciales, el cuerpo impactante o gran parte de él resultaría fragmentado sin posterior reintegración. Se piensa que los fragmentos de esos cuerpos desintegrados por impactos, no reincorporados a los grandes planetas y arrojados fuera del sistema solar interno, habrían sido desplazados al cinturón de asteroides.

Los procesos de colisión, seguidos por erosión, fractura o desintegración, parecen haber sido la regla y no la excepción en el sistema solar primitivo. En muchos casos tuvo lugar una reacreción aleatoria de fragmentos dispersos dando lugar a la formación de asteroides de segunda generación. Muy pocos asteroides parecen haber sobrevivido incólumes (ver Figuras 7 y 8).



Figura 6. Representación artística de una colisión entre protoplanetas.

Imagen: Tomada de Youdin (2010)

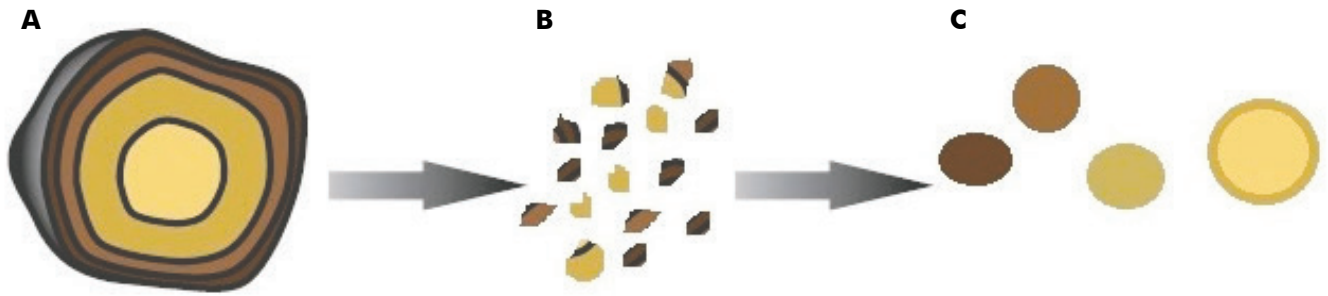


Figura 7. Modelo de formación de asteroides no diferenciados de segunda generación por reacreción de escombros. A. Materiales prístinos acrecionados: CAIs, cóndrulos, metales, con muy bajo grado de alteración o metamorfismo. B. Desmembramiento por colisiones. C. Nueva reacreción de fragmentos desmembrados: asteroides que albergan meteoritos primitivos.

Bellas y enigmáticas

Como se dijo, hay meteoritos formados por rocas a las que se presume provenientes del manto de un cuerpo asteroidal diferenciado, otros, por rocas de corteza, y otros, por metales del núcleo. Hay, además, otros excepcionales meteoritos compuestos por rocas del manto y metales del núcleo al mismo tiempo: son los llamados "pallasitas".

Las pallasitas, entre las cuales uno de los especímenes más bellos conocidos es la pallasita Esquel, son esos meteoritos que brindan la inesperada imagen de cristales de olivinos inmersos en metal (ver Figura 9).

La primera pallasita conocida fue encontrada en 1749, en una montaña al este del río Yenisei, un largo río de la Rusia asiática, en Siberia, cerca de Krasnoyarsk. Fue estudiada en 1772 por J. S. Pallas, un naturalista alemán que trabajaba en la Academia de Ciencias de San Petersburgo, quien pronto determinó su origen extraterrestre e hizo llegar un fragmento a E. Chladni, uno de los pioneros en la investigación moderna sobre meteoritos. Éste la llamó, informalmente, "el meteorito metálico de Pallas", de donde derivó finalmente el término "pallasita".

Lo primero que se pensó es que estos meteoritos se habrían formado en un asteroide diferenciado, en el que ya existiría un núcleo metálico y un manto de composición olivínica, y que serían provenientes de una capa intermedia, situada en la base del manto, en

la interfase con el núcleo, capa a la que se denominó, tentativamente, "capa pallasítica", en la que el proceso de separación entre los cristales de olivinos y el metal no habría terminado de concretarse (ver Figura 10).

Pero pronto surgieron dudas en torno a esa interpretación. ¿En qué momento del proceso de enfriamiento del cuerpo asteroidal habrían quedado atrapados esos cristales de olivinos ya sólidos en un fundido metálico? Ya Lord Rayleigh -destacado físico, descubridor del argón y premio Nobel de Física en 1904- había llamado la atención sobre lo que él denominó "la paradoja de las pallasitas".

La paradoja puede enunciarse así: por un lado, los tiempos de enfriamiento para núcleos metálicos de cuerpos asteroidales de kilómetros de diámetro se estiman en, como mínimo, centenas de miles de años (o quizás millones de años si son muy grandes), por otra parte, hay una notable diferencia de densidades entre los olivinos y el metal (como se mencionó, el metal tiene una densidad de 7,9 gramos por centímetro cúbico, mientras que el olivino una de 3,3 gramos por centímetro cúbico) y esa diferencia de densidades debería causar una rápida separación gravitatoria entre ambos materiales (como un corcho en el agua). A unos 1.500°C, por ejemplo, los olivinos, que ya estarían sólidos mientras que el metal seguiría estando líquido, ascenderían rápidamente flotando por sobre el fundido metálico. ¿Cómo, entonces, los tiempos de enfriamiento del fundido metálico podrían haber sido

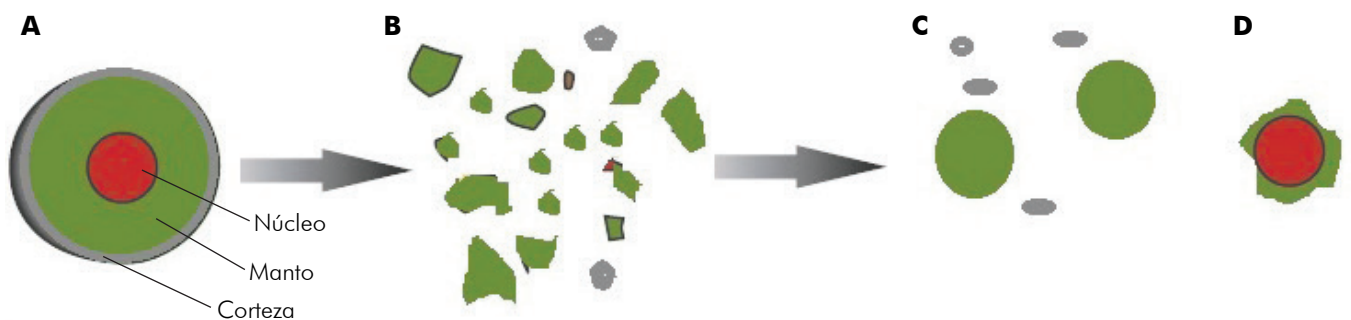


Figura 8. Modelo de formación de asteroides diferenciados de segunda generación. A. Cuerpos diferenciados por fusión, migración por gravedad y recristalización. B. Colisiones tangenciales que arrancan fragmentos de manto y corteza. C. Nuevas acreciones de fragmentos eyectados: asteroides con composiciones rocosas de minerales del manto o de la corteza. D. Núcleos metálicos remanentes despojados de manto.



Figura 9. Pallasita Esquel. Ejemplar exhibido en el Museo de Piedras Patagónicas.

más acelerados que los tiempos de flotación de los olivinos, como para que éstos quedaran atrapados en el metal?

Por otra parte, también llamaba a sorpresa el hecho de que algunos olivinos presentaran bordes angulosos, mientras que otros eran redondeados.

Se esbozaron varios modelos de explicación. Uno de ellos propuso la existencia de un núcleo metálico todavía líquido, aunque muy viscoso, por debajo de un manto olivínico, ya separado por flotación, en el interior de un asteroide diferenciado. El metal del núcleo, en proceso de enfriamiento, tendría corrientes internas convectivas, que harían ascender materiales

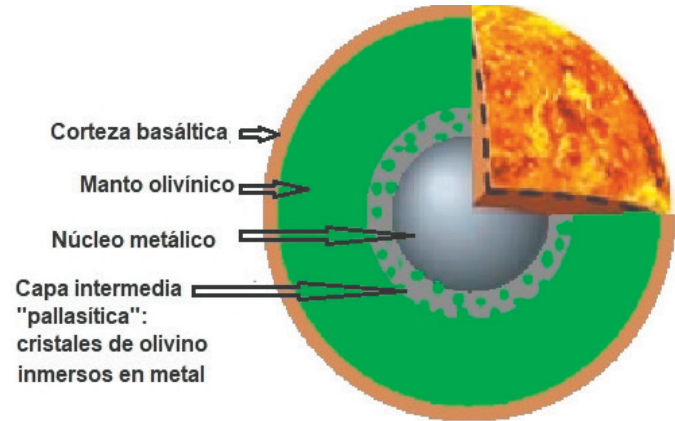


Figura 10. Modelo propuesto de asteroide diferenciado con "capa pallasítica"

más profundos y calientes. Éstos, al alcanzar la parte externa, cercana a la base del manto, perderían calor, experimentando así un aumento de la densidad que los llevaría hundirse nuevamente, generando movimientos circulares. Esos movimientos convectivos arrancarían cristales de olivino situados en la base del manto y los arrastrarían hacia el fundido. En tanto el proceso de enfriamiento en el núcleo continuara desde afuera hacia adentro, la viscosidad del fundido de la parte más externa del núcleo aumentaría progresivamente hasta solidificar antes de que los olivinos extraídos de la base del manto hubieran podido volver a ascender. De este modo, los cristales de olivino que hubieran quedado atrapados en el metal conformarían la "capa pallasítica", intermedia entre un núcleo puramente metálico y un manto olivínico (ver Figura 11).

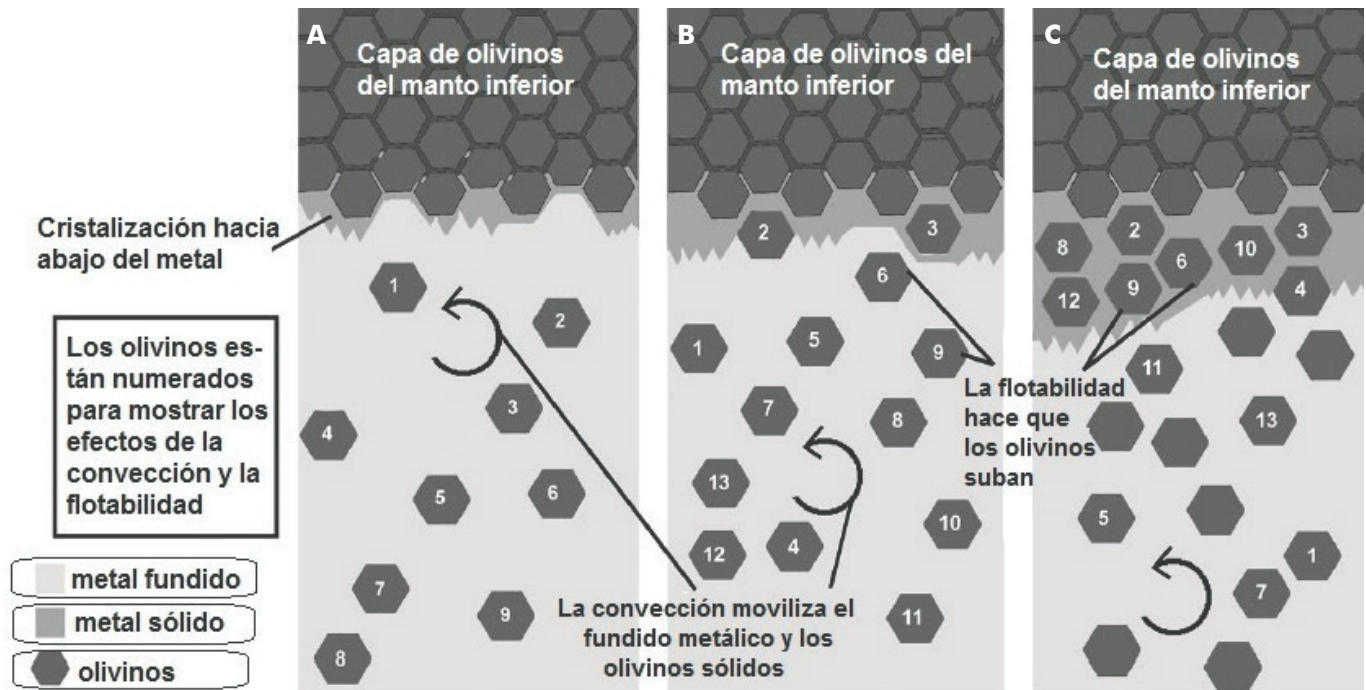


Imagen: Tomada de Boesenberg et al. (2012)

Figura 11. Esquema simplificado de un modelo que explica la formación de las pallasitas. A. El núcleo metálico comienza a cristalizar en tanto pierde calor por contacto con el manto que está por encima. Los movimientos convectivos arrastran cristales de olivino llevándolos a la inmersión en el manto. B. Algunos olivinos que suben son englobados dentro del metal que se solidifica lentamente, mientras que otros son dispersados por la convección generada en un núcleo metálico todavía parcialmente fundido. C. En tanto la cristalización del metal sigue progresando hacia abajo, nuevos olivinos se van incorporando, formando así la "capa pallasítica"

Este modelo supone, como se ve, que el proceso de enfriamiento de los núcleos asteroidales debió progresar desde afuera hacia adentro. Y explica la presencia de cristales redondeados, porque el redondeo se produciría en tanto éstos son arrastrados por las corrientes convectivas del núcleo líquido.

Otra línea de investigación propone un modelo diferente. Supone también la existencia de un asteroide o protoplaneta completamente diferenciado, con un manto olivínico ya sólido y un núcleo metálico en proceso de enfriamiento, pero en este caso, el enfriamiento procedería desde adentro hacia afuera, y su interior estaría solidificado en un 80%. La capa de metal fundida estaría en contacto con el manto olivínico sin mezclarse con él.

Un gran impacto contra otro cuerpo de mayor tamaño, fracturaría completamente el manto olivínico, desprendiéndolo de la parte ya sólida del núcleo, reduciéndolo a fragmentos y dispersándolo por eyección. Restos del metal del núcleo superficial serían despedidos junto al manto astillado. Posteriormente, fragmentos del manto volverían a ligarse por gravedad, y los remanentes del metal fundido rellenarían los intersticios (ver Figura 12).

Este segundo modelo, como puede apreciarse, entiende que el proceso de enfriamiento de los núcleos asteroidales debió proceder desde adentro hacia afuera, y, por otra parte, es el que mejor explica la presencia de olivinos con bordes angulosos, porque los ángulos serían la intersección entre planos de fracturas generadas por el impacto.

Enigmáticas...y magnéticas

Otro dato se suma recientemente y añade complejidad al ya complejo panorama del origen de las pallasitas: el descubrimiento de que los cristales de olivino contienen pequeñas inclusiones magnéticas a partir de las que resulta posible inferir un proceso de enfriamiento en la presencia de fuertes campos paleomagnéticos.

El magnetismo en cuerpos planetarios o asteroidales diferenciados, como en la Tierra, se explica mediante la teoría de la dínamo. Esta teoría propone que, en un cuerpo en rotación, en cuyo interior hay un núcleo metálico parcial o totalmente líquido, se generan corrientes convectivas circulares y la energía cinética de esas corrientes metálicas líquidas internas, se traduce en un campo magnético orientado en función de los polos de rotación (ver Figura 13).

Hay minerales susceptibles de adquirir una polaridad orientada por ese campo magnético. Estos minerales, cuando se encuentran a altas temperaturas, no adquieren magnetismo. Pero, al enfriarse, cuando pasan por una temperatura crítica, llamada "temperatura de Curie", quedan orientados en función del campo magnético bajo cuya influencia se encuentran. A esa temperatura, variable para cada mineral magnético y siempre inferior a la temperatura de fusión, queda fijada la orientación magnética y no se modifica, a menos que el mineral vuelva a estar nuevamente sometido a temperaturas más elevadas. A este magnetismo adquirido bajo la influencia de un campo magnético, se lo llama "magnetismo termorremanente".

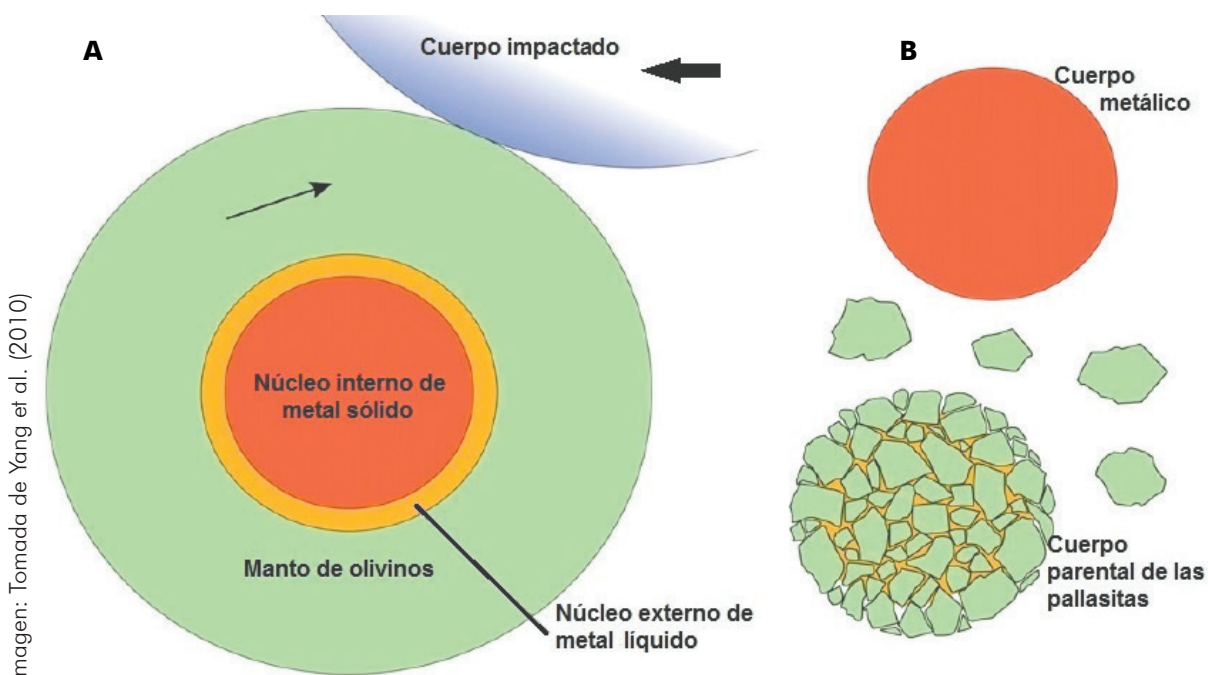


Imagen: Tomada de Yang et al. (2010)

Figura 12. Esquema simplificado de otro modelo que explica la formación de las pallasitas. A. Un asteroide diferenciado o protoplaneta con un manto rico en olivino y un núcleo de metal que se ha solidificado de adentro hacia afuera en un 80% impacta tangencialmente a un cuerpo mayor. B. El manto del cuerpo diferenciado es despedazado a consecuencia del impacto y sus fragmentos se reaccionan por separado del núcleo sólido. Parte del fundido metálico residual rellena los intersticios entre los fragmentos reaccionados del manto.

Figura 13. A. Esquema que grafica las corrientes convectivas en el núcleo externo de la Tierra. B. El campo magnético terrestre representado como un gran imán.

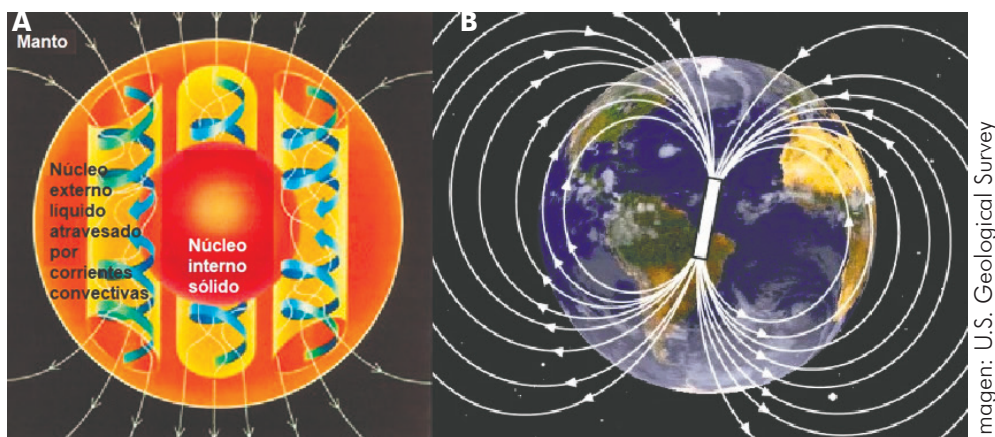


Imagen: U.S. Geological Survey

El descubrimiento de que pequeñas inclusiones en el interior de los cristales de olivinos de las pallasitas tienen magnetismo termorremanente, sería la evidencia de un prolongado efecto dínamo dentro del cuerpo en el que se enfriaron, mostrando que, cuando pasaron por la temperatura de Curie, ese cuerpo tenía aún un núcleo parcialmente fundido y con fuertes movimientos convectivos.

Como la temperatura de fijación del magnetismo termorremanente en los olivinos (temperatura de Curie) es de 360°C y la temperatura estimada como para que un núcleo metálico genere una intensidad magnética como la medida en esos cristales, se estima en 1.000°C como mínimo, esto permite concluir que esos cristales no podrían haberse formado en la interfase manto-núcleo, porque en tan estrecho contacto, las temperaturas no podrían haber sido tan disímiles. Y si esto fuera así, el modelo que propone una "capa pallasítica" en la base del manto, quedaría invalidado. El segundo modelo queda también en dificultades, ya que hace necesario explicar en qué momento los olivinos fijaron el magnetismo termorremanente, y en caso de que lo hubieran hecho en su cuerpo de origen, tendría que poder dar cuenta de cómo no volvieron a alcanzar temperaturas mayores a 360°C a

consecuencia del impacto.

En base a estas consideraciones, otro modelo fue propuesto para explicar el origen de las pallasitas. Éste también imagina un impacto, pero en este caso no se trata de un impacto catastrófico, desintegrador del protoplaneta entero, sino de un impacto que fractura intensamente un manto ya sólido, pero sin despedarlo ni eyectar sus fragmentos al exterior.

El cuerpo impactante sería un núcleo metálico, que se habría formado en el interior de un protoplaneta diferenciado, pero que habría sido ya despojado del manto por colisiones anteriores. El metal fundido aportado por el núcleo impactante se habría introducido en el manto olivínico a través de fracturas generadas por el propio impacto, propagándose rápidamente y enfriándose antes de que olivinos y metal puedan volver a separarse por diferencia de densidades.

Según este tercer modelo, las pallasitas habrían terminado de enfriarse en su cuerpo de origen, adquiriendo el magnetismo termorremanente a causa del núcleo en convección en su interior, pero tendrían una composición heterogénea. En tanto que la fracción olivínica sería proveniente del manto de un protoplaneta, la fracción metálica sería proveniente del núcleo de otro (ver Figura 14).

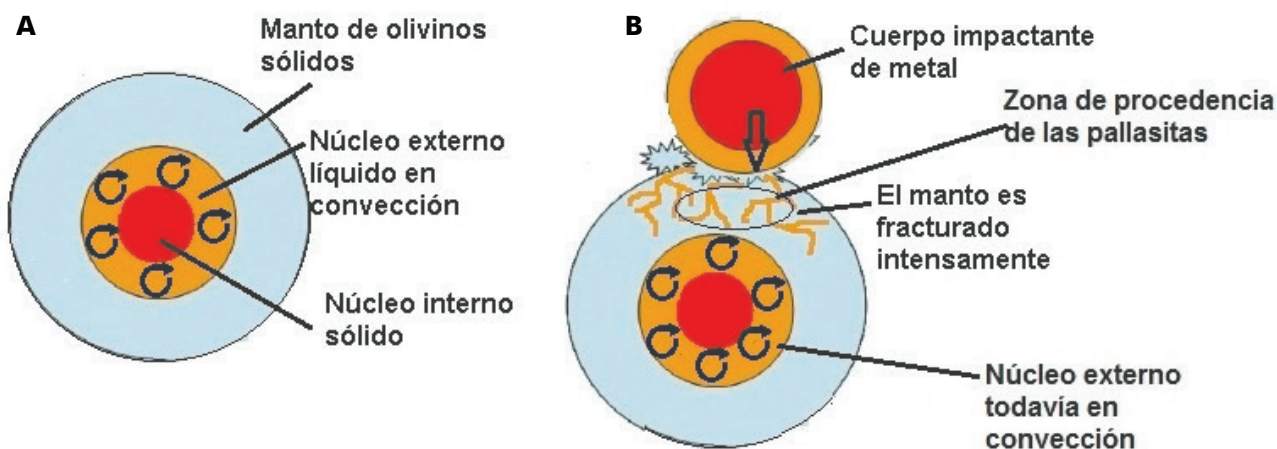


Figura 14. Esquema simplificado de un tercer modelo que explica la formación de las pallasitas. A. Protoplaneta diferenciado: tiene un manto de olivinos sólidos (celestes), un núcleo metálico externo líquido y un núcleo metálico interno sólido. B. El cuerpo es impactado por otro cuerpo esencialmente metálico, ya cristalizado en un 80%, pero con una fracción externa metálica todavía en estado líquido. El manto es intensamente fracturado y el metal líquido del segundo cuerpo se introduce por las fracturas. Las pallasitas serían provenientes del manto fracturado e invadido por intrusiones metálicas provenientes del cuerpo impactante.

Como se puede inferir, el tema de la formación de las pallasitas, después de casi dos siglos y medio de investigaciones, sigue siendo un tema de debate, así como lo sigue siendo el proceso de enfriamiento de los núcleos metálicos de cuerpos planetarios o asteroidales: si procedió desde el centro hacia la periferia o, inversamente, desde la periferia hacia el centro. Los modelos presentados, al mismo tiempo que proponen escenarios posibles, dejan también en evidencia el abanico de interrogantes que se abre a cada paso de la investigación.

A pesar de las discrepancias, al presente hay bastante consenso en pensar que las pallasitas, como Esquel, se formaron en el interior de un cuerpo asteroidal diferenciado, de un radio estimado de entre 100 y 200 km, en el que el núcleo habría comenzado a solidificarse a una temperatura un poco inferior a los 1.000°C, temperatura a la cual los olivinos ya estarían sólidos.

Gemas y joyas que cayeron del cielo

El olivino, por su color, brillo, transparencia y dureza, es considerado una piedra preciosa, y al ser nombrado como gema, se lo designa con el nombre de peridoto, una piedra muy estimada desde la antigüedad y valorada a la par de rubíes o diamantes. Su particular color verde con reflejos dorados hizo que se la llame también crisolita, o "piedra dorada", si bien este término es -a veces- aplicado también, a un mineral distinto: el crisoberilo.

Los olivinos terrestres son raros, porque muy excepcionalmente se encuentran en la superficie de la corteza minerales procedentes del manto. Aun así, esta gema era ya conocida por los antiguos egipcios hace 3.500 años, y estimada como emblema de realeza por los faraones. Hoy sigue siendo una gema altamente apreciada, y, peridotos extraídos del meteorito Esquel, se facetan para producir piedras preciosas de excepcional calidad y valor gemológico (ver Figura 15).

Por qué la dejamos ir

Nadie testimonió haber presenciado la caída del meteorito Esquel, y poco se sabe acerca del lugar exacto de su hallazgo. En un Boletín Meteorítico editado por la Comisión Permanente sobre Meteoritos del Congreso Geológico Internacional que tuvo lugar en febrero de 1964 en Moscú (entonces perteneciente a la Unión Soviética), el meteorito Esquel es mencionado en una lista de meteoritos argentinos. En este Boletín se referencia su hallazgo en algún lugar cercano a la localidad de Esquel (de la cual se brindan las coordenadas S42°54' W71°20') en una fecha "probablemente anterior a 1951", agregando que fue hallado enterrado, sin mencionar a qué profundidad. En el boletín se añade que el meteorito fue llevado más tarde a Buenos Aires y que para esa fecha, estaba

en posesión de "quien lo había hallado", sin agregar más datos. Este informe, que remite a una carta escrita por el geólogo argentino Dr. L. O. Giacomelli, con fecha 30 de septiembre de 1963, lo describe como "metálico-pétreo", definiéndolo como "pallasita", y le atribuye un peso estimado en 1.500 kg.

Se sabe, además, que en 1992 fue vendido a un coleccionista estadounidense, que lo sacó del país y que al presente sigue teniendo la masa principal en su poder, y que ofrece a la venta cortes y fragmentos, tanto para investigación como para joyería. Muchos de los principales museos del mundo los tienen en exhibición. Llama también la atención que, al tiempo de su salida del país, se habla de un peso total de 755 kg.

En esos años, ninguna ley argentina protegía estos invaluable especímenes, cuyo valor científico y estético está fuera de duda. Es así que el patrimonio meteorítico de nuestro país estuvo muy poco resguardado, a excepción de los meteoritos de la provincia de Chaco, que desde 1990 cuenta con la Ley 3.563 de protección de los meteoritos de ese territorio provincial.

Recién desde diciembre de 2007 está en vigencia la Ley Nacional 26.306 que establece que los meteoritos y demás cuerpos celestes que se encuentren o ingresen en el futuro al territorio argentino, su espacio aéreo y aguas jurisdiccionales, son considerados bienes culturales y por lo tanto se encuentran comprendidos dentro de la ley 25.197 que los declara bienes de carácter irremplazable y por ello, constitutivos del patrimonio cultural argentino.

La provincia de Río Negro en ese mismo año sancionó, en concordancia, la Ley 4.338, y declaró a los meteoritos y demás cuerpos celestes que se encuentren o ingresen en el futuro al territorio provincial, su espacio aéreo y aguas jurisdiccionales, como bienes del Patrimonio Cultural y Natural de la Provincia.

El complemento imprescindible de esta oportuna ley, es la conciencia de la comunidad sobre el valor de estos especímenes, y la necesidad de preservarlos como parte de nuestro patrimonio cultural, argentino y patagónico.



Figura 15. Joyas confeccionadas con fragmentos de la pallasita Esquel, ofrecidas a la venta por internet.

Glosario

Fusión nuclear de hidrógeno: proceso por el cual dos o más núcleos atómicos se unen para formar núcleos más pesados. En el caso de nuestro sol, tres núcleos de hidrógeno se fusionan para formar un núcleo de helio con dos protones y un neutrón. Otra posible reacción tiene el efecto neto de fusionar cuatro núcleos de hidrógeno para formar un núcleo de helio con dos protones y dos neutrones. El proceso libera una enorme cantidad de energía radiante, en varias longitudes de onda.

Isótopos estables y radiactivos. Período de semidesintegración: los elementos, en sus núcleos, además de protones (partículas con masa y carga positiva) contienen también otras partículas con masa, pero sin carga, llamadas neutrones (a excepción del hidrógeno, que puede no contener neutrones). Hay elementos que, teniendo el mismo número de protones, tienen diferente cantidad de neutrones, y, por ende, diferente número de masa, o peso atómico. Éstos reciben el nombre de isótopos, porque ocupan el mismo lugar en la tabla periódica. Algunas combinaciones entre distintas cantidades de protones y neutrones son estables, como la de los núcleos de helio que se forman en el interior del Sol, y otras no. En este último caso, los núcleos tienden a dividirse espontáneamente liberando

energía para lograr una mayor estabilidad. Estos isótopos, llamados radiactivos, porque emiten distintos tipos de rayos, experimentarán un proceso de desintegración nuclear hasta transformarse en un isótopo estable del mismo elemento o de un elemento diferente. El tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los núcleos de una cierta cantidad de un isótopo dado es lo que se denomina "período de semidesintegración". Éste abarca un rango extremadamente variable, desde unos pocos microsegundos hasta miles de millones de años.

Nebulosa protosolar: nube de gas y polvo en rotación a partir de la cual se forma el sistema solar. En su centro se genera un núcleo denso que crece concentrando la mayor parte de la masa, en tanto que la envoltura que lo rodea converge en el plano ecuatorial, rotando en su entorno y aplanándose hasta formar el disco circumestelar.

Protoestrella: embrión estelar que crece a partir del núcleo central denso de la nebulosa y evoluciona a través de distintas fases incrementando su masa, temperatura y densidad. Las distintas fases se caracterizan por la emisión de energía radiante en distintas longitudes de onda: luz visible, ultravioletas, infrarrojos, rayos X, etc., así como por la eyección de gases o fulguraciones, denominadas "vientos estelares".

Resumen

La importancia de los meteoritos reside en que brindan una invaluable información sobre los procesos tempranos y la secuencia de eventos que condujeron a la formación del Sistema Solar. Algunos meteoritos ponen en evidencia las etapas que atravesaron algunos planetas y asteroides y que dieron lugar a la diferenciación gravitatoria que conformó su estructura interna en capas: núcleo, manto, y corteza. Las pallasitas, entre las cuales se encuentra el meteorito Esquel, son una clase especial de meteoritos formados por cristales propios del manto inmersos en metal propio del núcleo. Esos cristales son, además, piedras preciosas de gran valor gemológico.

Para ampliar este tema

- Acevedo, R. D. (2019). *Los meteoritos: esos convidados de piedra*. Ushuaia, Argentina: Editora Cultural Tierra del Fuego.
- Boesenberg, J. S., Delaney, J. S., and Hewins, R. H. (2012). A petrological and chemical reexamination of Main Group pallasite formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 89: 134-158.
- Sinkankas, J., Koivula, J. I., and Becker, G. (1992). Peridot as an Interplanetary Gemstone. *Gems & Gemology*: 43-51
- Varela, M. V. (2015). *Meteoritos. Restos rocosos del sistema solar primitivo*. Buenos Aires, Argentina: Vázquez Mazzini.
- Yang, J., Goldstein, J. I., and Scott, E. R. D. (2010). Main-group pallasites: Thermal history, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(15): 4471-4492.