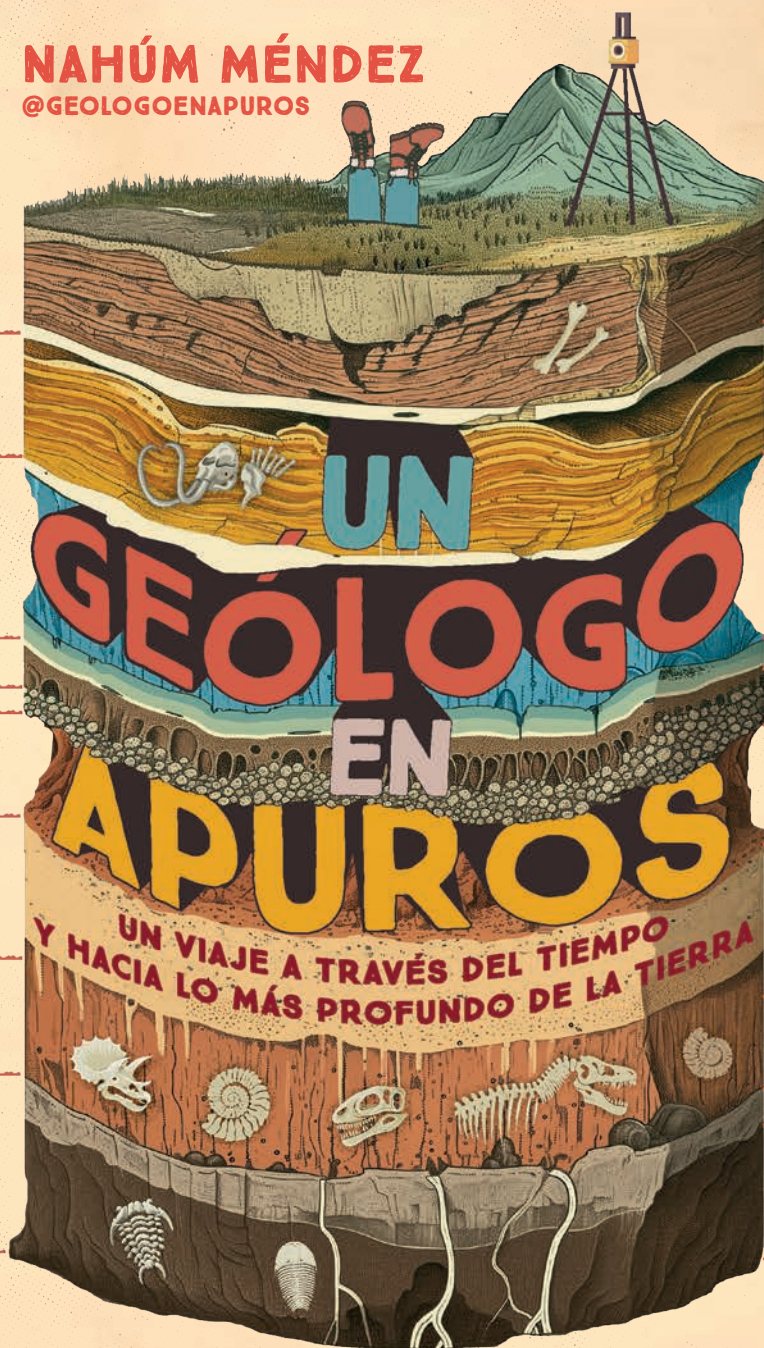


NAHÚM MÉNDEZ

@GEOLOGOENAPUROS



PAIDÓS
para curiosos

**NUOVA
EDIZIONE**

Nahúm Méndez

**UN
GEÓLOGO
EN
APUROS**

**Un viaje a través del tiempo
y hacia lo más profundo de la Tierra**

PAIDÓS

1.ª edición, mayo de 2019

1.ª edición actualizada, mayo de 2024

La lectura abre horizontes, iguala oportunidades y construye una sociedad mejor. La propiedad intelectual es clave en la creación de contenidos culturales porque sostiene el ecosistema de quienes escriben y de nuestras librerías. Al comprar este libro estarás contribuyendo a mantener dicho ecosistema vivo y en crecimiento. En **Grupo Planeta** agradecemos que nos ayudes a apoyar así la autonomía creativa de autoras y autores para que puedan seguir desempeñando su labor. Dirígete a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesitas fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puedes contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

© Nahúm Méndez Chazarra, 2019, 2024

© de las ilustraciones, Javier Pérez de Amézaga Tomás, 2019

© de todas las ediciones en castellano,

Editorial Planeta, S. A., 2024

Paidós es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

Avda. Diagonal, 662-664

08034 Barcelona, España

www.paidos.com

www.planetadelibros.com

Diseño de la cubierta: Planeta Arte & Diseño

© de las imágenes de la cubierta: OlgaChernyak, Sowicz, Akinorev,

BlueRingMedia y Julia Waller / Shutterstock

ISBN 978-84-493-4245-5

Fotocomposición: Laura Rodríguez

Depósito legal: B. 5.018-2024

Impreso en España — *Printed in Spain*



SUMARIO

Prólogo.....	7
Introducción.....	15
1. La formación del sistema solar	19
2. La formación de la Tierra y la Luna: los primeros pasos.....	45
3. El Precámbrico	73
4. El Paleozoico	103
5. El Mesozoico	125
6. El Cenozoico: la era de los mamíferos	153
7. El Cuaternario: las otras edades de hielo	175
8. El futuro de la Tierra	201
Epílogo	227
Bibliografía	229

CAPÍTULO 1

LA FORMACIÓN DEL SISTEMA SOLAR



Empezar a contar la historia de la Tierra sin explicar de dónde venimos siempre me ha parecido una idea bastante arriesgada. De hecho, es muy difícil comprender la historia de nuestro planeta y su funcionamiento sin hablar de su origen.

En algún momento tendremos que remontarnos al principio de todo para poder explicar y entender algunas cuestiones fundamentales: las estrellas, nuestro planeta e incluso nosotros mismos estamos formados por los mismos elementos químicos, y la abundancia de unos elementos frente a otros definirá qué tipo de planeta somos.

Parece una cuestión sin importancia porque, al fin y al cabo, todo lo que vemos en el universo está compuesto de la misma materia. Sin embargo, a lo largo de este capítulo veremos que los distintos elementos que forman nuestro planeta están en la justa medida para que hayamos llegado hasta aquí. Algo así como una receta de cocina, en la que variar la proporción de ingredientes modificará el sabor del plato.

INGREDIENTES PARA UNA COCINA CÓSMICA

Es muy probable que si la composición química de nuestro planeta fuera diferente, este también sería muy diferente. Solo hay que fijarse en la geología de planetas tan cercanos

como Venus o Marte, que no se parece tanto a la nuestra. La geología es lo que ha condicionado algo tan importante para nosotros como el origen de la vida.

Los elementos no son más que átomos de diferentes tipos, entendiendo como átomo la parte más pequeña en la que podemos dividir la materia sin que pierda su identidad como elemento. Si pudiésemos cortar, por ejemplo, un átomo de hierro en dos partes iguales, acabaríamos teniendo partes del átomo para formar dos átomos de aluminio. Bueno, por si acaso, un consejo: nunca intentéis dividir un átomo en casa, ya que cuando estos se dividen generan una gran cantidad de energía. Es el mecanismo que alimenta las bombas atómicas.

Algunos de los elementos son más abundantes que otros. Unos pocos se desintegran en periodos regulares, lo cual da como resultado la formación de otros elementos, un fenómeno que aprovechamos como una suerte de reloj para poder determinar las edades de las rocas y los fósiles. E incluso hay versiones de un mismo elemento cuyas proporciones nos ayudan a calcular valores tan importantes como la variación de temperatura en nuestro planeta e incluso el origen del agua.

Los elementos no cambian ni se transforman durante las reacciones químicas. Para crear nuevos elementos o transformar los actuales necesitaríamos reacciones nucleares (como las que ocurren en la explosión de las armas atómicas), que son extremadamente energéticas.

En el universo hemos podido observar 94 elementos diferentes, aunque lo cierto es que conocemos 118. Los 24 elementos restantes los hemos sintetizado en el laboratorio, ya que no hemos encontrado dónde aparecen de manera natural (si es que lo hacen), muchas veces debido a su corta vida antes de desintegrarse y formar otros elementos.

Los átomos están formados por tres tipos de partículas: el

protón y el neutrón, que forman el núcleo del átomo, y los electrones, que se mueven alrededor del núcleo. Pero lo que realmente define la identidad del elemento es el número de protones del núcleo, o número atómico. De hecho, todos los átomos de un mismo elemento tendrán siempre el mismo número atómico; es como el número del carnet de identidad de un elemento. Sin embargo, en un mismo elemento puede variar el número de electrones y neutrones del átomo, sin que por ello deje de ser ese elemento. Si un átomo tiene más o menos electrones que protones, diremos que estamos ante un ion positivo o negativo, respectivamente. Si tienen el mismo número de electrones que de protones decimos que estamos ante un átomo neutro, y en la naturaleza podemos encontrar estos tres casos.

Pero a nosotros nos resultarán mucho más útiles los isótopos, un tipo de átomos que se diferencian en que, en un mismo elemento, el número de neutrones del núcleo puede variar con respecto al de protones. En la naturaleza hay elementos con un solo isótopo o con varios isótopos, e incluso elementos cuyos isótopos se han creado artificialmente en el laboratorio. Digamos que esta diferencia los hace más pesados o más ligeros, dependiendo de si tienen neutrones de más o de menos.

Dentro de los isótopos distinguimos dos categorías: estables y radiactivos (inestables). Los isótopos estables son aquellos que no se desintegran ni se transforman en otros elementos. Son muy útiles porque al estudiar sus proporciones, podemos averiguar importantes factores ambientales como la temperatura media de la Tierra o el origen de las rocas y del agua en nuestro planeta. Por su parte, los isótopos radiactivos sí se transforman en otros elementos a cambio de emitir radiación, al ser inestables, aunque no todos lo son por igual. De hecho, gracias a que conocemos el periodo de semi-

desintegración de los isótopos inestables (el tiempo que tarda una cantidad de ese isótopo en concreto en reducirse a la mitad de la cantidad inicial), podemos usarlos para datar de una manera muy precisa determinados eventos, como la edad de algunos tipos de roca. Hablaremos de ello con mayor detalle al final del capítulo.

EL ORIGEN DE TODO

¿Y cómo se formaron los elementos? Para responder a esta pregunta nos tenemos que remontar precisamente al origen del universo. Aproximadamente tres minutos después de que ocurriese el big bang con el que nació nuestro universo, hace unos trece mil ochocientos millones de años, comenzaron a formarse los primeros elementos en un fenómeno conocido como nucleosíntesis, que consiste en la creación de átomos a partir de protones y neutrones.

Seguro que muchas veces habréis oído la expresión: «Los polos opuestos se atraen». Probablemente lo habréis experimentado más de una vez, por ejemplo acercando dos imanes por el lado contrario; pues bien, ocurre de una manera muy parecida en la formación de los elementos. (En cambio, si intentáis juntar dos imanes por el mismo lado, o el mismo polo, veréis que se repelen, y nos cuesta mucho acercarlos.)

Paradójicamente, el núcleo de los elementos está formado por protones y neutrones. Para conseguir que los protones, las partículas de carga positiva que forman el núcleo de los átomos, se acerquen lo suficiente como para quedarse juntos, se necesitan gigantescas cantidades de energía, y por eso solo se forman los elementos en lugares y momentos muy concretos del universo. Y mejor que sea así, porque al formarse, puede

liberarse una gran cantidad de energía, como ocurre por ejemplo en el caso de nuestro Sol, cuya energía se genera principalmente por la fusión de núcleos de hidrógeno.

En esa primera nucleosíntesis solo se formaron isótopos de hidrógeno (el más ligero de los elementos, cuya abundancia es del 74 %), helio (24 %) y, en mucha menor proporción, litio y berilio. Hasta ese momento, el universo era un lugar muy diferente al que conocemos hoy día: no había estrellas, ni galaxias, ni luz; solo gas y oscuridad. Los demás elementos comenzaron a formarse mucho tiempo después, forjados ya en el interior de las estrellas.

Las últimas investigaciones sugieren que las primeras estrellas no comenzaron a formarse hasta ciento ochenta millones de años después del big bang. Hasta ese momento, el universo era un lugar oscuro donde pequeñas variaciones en la densidad (es decir, en zonas donde había más materia que en otras) podían generar estructuras cada vez más grandes, como las estrellas, ya que cuanto más crecían estas estructuras, más capacidad tenían de atraer materia por efecto de la gravedad.

Algunas de esas primeras estrellas, como las actuales, formaron planetas a su alrededor. Sin embargo, en esos momentos, los sistemas planetarios estarían totalmente dominados por gigantes gaseosos (como Júpiter y Saturno), ya que solo tenían disponible el hidrógeno y el helio, y todavía no existían los elementos necesarios en el universo para que se formasen planetas como la Tierra.

El planeta más antiguo conocido hasta el momento se encuentra a unos doce mil cuatrocientos años luz, en el cúmulo globular M4, y tiene una masa aproximada de dos veces y media la de Júpiter. Tiene una edad estimada de doce mil seiscientos millones de años, apenas unos mil millones de años menos que el universo.

Como decíamos antes, son las estrellas las que precisamente forman el resto de los elementos que conocemos como resultado de su ciclo vital a lo largo del tiempo. En su interior, las presiones y las temperaturas extremas permiten que ocurran reacciones de fusión nuclear, que, a su vez, dan lugar a la creación de elementos cada vez más pesados.

En las últimas etapas de la vida estelar, las estrellas con una masa similar a la de nuestro Sol entran en la denominada «fase de la gigante roja», en la que las partes más externas de la estrella comienzan a crecer hacia fuera, separándose de la propia estrella y sembrando el medio interestelar de una parte de los elementos que ha formado en su interior; con ello deja tras de sí una bonita nebulosa. Incluso hoy sabemos que algunos planetas que existen alrededor de estas estrellas han crecido a base de recoger parte de la materia expulsada por estas estrellas. Es probable que los planetas más cercanos acaben cayendo hacia la estrella cuando esta comience a expandirse, aunque hablaremos de ello cuando tratemos el final de la Tierra.

También puede ocurrir que la estrella sea mucho más grande y masiva que nuestro Sol y que una de sus últimas etapas evolutivas sea la de supernova. Estas estrellas acaban su vida de una manera espectacular, provocando una gigantesca «explosión» que expulsa a gran velocidad las capas externas de la estrella; además, siembran el espacio de los elementos formados en su interior.

Durante la fase de la gigante roja también se forman nuevos elementos, especialmente los más pesados, ya que para su formación se necesita una gran cantidad de energía que solo es capaz de provocar explosiones como estas. Hasta que estas primeras estrellas no comenzaron a llenar el universo de elementos más pesados, como el oxígeno, el silicio, el hierro o

el aluminio, los planetas como el nuestro no tenían manera alguna de reunir los elementos que los conforman.

Los primeros planetas de tipo terrestre de los que tenemos constancia en nuestra galaxia aparecieron hace unos once mil doscientos millones de años, algo más del doble de la edad de la Tierra, y mil millones de años más tarde que el planeta gaseoso más antiguo que se conoce. Este planeta se encuentra a tan solo ciento diecisiete años luz de la Tierra y orbita alrededor de la estrella que conocemos como Kepler 444.

Pero dejemos ya las lejanías del espacio para centrarnos un poco en nosotros. El Sol, los planetas y los demás cuerpos que orbitan alrededor del Sol se encuentran en una galaxia que conocemos como la Vía Láctea. Su nombre procede del color blanquecino que vemos por la noche desde lugares oscuros y que está producido por el gran número de estrellas que se encuentran en el plano de la galaxia sobre el que se mueven la mayoría de cuerpos estelares.

Las galaxias no son más que agrupaciones de estrellas, gas y polvo interestelar que se encuentran unidas por efecto de la gravedad. La nuestra tiene cientos de miles de millones de estrellas, y si la recorriéramos de lado a lado a la velocidad de la luz, que es la más alta que conocemos (aproximadamente trescientos mil kilómetros por segundo), tardaríamos en cruzarla alrededor de ciento cincuenta mil años. A la velocidad más alta a la que hemos lanzado una misión al espacio tardaríamos en recorrer la galaxia unos tres mil millones de años.

Pero a lo que vamos. Las galaxias no siempre son iguales. Hay estrellas que nacen, mueren, son expulsadas... e incluso caen en agujeros negros. Las estrellas como nuestro Sol nacen en lo que llamamos «nubes moleculares», unas zonas del espacio en las que podemos encontrar acumulaciones de diferentes gases y polvo en mayor cantidad que en el resto

de espacio de la galaxia. Estas nubes son lugares tremendamente fríos, ya que el polvo suele servir como aislante y no permite que entre en ellas la radiación ni la luz. Suelen tener unas dimensiones monstruosas y materia suficiente como para formar decenas de miles, e incluso millones de estrellas de la masa de nuestro Sol. En nuestra galaxia, aproximadamente cada año se forma una estrella con una masa parecida a la de nuestro Sol.

Dentro de estas nubes hay zonas de mayor densidad (es decir, zonas más «espesas»), y ahí es donde comenzará la formación de las estrellas, como si se plantara allí una especie de semilla a partir de la cual crecerá la estrella. Algunos autores sugieren que hay eventos cósmicos, como la explosión de una supernova cercana, que pueden provocar variaciones en la densidad de estas nubes, como si fuesen capaces de agitar y mover las partículas de gas y polvo, y fomentaran así la formación de nuevas estrellas.

Poco a poco, estas semillas de la formación estelar van atrapando partículas y aumentando su masa, y por efecto de la gravedad, van comprimiendo el gas. Lentamente comienzan a girar sobre sí mismas, como si de un gigantesco remolino se tratase. Llega un momento en el que en el centro de estas semillas se alcanzan temperaturas de alrededor de un millón de grados a causa de la presión, lo cual desencadena reacciones nucleares que serán la chispa que provoque el nacimiento de la estrella.

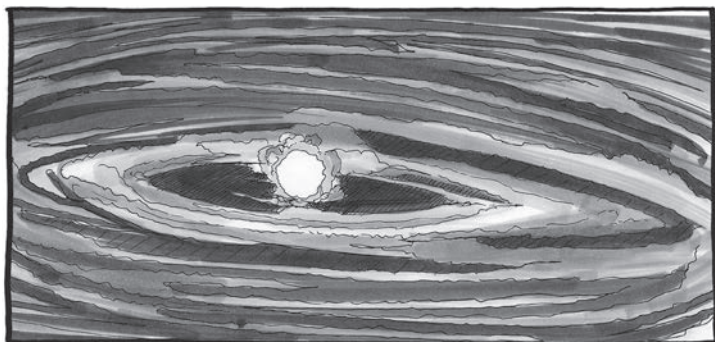
Con el tiempo, la estrella sigue ganando masa por efecto de la gravedad, atrayendo partículas de zonas más lejanas. Estas partículas pueden quedarse girando en torno a la joven estrella, formando un disco de gas y polvo que posteriormente puede dar lugar a un sistema planetario como el nuestro.

Aunque tengamos la concepción de que las estrellas se for-

man solas o aisladas, lo cierto es que en las nubes moleculares pueden formarse muchas estrellas juntas. De hecho, es un fenómeno habitual en nuestro vecindario galáctico, como hemos podido observar en nebulosas como la de Orión, o la del Águila, entre muchas otras, donde encontramos verdaderas guarderías estelares. Lo que ocurre es que, con el tiempo, las estrellas se van alejando entre sí. De hecho, en la actualidad, desconocemos cuáles son las estrellas que pudieron formarse junto a nuestro Sol, ya que resulta muy difícil trazar con precisión los movimientos estelares hacia atrás en el tiempo a causa de las perturbaciones que puede sufrir su trayectoria por la acción de otras estrellas u objetos; esto convierte a quienes desempeñan esta labor en verdaderos detectives cósmicos.

El disco de gas y polvo que se quedó girando alrededor de nuestro Sol fue el precursor de la formación de los planetas del sistema solar; es la llamada «nebulosa protoplanetaria». Probablemente era muy simétrica, con una forma de disco muy marcada, al igual que otros sistemas planetarios que hemos podido observar recientemente. La parte más delgada de la nebulosa estaba cerca del Sol, mientras que se iría haciendo más gruesa conforme se iba distanciando. El disco siguió creciendo durante un tiempo gracias a que la nube de gas molecular iba añadiéndole más material.

En las zonas más cercanas al Sol, los únicos granos de material que podían condensarse en estado sólido eran aquellos cuyos elementos tenían un punto de fusión muy alto, ya que las temperaturas eran muy altas, como es normal cerca del Sol. Estos materiales eran los elementos metálicos y los materiales rocosos, que solo llegaban a formar un 1% de los materiales de la nebulosa. La mayoría de estos granos medía una micra, es decir, un tamaño similar a la anchura de nuestros glóbulos rojos.

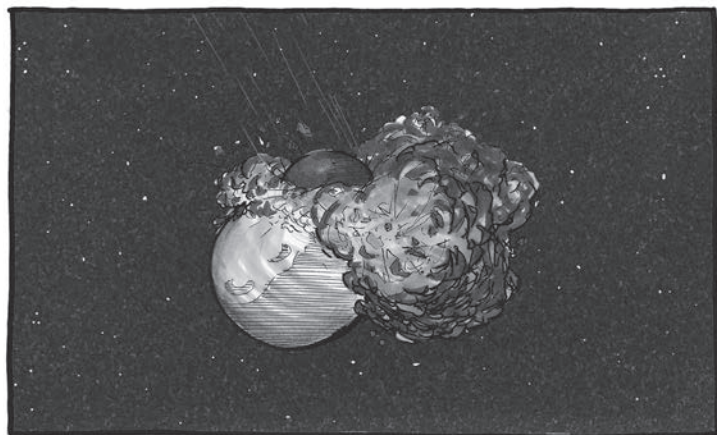


Más lejos, los elementos más volátiles como el dióxido de carbono, el agua o el amoníaco comenzaban a condensarse y a convertirse en granos de hielo más allá de lo que conocemos como la «línea de hielo» del sistema solar, que no es más que la distancia desde el Sol a partir de la que esos compuestos se condensan y forman hielo; en cambio, si se encuentran por debajo de esa distancia, esos compuestos están en estado gaseoso. Esta línea de hielo no ha sido constante, y se encontraba mucho más cerca del Sol al comienzo que ahora, ya que, desde sus orígenes, el brillo del Sol ha aumentado en aproximadamente un 25%.

Este hecho tiene una importancia fundamental en la formación de los planetas gigantes gaseosos. El motivo es que la congelación de estos volátiles hacía que hubiera muchos más granos disponibles, para que los planetas pudiesen crecer, en el exterior de la «línea de hielo» que en su interior, donde se estaban formando los planetas rocosos. Poco a poco, los granos de distintos materiales fueron colisionando y adhiriéndose entre sí, creando cuerpos cada vez más grandes que iban atrayendo hacia sí más materia y provocando nuevas colisiones entre sí.

Quedan todavía muchos interrogantes acerca de cómo se pasó de estas pequeñas partículas a la formación de cuerpos cada vez más grandes. No tenemos muy claro si hubo varias etapas en que los cuerpos se fueron acumulando en zonas muy concretas de la nebulosa, o si, al igual que en el caso de las estrellas, pequeñas irregularidades en la densidad de la nebulosa dieron lugar a cuerpos de cierto tamaño que serían los embriones de los planetas y que chocaron más tarde entre sí para formar cuerpos de mayor tamaño. Mientras, la presencia de gas y polvo en las zonas más interiores del sistema solar hacía que estos cuerpos cada vez más grandes fueran perdiendo velocidad por el rozamiento (como cuando nosotros corremos con los brazos extendidos o contra el viento) y cayeran hacia el Sol, hasta alcanzar sus posiciones actuales.

En las zonas más exteriores, los gigantes gaseosos iban acumulando materia con mucha facilidad por la presencia de un mayor número de partículas. Además, debido a su tamaño, también eran capaces de capturar incluso los gases más ligeros, como el hidrógeno y el helio, y retenerlos (nuestro planeta



ha perdido una gran parte del helio a lo largo de su historia). Gracias a esta gran cantidad de material disponible, los gigantes gaseosos tienen aproximadamente el 99% de la masa de todos los cuerpos del sistema solar (excluyendo el Sol).

Los modelos indican que es muy probable que el sistema solar tardase unos cien millones de años en formarse. En cambio, las nebulosas protoplanetarias tienen una vida muy breve, de tan solo varios millones de años, y rara vez llegan a superar los diez. Eso no quiere decir en absoluto que los planetas se formen en tan poco tiempo, sino que la mayor parte del polvo queda convertido en cuerpos de mayor tamaño en unos millones de años, si bien el proceso de formación planetaria es mucho más largo.

El proceso dominante durante la mayor parte de la formación del sistema solar fue la colisión entre los distintos cuerpos ya formados. Poco a poco, el número de colisiones fue descendiendo conforme quedaban menos cuerpos dispersos en órbitas cercanas a los actuales planetas, aunque hubo un momento especialmente crítico en esta fase del que hablaremos ahora.

Durante este periodo de formación planetario no solo se crearon los planetas, sino que a su alrededor también pudieron existir discos de gas y polvo secundarios a partir de los que se formaron la mayor parte de sus satélites naturales. Esto fue especialmente notable en el caso de los gigantes gaseosos, cuya mayor gravedad les sirvió para hacerse también con más materia que más tarde se convertiría en el elevado número de satélites con que cuentan, algunos de un tamaño bastante grande.

Pero no todos los satélites se formaron así. Es probable que algunos se formaran posteriormente a partir de colisiones entre los propios satélites. Incluso sospechamos que algunos

pueden ser cuerpos formados en otras partes del sistema solar que, al pasar por las inmediaciones de estos gigantes, quedaban atrapados por su gravedad y ligados para siempre a estos.

LAS SOBRAS DE LA FORMACIÓN PLANETARIA

Aunque nos creamos a salvo de las colisiones (que se lo digan a los dinosaurios), todavía quedan muchos cuerpos que no llegaron a formar ningún planeta tras la formación del sistema solar, especialmente en lo que conocemos como el cinturón de asteroides, el cinturón de Kuiper y la nube de Oort. El más cercano a nosotros es el cinturón de asteroides, una zona entre las órbitas de Marte y Júpiter en la que existen millones de asteroides; estos últimos son cuerpos de formas irregulares, en algunos casos de un tamaño considerable, y son principalmente rocosos, aunque los hay metálicos y con gran contenido en carbono, y volátiles como el agua o el amoníaco.

El cuerpo más grande del cinturón de asteroides es Ceres, con un diámetro de casi mil kilómetros. Actualmente se encuentra en la categoría de planeta enano, aunque tras su descubrimiento fue catalogado como un planeta y, posteriormente, como un asteroide. Por decirlo de alguna manera, el cinturón de asteroides es la frontera que divide los gigantes gaseosos de los cuatro planetas rocosos del sistema solar interior (Mercurio, Venus, Tierra y Marte).

¿Y cómo se formó este cinturón? Hay varias teorías. La primera y más aceptada afirma que la influencia de Júpiter evitó que estos cuerpos que se encontraban en ese cinturón acabasen colisionando a velocidades lo suficientemente lentas como para crecer y formar un cuerpo de mayor tamaño.

Pero nuestro cinturón de asteroides no es el único que existe, y este tipo de cinturones podrían ser relativamente comunes en otros sistemas planetarios. Uno de los cinturones de asteroides más cercanos que conocemos es el que existe en el sistema de la estrella Vega, a unos veinticinco años luz de nuestro planeta.

Una teoría más reciente dice que si observamos la composición del cinturón de asteroides de dentro afuera, veremos que los asteroides que están más cerca del Sol son principalmente rocosos, mientras que los más alejados son de tipo carbonáceo, más ricos en compuestos volátiles. Esto parece indicar que, en realidad, el cinturón de asteroides está formado por cuerpos que fueron expulsados de sus órbitas por la influencia gravitatoria de los planetas. Los más rocosos provendrían del sistema solar interior y, por lo tanto, estarían más cerca del Sol, mientras que los carbonáceos provendrían de la zona de formación de los gigantes gaseosos, donde se condensaban los elementos más volátiles; esto explicaría esta gradación en su composición.

Hoy día, los cuerpos del cinturón de asteroides siguen colisionando entre sí, y en ocasiones dejan grandes estelas de polvo. Fruto de estas colisiones, a veces algunos fragmentos ven su órbita alterada y llegan a nuestro planeta en forma de meteoritos, lo cual nos permite estudiarlos. Cada año hay numerosas misiones científicas que viajan al desierto del Sahara y a la Antártida para recuperar meteoritos, ya que en estos lugares es mucho más fácil encontrarlos porque su color oscuro destaca sobre el tono claro de la arena del desierto, o del hielo y la nieve.

A veces tenemos suerte y podemos ver la entrada de un meteoro a través de la atmósfera y tratar de deducir dónde ha caído, gracias a las redes de cámaras que hay instaladas por

todo el mundo. Además, esto nos ayuda a saber de qué órbita procede, con lo que podemos intentar determinar la familia de la que formaba parte el meteorito con mayor precisión.

Los cuerpos del cinturón de asteroides no son peligrosos para la vida en la Tierra (de momento). Salvo grandes perturbaciones, tienen órbitas que suelen permanecer estables a lo largo de millones de años. En cambio, hay otras poblaciones de asteroides, como los asteroides cercanos a la Tierra (NEA, por sus siglas en inglés), que sí pueden acercarse a nuestro planeta y ser una fuente de peligro en el futuro. Por ello es muy importante conocer sus trayectorias y detectar si su paso por las inmediaciones de nuestro planeta puede incluso provocar un mayor riesgo, ya que la gravedad de nuestro planeta puede alterar las órbitas de estos cuando pasan muy cerca de nosotros.

Estos asteroides no solo son importantes para ayudarnos a definir cuestiones relativas al nacimiento del sistema solar, sino que, probablemente, tendrán una importancia económica en el futuro, quizá en las próximas décadas, ya que podremos extraer de ellos una gran cantidad de recursos para usarse, tanto en nuestro planeta como en futuras misiones espaciales tripuladas. Se trata de elementos como el oro, la plata o el cobre, de gran valor actualmente, que podrían procesarse en el espacio o en nuestro planeta. También podría extraerse agua de los asteroides carbonáceos, lo que nos ayudaría a reabastecer con este recurso tan importantes misiones que viajen lejos de nuestro planeta, e incluso generar combustible a partir del agua, separando el hidrógeno y el oxígeno.

En la actualidad hay numerosas empresas privadas que estudian la manera de catalogar y conocer los recursos económicos de los asteroides cercanos a la Tierra, que son los más accesibles, para así minimizar el consumo de combustible de las futuras naves. Aun así quedan todavía muchas cuestiones

por resolver, como si habría que tratar estos materiales en el espacio o si tendrían que traerse a la Tierra para su refinamiento. Y, por supuesto, es importante crear una legislación a nivel global que impida la extracción sin control de los recursos del espacio. De todos estos asuntos hablaremos con más detalle en el último capítulo.

Si viajamos un poco más lejos, nos encontraremos con el cinturón de Kuiper, una región del espacio que va desde más allá de la órbita de Neptuno, el planeta más alejado del sistema solar, hasta unas cincuenta veces la distancia de la Tierra al Sol. Este cinturón de cuerpos es muy parecido al cinturón de asteroides, pero tiene una peculiaridad que lo hace a su vez enormemente diferente: mientras que la mayoría de los cuerpos en el cinturón de asteroides son rocosos, la mayoría de los presentes en el cinturón de Kuiper están compuestos de hielo. En este cinturón se encuentra precisamente Plutón, que fue considerado planeta hasta 2006 y que ahora está en la categoría de planeta enano, como Ceres.

Algunos modelos de formación planetaria indican que el cinturón de Kuiper tendría una masa bastante grande, alrededor de unas treinta veces la masa de nuestro planeta. Sin embargo, se calcula que en la actualidad podría ser cuatro veces inferior. Según estudios recientes, esto se debería a que durante los primeros millones de años de existencia del sistema solar, una estrella pudo pasar cerca de nuestro sistema solar, llevándose una gran parte de los cuerpos del cinturón de Kuiper y provocando que las órbitas de algunos cuerpos se volvieran muy excéntricas, e incluso inclinadas con respecto al plano en el que se mueven los planetas. Esta estrella habría pasado aproximadamente a sesenta veces la distancia de la Tierra al Sol. Otros estudios sugieren que el movimiento de los planetas hacia dentro y hacia fuera de sus órbitas, conocido como

«migración planetaria», alteró las órbitas de los cuerpos de tal manera que expulsó a unos del sistema solar e hizo que otros chocaran contra los planetas, lo cual explica esta falta de masa que observamos en la actualidad.

Aún más lejos nos encontramos con la nube de Oort, una zona esférica alrededor de nuestro sistema solar en la que podrían existir miles de millones de cuerpos formados principalmente por hielo. Esta nube abarca una gran distancia. Algunos autores incluso sugieren que tiene varios años-luz de diámetro y que podríamos compartirla con las estrellas más cercanas.

Muchos de los objetos de la nube de Oort se formaron cerca del Sol, pero de nuevo fueron expulsados a zonas mucho más lejanas por la influencia de Júpiter y los demás gigantes gaseosos. Otros provienen probablemente del intercambio de materia entre el Sol y sus estrellas cercanas, como aquellas junto a las que pudo formarse. Estos cuerpos podrían servirnos como muestras de la composición de otros sistemas planetarios, aunque de momento inalcanzables con nuestra tecnología.

Dado que estos cuerpos tienen una unión tan débil con nuestro sistema solar a causa de la distancia entre sí, su órbita puede verse modificada a veces si existen pequeñas perturbaciones, con lo cual caen hacia el sistema solar interior. Son lo que conocemos como «cometas». Conforme van acercándose al Sol, sus hielos comienzan a sublimarse (es decir, pasan del estado sólido al gaseoso directamente), y se genera esa cola tan característica, que podemos ver incluso a simple vista en el caso de los cometas más brillantes.

Hemos hablado mucho de la influencia de los gigantes gaseosos en las órbitas de los cuerpos del sistema solar más exterior, y es que francamente la tuvieron, pero también tuvieron su peso en el sistema solar interior. Hoy, los modelos más

recientes de la formación de nuestro sistema afirman que, al principio, los cuatro gigantes gaseosos se encontraban mucho más cerca entre sí. Esto generó fuertes interacciones entre ellos que les llevaron a migrar y a alejarse los unos de los otros hasta alcanzar órbitas más estables. A su vez, esto provocó grandes catástrofes en el sistema solar interior. Alrededor de seiscientos millones de años tras la formación del sistema solar interior, tuvo lugar lo que conocemos como «bombardeo intenso tardío», una época en la que se multiplicaron las colisiones en nuestro sistema solar.

La nueva configuración de los planetas provocó alteraciones, tanto en las órbitas del cinturón de asteroides como en las del cinturón de Kuiper, con lo cual las órbitas estables y circulares de los cuerpos se volvieron excéntricas y se cruzaron con la órbita de los planetas hasta provocar numerosas colisiones. En la Luna todavía se pueden observar los efectos de este momento tan crítico, mientras que ya no es visible en nuestro planeta, debido al enorme cambio que hemos sufrido en estos millones de años.

¿Y cómo ponemos fecha a eventos como el bombardeo intenso tardío? Bien, podríamos decir que los cuerpos del cinturón de asteroides de los que hemos hablado antes podrían ser relativamente primitivos; serían, en cierto sentido, como los «fósiles» de la formación de nuestro sistema solar, haciendo un símil con la paleontología. Pero la realidad es mucho más compleja, y es que cuando estudiamos hoy los asteroides y los meteoritos que nos llegan, estos han sufrido también grandes modificaciones a lo largo de su vida, a veces en varias etapas. Algunos se han sometido a elevadas temperaturas por las colisiones con otros cuerpos. Otros han sufrido alteraciones a causa del agua, de modo que se han producido cambios en sus minerales. Otros incluso podrían haberse fundido por com-

DATO CURIOSO

¿Qué son los minerales?

Los minerales son sustancias químicas que cumplen una serie de requisitos: el primero es que sean sólidos a las temperaturas normales en la superficie de la Tierra. El segundo es que sean sustancias que aparezcan de manera natural y no sean productos artificiales creados por el ser humano. El tercero lugar, estas sustancias tienen que ser inorgánicas, es decir, que tampoco sean «fabricadas» por ningún ser vivo. El cuarto, deben tener una composición química concreta que puede variar muy poco, algo así como las cantidades de una receta de cocina. Y, por último, tienen que tener una estructura interna ordenada, es decir, que los átomos que forman estas sustancias estén ordenados de una manera que se repita en todo el mineral.

En la actualidad se conocen casi cuatro mil minerales. Algunos son comunes en nuestro día a día, como el yeso, usado en la construcción, la halita, que es la sal común, o el cuarzo, que forma muchos de los granos de arena de la mayoría de las playas que conocemos.

pleto. Eso hace que, en cierta manera, los asteroides no sean primitivos del todo. Sin embargo, pueden ayudarnos a desentrañar la historia, ya que contienen un registro de los distintos procesos que han sufrido. Eso sí, ordenar temporalmente todos esos procesos no es precisamente una labor fácil en muchos casos, pero es posible, ya que a veces las alteraciones no han afectado a todo el asteroide.

Tampoco parece de gran ayuda estudiar el polvo que hay en nuestro sistema solar porque sabemos que no procede precisamente del polvo original que formaba la nebulosa protoplanetaria, sino que se formó a partir de las colisiones entre los

asteroides. Por ello, la información que podemos obtener de esta fuente tampoco resulta muy útil.

En cambio, los cuerpos más fríos, como los cometas y los objetos del cinturón de Kuiper, podrían no haberse sometido a procesos que los hayan calentado lo suficiente como para cambiar su composición sustancialmente. Por lo tanto, sí serían una buena muestra de la composición de las partes más externas de la nebulosa protoplanetaria.

LOS METEORITOS NOS AYUDAN A COMPLETAR NUESTRA HISTORIA

Prácticamente, la única manera que tenemos de estudiar el sistema solar es a través de los meteoritos, ya que nos permiten tomar muestras de los distintos cuerpos de nuestro sistema solar sin necesidad de tener que ir a recogerlas nosotros mismos. Esto sería muy costoso desde el punto de vista económico y tecnológico.

Además de contar con nuestro planeta, disponemos de rocas de la Luna, que hemos podido traer en las distintas misiones que hemos llevado a su superficie, y de rocas de algunos meteoritos que han llegado hasta nosotros. También hemos conseguido encontrar meteoritos procedentes de Marte, aunque, a pesar de las múltiples misiones que han viajado al planeta rojo, todavía no hayamos podido organizar una misión de retorno de muestras por su dificultad tecnológica y su coste. Tal vez en la próxima década podremos ver por primera vez una misión de este tipo realizada en Marte. Al menos nos quedan sus meteoritos.

Los meteoritos que más nos interesan para recabar pistas sobre la edad del sistema solar y su composición son los denominados «condritos», los más primitivos de todos; cuando

hablo de «primitivos», me refiero a que se crearon en las primeras etapas de la formación del sistema solar. Los abundantes elementos que encontramos en los condritos serían muy similares a los que habría en la nebulosa que formó nuestro Sol.

Los condritos provienen de la colisión de partículas de polvo en la nebulosa protoplanetaria, que dio lugar a la formación de asteroides de pequeño tamaño en los que nunca se produjeron fenómenos de fusión ni de grandes temperaturas (de ellos hablaremos en el siguiente capítulo). Aun siendo tan primitivos, muchos condritos también han sufrido procesos de alteración acuosa y asociados a las altas temperaturas. Probablemente, esto se debió a los elementos radiactivos que contenían en su interior y que, al descomponerse, podían calentarlos desde dentro, así como a las altas temperaturas derivadas de las colisiones con otros cuerpos. Son muy excepcionales los condritos que no han sufrido ninguna alteración y que pueden contener muestras del polvo primigenio del sistema solar, pero los hay.

Estos meteoritos contienen en su interior unas esferas llamadas «cóndrulos», que rondan el milímetro de tamaño y que se formaron a partir de materiales rocosos fundidos, o parcialmente fundidos, de la nebulosa protoplanetaria. Precisamente gracias a estos cóndrulos hemos sido capaces de datar con exactitud la edad del sistema solar, ya que fueron de los primeros sólidos que condensaron en la nebulosa protoplanetaria.

Los isótopos radiactivos que contienen estos cóndrulos nos permiten ponerles una fecha de origen, aunque hay que tener mucho cuidado a la hora de estudiarlos porque algunos podrían haberse formado más tarde. Los cóndrulos más antiguos conocidos tienen una edad aproximada de 4.567 millones de años. Y ¿cómo calculamos su edad en el laboratorio? Pues mediante una técnica conocida como «datación radiométrica».

Al principio hablábamos de que hay isótopos que no son estables, que se desintegran y dan lugar a otro isótopo diferente. Puesto que podemos calcular con mucha precisión la cantidad de isótopos «padre» (los que se desintegran) e «hijo» (los que resultan de la desintegración) que existen en un determinado mineral, solo nos queda conocer su periodo de semidesintegración, es decir, el tiempo que tarda una cantidad dada del isótopo padre en transformarse en el isótopo hijo. Afortunadamente, los periodos de semidesintegración se conocen bastante bien y no se ven afectados por ningún cambio externo, como puede ser un campo magnético, la temperatura, la humedad, etc. Distintos isótopos nos servirán para datar distintas cosas, ya que algunos tienen periodos de semidesintegración muy bajos (del orden de miles de años), y nos sirven para fechar eventos relativamente recientes, mientras que otros tienen periodos de miles de millones de años, y se usan para datar hechos que ocurrieron en los albores del sistema solar.

Pero, desgraciadamente, en la naturaleza no hay ningún sistema perfecto, y a veces un fuerte aumento de temperatura puede hacer que los minerales pierdan una cantidad de estos átomos padre o hijo, lo cual altera la edad de un mineral concreto, o incluso la de toda la muestra; normalmente provoca un «rejuvenecimiento» en la edad. A veces incluso hemos contaminado las muestras sin querer durante el proceso de transporte o preparación, lo cual nos ha obligado a tener que repetir la datación. Para evitar este tipo de problemas, las edades calculadas mediante datación radiométrica no se hacen nunca sobre un mineral solo, sino sobre varios, para comprobar que efectivamente hay una concordancia en todas las edades y así descartar procesos naturales o errores que puedan dar al traste con una buena datación.

Aunque conocemos a grandes rasgos la historia de la formación de nuestro sistema solar y hoy día podemos observar sistemas planetarios en distintos estadios de formación con los que comparar el nuestro y crear fantásticos modelos físicos y matemáticos, todavía quedan muchos detalles por averiguar. Sin embargo, con las mejoras tecnológicas, y con un mayor acceso al espacio, seguro que podremos ir escribiendo muchas páginas de esta apasionante historia que culminaremos en el siguiente capítulo, con la formación de nuestro planeta.