

# EL ORIGEN DE LOS SISTEMAS PLANETARIOS

**Cuando observamos el cielo, percibimos la cadencia majestuosa del paso de nuestros vecinos planetarios a lo largo de los meses. Sus órbitas surcan el firmamento con armonía, pero ¿fueron así sus orígenes? Las observaciones, simulaciones y teorías científicas apuntan precisamente a lo contrario. Posiblemente la configuración final del Sistema Solar sea tal como es sólo como consecuencia del puro azar.**

Este artículo recoge la primera ponencia de la serie “Vida en el Universo” del grupo de Cosmología de la Agrupación. Presenta un recorrido por la génesis de los planetas, junto con los otros objetos que forman los sistemas planetarios (satélites, asteroides y otros). Para ello, aborda la historia de los descubrimientos e ideas sobre esta materia, los principios de la teoría solar nebulosa, actualmente la más aceptada, las etapas en la formación de un sistema planetario, concretándolas en nuestro Sistema Solar y finalmente las referencias de otros sistemas planetarios menos comprendidos hasta la fecha.

## Los orígenes de una idea

La búsqueda de una explicación al origen de planetas se remonta al siglo XVIII. En el año 1734, un físico sueco, llamado Emanuel Swedenborg ya apuntó que los planetas se podrían formar partir de nubes que colapsaban y se aplanaban

Esta idea se refinó en 1755, por el filósofo Immanuel Kant, que conocía el trabajo de Swedenborg. Afirmó que el Sol fue el primer astro en formarse, y, a su vez, una nube de partículas inició un movimiento giratorio que concentró parte de la materia en el plano de giro y el resto fue expulsado hacia el exterior. Con esa materia se formaron los planetas. Esta hipótesis se convirtió en el mayor avance astronómico desde Copérnico, puesto que por primera vez se cuestionó la idea de que las órbitas y estados de los cuerpos celestes eran fijos a lo largo de su vida.

El matemático francés Pierre-Simon Laplace, en 1796, afirmó, sin conocer las ideas de Kant, que una nube, que se contrae a medida que se enfría, deja tras de sí un conjunto de anillos que dan lugar a los planetas. En su libro *Exposición del Sistema del Mundo*, desarrolló su “teoría nebulosa” En ella explica que el Sistema Solar se había formado a partir de una nebulosa que rodeaba a un núcleo más denso y con temperaturas elevadas. Ésta tenía un movimiento giratorio que provocó el enfriamiento de las capas externas y la fragmentación de la nebulosa en diversos anillos. La

condensación de éstos daría lugar a la formación de los planetas y su núcleo el Sol.

Sin embargo, en 1857 James Clerck Maxwell, el unificador de la teoría electromagnética, estudiando los anillos de Saturno, dedujo que estaban formados por una gran mezcla de partículas, en lugar de un disco continuo. Si esto era cierto para Saturno, ¿por qué no para un disco alrededor de una estrella joven? Aquel material no podía ser más que rocas, y de ellas era muy difícil que se formasen planetas.

La influencia de Maxwell en aquellos años provocó el abandono de la teoría nebular y los científicos volvieron su interés a las llamadas “teorías catastrofistas” (eventos violentos dieron origen al Sistema Solar). Así, por ejemplo, se retomó una idea antigua de Leclerc, conde de Buffon, que proponía que un cuerpo celeste chocó con el Sol y el encuentro arrojó materia.

Otros autores fueron menos tremendistas. En 1901 Chamberlain y Moulton formularon la teoría planetesimal. Los planetas se formaron al desprenderse material del Sol al aproximarse otra estrella. Otra teoría parecida, de Jeans, en 1917, establecía que el desprendimiento fue provocado por una fuerza de marea en el paso del otra estrella cerca de la nuestra.

Sin embargo, estas teorías no podían explicar muchos de los hechos que entonces ya se observaron en nuestro Sistema Solar.

### **La teoría Solar Nebular**

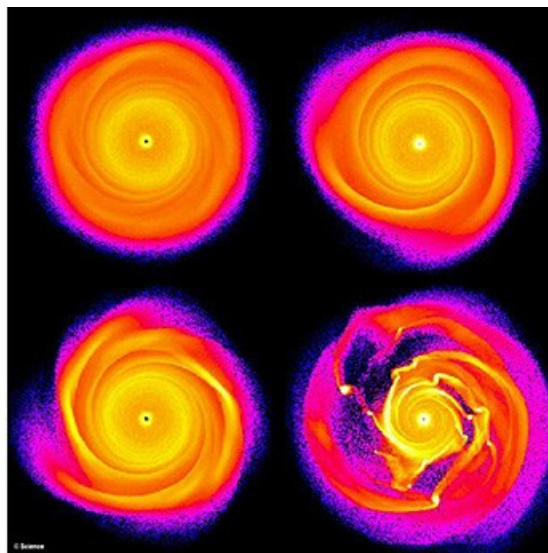
En 1944, cuando ya se conocía la física atómica y su potencial energético, Carl Friedrich von Weizsäcker retomó la teoría nebular introduciendo matices que suponían un gran avance respecto a planteamientos anteriores. El proceso de formación se inició hace unos 5.000 millones de años, cuando una nebulosa de polvo y gas cósmico comenzó a contraerse alrededor de su centro, dando lugar a turbulencias y remolinos. En esos remolinos las partículas empezaron a fundirse formando agrupaciones de materia. En el núcleo de esa agitada nebulosa, más densa y caliente, se produjo una reacción nuclear en cadena, como consecuencia de la fusión de átomos de hidrógeno (lo que supuso el nacimiento del Sol). Al mismo tiempo, esta nebulosa mantenía un movimiento giratorio. Con la energía radiada por el protosol, se evaporó el resto de la nebulosa, después de lo cual se inició un proceso de enfriamiento y formación de partículas de reducido tamaño que dieron lugar a los planetesimales, el antecedente de los planetas.

La teoría más aceptada actualmente es una evolución de la anterior, y nació con la traducción al inglés en 1972 de un libro del físico ruso Víctor Safronov: *Evolución de la nube planetaria y formación de la Tierra y los*

*planetas*<sup>1</sup>. Así, los planetas se forman a partir de un disco de hidrógeno, helio y polvo estelar por medio de un proceso de acreción o fusión, desde partículas de centímetros de diámetro y pasando por cuerpos del orden de un kilómetro, llamados planetesimales, y después por otros de varios miles de kilómetros, denominados embriones planetarios.

Actualmente se acepta que dos modelos de procesos físicos son los responsables de esta fusión:

- Uno es el de acreción nuclear<sup>2</sup>, en el que el polvo se acumula a partir de grumos de material sólido muy pequeños, al estilo de la pelusa que inunda los rincones de nuestras casas. Con relativamente poca masa abarcan mucha superficie y así pueden captar más materia. En un disco planetario surgen en diferentes zonas y la autogravedad las hace crecer.
- Otro es el de inestabilidad gravitatoria<sup>3</sup>. Según él, el disco se comporta como un fluido, pero como la velocidad orbital disminuye conforme está más separado de la estrella, se crean franjas circulares con diferentes velocidades y esto provoca fricción entre ellas. Es como las bandas de la atmósfera de Júpiter, cuya fricción mantiene estable la Gran Mancha Roja. En este escenario, con el paso del tiempo se crean de manera esporádica turbulencias que provocan aglomeraciones de material por la autogravedad.



*Formación por inestabilidades gravitatorias.  
Fuente: rst.gsfc.nasa.gov*

En un principio la nube está muy caliente en las cercanías de su centro (hasta varios miles de grados centígrados) como resultado de la rotación y

<sup>1</sup> Evolution of the planetary cloud and formation of the Earth and the planets

<sup>2</sup> También llamado “acreción secuencial” o “inestabilidad nuclear”.

<sup>3</sup> Denominado también “inestabilidad del disco”.

del comienzo de las reacciones nucleares. La temperatura disminuye de forma progresiva con la distancia a la estrella.

Existe una circunferencia imaginaria en el disco, llamada “línea de hielo”, con una distancia tal que en su interior los materiales con bajos puntos de fusión (como el agua) se evaporan, y sólo permanecen otros, como los metales y los silicatos. Más lejos de ella, la temperatura es lo suficientemente baja como para que el hielo permanezca estable.

En sus cercanías se acumula mucho material, pues los granos que la atraviesan en dirección al exterior del disco se empapan del hielo evaporado junto a ella y los que la atraviesan hacia el interior se desprenden de la capa de agua helada.

Esta zona es determinante en la formación de un sistema planetario, como veremos más adelante.

### **Debilidades y fortalezas**

Ninguno de los dos modelos anteriores es completamente satisfactorio. El primero predice crecimientos iniciales muy lentos, tanto que no daría tiempo a crear planetas en el tiempo que se mantiene el disco desde la formación inicial junto con su estrella. El segundo falla cuando los cuerpos tienen un tamaño equivalente a la Luna. Entonces el calor radiado, provocado por la caída de material, puede ser tan grande que puede impedir la caída de nuevo material.

Otro problema común a los dos modelos es que cualquier cuerpo que crezca hasta cierto tamaño tiende a caer en espiral hacia su estrella porque es frenado por el disco, que tiende a ser más lento. Algún proceso no comprendido completamente debe detener los objetos, porque en caso contrario se terminarían precipitando en su estrella. Una de las posibles explicaciones es la existencia de turbulencias e irregularidades en el disco, que impediría una pérdida regular de velocidad.

Finalmente tampoco está completamente comprendida la pérdida de momento angular del disco en conjunto necesaria para que los planetas no salgan despedidos de sus órbitas. La conservación del momento angular inicial del sistema planetario hace que, conforme comienza a contraerse, su velocidad angular aumente, como un patinador cuando encoge sus brazos al girar. Algún mecanismo físico debe intervenir para ir frenando la velocidad angular del sistema planetario conforme va madurando.

A pesar de todo, muchas observaciones avalan esta teoría. El apoyo más rotundo es la visión a través de los telescopios de sistemas planetarios en formación, en los que se perciben discos que ocultan la luz de sus estrellas.

En otros casos, los análisis de los espectros permiten deducir la presencia de polvo y gas alrededor de las estrellas.

Otras fuentes de observación son la posición y composición actuales de los meteoritos en el Sistema Solar. Por ejemplo, un grupo de ellos tienen núcleos fundidos a partir de materiales resultantes de la degeneración nuclear de otros, como el aluminio 26, cuya presencia sólo se explica como resultado de una explosión estelar cercana.

El modelo solar nebular predice la existencia de planetas rocosos<sup>4</sup> (cerca de su estrella, con densidad apreciable y superficie sólida) y gaseosos (lejanos, con baja densidad y superficie gaseosa). Además también la de exoplanetas peculiares, como los “júpiteres calientes” (grandes planetas gaseosos que orbitan extraordinariamente cerca de su estrella) o los “gigantes excéntricos” (del mismo tipo que los anteriores, pero con una órbita muy excéntrica<sup>5</sup>).

### **Los pasos de la formación**

Con las ideas anteriores estamos en condiciones de predecir las etapas generales que han dado lugar a los sistemas planetarios. Aunque están enumeradas en secuencia, debe entenderse que no tiene por qué ser así en todos los casos.

#### **Fase 1. Colapso de la nube interestelar**

Tiempo estimado: de 0,1 a 1 millón de años.

Los sistemas planetarios nacen de inmensas nubes, llamadas “grandes nubes moleculares”, del tamaño de unos 20 pársec<sup>6</sup>, formadas principalmente por un 98 % de hidrógeno, helio y trazas de litio, junto a un 2 % de elementos más pesados, como carbono, nitrógeno, oxígeno o hierro, formados en nucleosíntesis estelares<sup>7</sup> en el interior de otras estrellas que explotaron en las cercanías.

Estas nubes tienen muy baja densidad (alrededor de 1 partícula por cada 100 litros), pero son tan grandes que la masa total es de unos 300.000 soles. Su temperatura es baja y se mantienen en un equilibrio gravitatorio precario, en el que basta una pequeña concentración inicial de gas por encima de la media masa para desencadenar fragmentaciones de nubes más pequeñas, entre 0,01 y 0,1 pársec de diámetro. De cada una de ellas nacerá una estrella y tal vez un sistema de planetas.

<sup>4</sup> También llamados “telúricos” o “terrestres”.

<sup>5</sup> Prescindiendo de definiciones matemáticas rigurosas, la excentricidad es una medida del achatamiento de una órbita planetaria.

<sup>6</sup> Un pc o pársec es una distancia equivalente a 3,26 años - luz.

<sup>7</sup> Formación de elementos dentro de estrellas que vivieron previamente y explotaron como supernovas o los esparcieron en el espacio por otros mecanismos.

En el centro de las grandes nubes moleculares surgen las primeras generaciones de estrellas, muy masivas y efímeras (duran pocos millones de años), antes de morir como supernovas. Las ondas expansivas enriquecen la parte de la nube exterior con materiales más pesados que el hidrógeno y el helio y contribuyen con la onda de presión a acelerar la contracción de las nubes externas y con ellas su colapso.

En nuestro caso, la nube contenía entre 1.500 y 3.500 estrellas, con una distribución desigual<sup>8</sup>. Esta nube ha desaparecido actualmente, pero está previsto un proyecto de detección de las estrellas que pudieron formar parte de aquella nebulosa y han sobrevivido hasta la fecha.

La línea de hielo se situó en unas 4 UA<sup>9</sup>, y fue la que diferenció los planetas gigantes, Júpiter y el resto, de los terrestres, desde Mercurio hasta Marte.

La concentración gaseosa central creó una estrella, pero para ello tuvieron que transcurrir cientos de miles de años, en los que se pueden distinguir dos etapas previas:

- Protoestrellas de Clase 0<sup>10</sup>. Se forma una concentración en la que no se producen aún reacciones nucleares. Sin embargo, la energía gravitacional creada por el disco que se precipita en su interior enciende la estrella a luminosidades muy altas (del orden de varios cientos de soles). El disco planetario oscurece la estrella, pues los discos de polvo son opacos, interceptan la luz y la reemiten en el infrarrojo cercano, y esto provoca que el disco se mantenga caliente.
- Protoestrellas de clase 1<sup>11</sup>. La zona central adquiere la presión y temperatura suficientes para comenzar a fusionar deuterio. El disco comienza a adelgazar y ser transparente, pues el viento estelar barre sus cercanías. De los polos de la estrella salen chorros de partículas ionizadas.

En general, el resultado final de esta fase fue una estrella recién nacida rodeada de un gas y granos de polvo.

### **Fase 2. Formación de planetesimales**

Tiempo estimado: 1 millón de años

Debido a los procesos de acreción nuclear e inestabilidad gravitatoria, se crean agregados de material, llamados planetesimales, a partir del polvo y el gas. En el interior de la línea de hielo prevalecen los primeros procesos y se crean objetos de materiales pesados, mientras que en el exterior estos

---

<sup>8</sup> Se estima que por cada una de las estrellas masivas (de 15 a 20 masas solares), había unas 1.500 estrellas más pequeñas.

<sup>9</sup> Una UA o Unidad Astronómica es la distancia entre la Tierra y el Sol, alrededor de 150 millones de kilómetros.

<sup>10</sup> También llamados "Objetos de Harbing-Hero".

<sup>11</sup> Denominados también "Jóvenes Objetos Estelares" o "Joven T Tauri".

agregados adquirieren más masa al contar además con el agua y otros materiales volátiles.

Entretanto, fuera de la línea de hielo se produce un proceso de caída de los granos de polvo hacia la estrella, llamado “migración de tipo I”. La rotación del disco, debido a la presión del gas, es algo menor que la de los granos, y esto provoca una fuerza de rozamiento que los frena y los hace caer a la estrella. Una vez pasen la línea el medio es menos denso, por lo que tienden a quedarse en ella.

Dentro de la línea de hielo, los granos crecen por choques y fusiones.

Las partículas se van agrupando en formaciones de varios kilómetros, los planetesimales. El resultado final de esta fase es un enjambre de miles de ellos.

### **Fase 3. Formación de embriones planetarios**

Tiempo estimado: 1 a 10 millones de años

Los choques entre planetesimales hacen que éstos se fundan o, al contrario, se despedacen. Además, las interacciones gravitatorias entre ellos hacen que sus órbitas se vuelvan caóticas y algunos sean expulsados del sistema planetario, aunque habitualmente el arrastre del gas tienda a volverlas de nuevo circulares.

Al principio, el tamaño pequeño de los planetesimales hace que su crecimiento se autorefuerece<sup>12</sup> (cuanta más masa, más interacción gravitatoria) y alcancen masas análogas a las de la Luna o Marte. En ese momento, se pueden denominar “embriones”.

Entonces, su gravedad es tan intensa que, en lugar de atraer, dispersa el material sólido antes de que caiga en ellos y esto crea una banda estrecha vacía en la órbita de cada uno de ellos.

Finalmente, el crecimiento se paraliza cuando han atrapado la mayoría de los planetesimales en esa zona. Sin embargo, los embriones cercanos a la línea de hielo pueden crecer aún más.

El crecimiento caótico hace que haya un excedente de embriones en el disco, por lo que, con el paso del tiempo, algunos pueden ser expulsados hasta que todo el sistema alcanza una configuración de equilibrio<sup>13</sup>.

Fuera de la línea, durante unos 3 millones de años, los planetesimales acumulan material hasta alrededor de 3 masas terrestres.

---

<sup>12</sup> El crecimiento es proporcional al cuadrado del radio del planetesimal. Esta relación se deriva de la sección geométrica de la órbita que describen.

<sup>13</sup> Los embriones se mantienen en promedio a una distancia equivalente a 10 veces el radio de Hill, siendo la esfera de Hill la zona de influencia gravitatoria de ellos.



El resultado final es un número relativamente pequeño de embriones.

### **Fase 4. Formación del primer planeta gigante**

Tiempo estimado: De 1 a 10 millones de años.

Al principio, se forma un embrión planetario de forma análoga a lo comentado en la fase anterior. Pero en este caso se acelera a un ritmo asombroso, en sólo 1.000 años puede pasar de tener desde unas cinco hasta varios cientos de masas terrestres.

El borde exterior de la línea de hielo tiene tanta materia que permite la formación del primer planeta gigante del sistema. En esa zona se estima que hay una proporción de cuatro veces más hielo que polvo. En nuestro caso, Júpiter, que estaba justo detrás de la línea, se formó a partir de un embrión de unas 150 masas terrestres, que luego, en sólo miles de años, creció hasta casi las 318 masas actuales.

Este crecimiento genera mucho calor, producido por los choques de los que van cayendo. Así, durante un corto período de tiempo el planeta puede brillar tanto como su propia estrella.

El planeta ahora es tan masivo que, en lugar de que el disco altere su órbita, él altera el disco abriendo un hueco en su trayectoria. La presión del gas tiende a repoblar este hueco, pero el planeta absorberá el gas si tiene cierta masa, como sucedió con Júpiter a las cinco UA del Sol.

El crecimiento del gigante se produce al mismo tiempo que la disminución de la densidad del gas en el disco, por lo que en cierto sentido es una carrera contra reloj. Cuanto antes se forme el planeta, más masa tendrá. El balance final también depende de la composición inicial del disco. De hecho, se ha observado mayor tendencia a la existencia de planetas gigantes en estrellas de metalicidad<sup>14</sup> moderada o alta.

El resultado final es uno o, a veces, ningún planeta gigante.

### **Fase 5. Movimientos del planeta gigante**

Tiempo estimado: de 1 a 3 millones de años.

Como se ha mencionado antes, un número significativo de exoplanetas son los llamados "júpiteres calientes", que en principio deberían haberse formado en la región interna cerca de la línea de hielo, pero esto no parece lógico debido a la falta de material necesario allí. Por tanto, el planeta tiene que haberse formado en el exterior y haberse acercado a la estrella.

---

<sup>14</sup> La metalicidad es el grado de composición de materiales más pesados que el hidrógeno y helio formados en el interior de estrellas. Se dice que la metalicidad es alta cuando la concentración lo es. Cuidado, no todos estos materiales son metales.



Una posible explicación es que, a la vez que ocurre este crecimiento, existe una tendencia de los gigantes gaseosos a caer en espiral hacia su estrella. Este hecho es conocido como "migración de tipo II"

El embrión crea un marea gravitatoria en su órbita, y con ella dos estelas de material, una por delante en el interior del disco y otra por detrás en el exterior, debido a que en el interior la velocidad de rotación es mayor que la del embrión y en el exterior es menor. La estela interior tiende a acelerar y la exterior a frenar, por lo que se contraponen una a otra.

El balance resultante es que el embrión se va frenando ligeramente y su órbita va acercándose a su estrella. Si persiste esta tendencia, el resultado final de esta fase es un "júpiter caliente".

No se conocen bien los mecanismos que detienen la migración: Quizá los campos magnéticos de la estrella y el viento solar limpian con el paso del tiempo el gas y el polvo de la zona del disco interior al planeta y así deja de frenarlo. En el caso de que el planeta se acerque mucho a su estrella también puede ser que ejerza una fuerza de marea en la estrella y ésta, a su vez, tense la órbita del planeta. Por suerte, nuestro Júpiter no sufrió esta migración.

### **Fase 6. Formación de otros planetas gigantes**

Tiempo estimado: De 2 a 10 millones de años.

La aparición del primer un planeta gigante facilita la creación de otros, fuera de la línea de hielo, a partir del material que ha amontonado.

Los campos gravitatorios de estos nuevos planetas pueden plantear problemas. Si se forman demasiado cerca de otros pueden dar lugar a órbitas muy elípticas, como las observadas en los llamados "gigantes excéntricos", en otros sistemas planetarios.

En nuestro Sistema Solar, Saturno se aprovechó de los escombros que fue acumulando Júpiter y se formó con mucha menos masa, unos cuantos millones de años más tarde.

Neptuno y Urano<sup>15</sup> se formaron en una zona menos densa de planetesimales y con muy poca abundancia de materiales pesados, lo que ha contribuido a que sus núcleos sean en proporción mucho más pequeños que los de los otros gigantes<sup>16</sup>. Aún así, nacieron más cerca del Sol que en su ubicación actual. Su formación puede ser explicada si se produjo entre 15 y 20 UA, no en su posición actual, entre 20 y 30 UA.

En general, el resultado final de esta fase es un número pequeño de gigantes gaseosos.

---

<sup>15</sup> En un principio Neptuno estaba más cerca del Sol que Urano.

<sup>16</sup> Este tipo de planetas se denominan de "corazón fallido".

## Fase 7. Formación de planetas rocosos

Tiempo estimado: De 10 a 100 millones de años.

Como ya se ha comentado, en el interior de la línea de hielo se forman los planetas rocosos a partir de la fusión de planetesimales y embriones compuestos por sustancias poco volátiles. Estos objetos se desplazan poco de su órbita a lo largo de su formación.

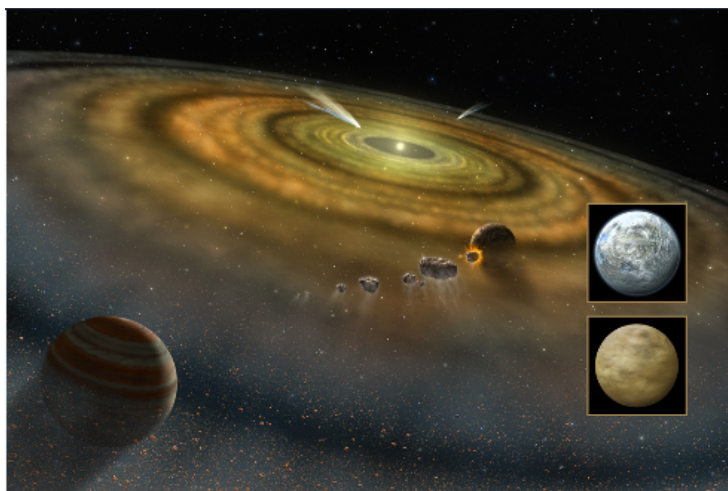
En el caso del Sistema Solar, se formaron entre 50 y 100 embriones que debieron crecer hasta un 10 % de la masa terrestre. Sus órbitas debieron cruzarse y después, mediante grandes colisiones, algunos se fusionaron, lo que dio lugar, por ejemplo, a la Luna o a la pérdida de la capa externa de Mercurio, y otros llegaron a ser expulsados. Además, la gravedad de Júpiter<sup>17</sup> pudo contribuir más a que se deformasen sus órbitas y se toparan con nuevo material.

Sus órbitas iniciales, muy excéntricas, se fueron suavizando. Hay dos teorías que explican este hecho. La primera, llamada del “gas residual”, establece que la fuerza estabilizadora provenía del gas que los rodeaba. En la segunda, llamada de “estela gravitatoria”, la fuerza estaba originada por otros planetesimales y objetos menores.

La datación radiométrica de los materiales en los asteroides, Marte y la Tierra indica que la formación se produjo desde la línea de hielo hacia dentro, pues es de 4, 10 y 50 millones de años respectivamente.

En general, el resultado final de esta fase es la formación entre 2 y 5 planetas rocosos.

Además, cerca del gigante debe producirse un anillo de planetesimales, pues el barrido orbital del planeta impide la concentración de material. En el Sistema Solar es el cinturón de asteroides.



<sup>17</sup> Se estima que Júpiter se formó a los 3 millones de años, mientras que el primer planeta rocoso, Marte, fue posterior, como se comenta en el artículo.

*Concepción artística de Beta Pictoris junto con su joven disco de formación.*

*Fuente: jpl.nasa.gov*

## **Fase 8. Eliminación del gas restante y dispersión de planetesimales**

Tiempo estimado: De 50 a 1.000 millones de años.

En este momento, el sistema planetario está prácticamente formado. La estrella se separa del cúmulo estelar en el que nació, elimina lo que queda de gas en el disco y los planetesimales que quedan son dispersados por los planetas gigantes.

En nuestro Sistema Solar, las órbitas de todos los planetas gigantes continuaron cambiando suavemente influenciadas por la interacción con el gran número de planetesimales que quedaban.

Después de 500 o 600 millones de años del comienzo de la formación, Júpiter y Saturno entraron en resonancia 2:1<sup>18</sup>, lo que produjo un empuje gravitacional tal en Neptuno que adelantó a Urano y se estrelló contra el cinturón Kuiper.

Muchos de sus planetesimales fueron absorbidos y otros frenados, lo que provocó que se movieran hacia adentro. Mientras tanto, Urano y Neptuno ganaban velocidad progresivamente y se alejaban del Sol.

Los planetesimales más interiores terminaron encontrándose con el todopoderoso Júpiter. Su inmensa gravedad los despidió en órbitas muy excéntricas hacia el exterior. Esto provocó a su vez que el planeta perdiera un poco de su velocidad orbital y perdiera su resonancia 2:1 con Saturno.

De esta manera, el cinturón de Kuiper cambió su configuración antigua, en un anillo desde las 15 a las 20 UA (donde estaban Neptuno y Urano) hasta la actual, con anillos en 30, 55 y 100 UA.

También la interacción de otros planetesimales con Júpiter los proyectó a zonas muy lejanas y formó la Nube de Oort (una esfera a partir de las 50.000 UA).

Con respecto al cinturón de asteroides, en las etapas iniciales debieron formarse el equivalente de 20 a 30 embriones, pero después fueron dispersados por la gravedad de Júpiter.

Los planetas interiores no observaron inmunes este espectáculo. Unos 800 millones de años después del nacimiento del Sol se produjeron un gran número de impactos en la Tierra, Marte o la Luna. Los dos últimos todavía conservan las huellas de los impactos. Este hecho es conocido como el

---

<sup>18</sup> Por cada dos órbitas completas de Júpiter, Saturno daba exactamente una.

Bombardero Pesado Tardío. En la Tierra se cree que este hecho trajo gran parte del agua de los océanos actuales.

Resultado final es la configuración definitiva de un sistema planetario.

### **Mecanismos de formación de satélites**

La teoría solar nebulosa también permite explicar la formación de satélites mediante tres mecanismos:

- Coformación, o formación simultánea con el planeta, a partir de un mismo disco inicial. Ésta es característica de los de los planetas gaseosos, como por ejemplo, los de Júpiter o Saturno.
- Impactos, o choques laterales entre objetos rocosos de masa planetaria que levantan grandes cantidades de manto planetario. Los escombros de los impactos que quedan en órbita se concentran y dan lugar a los satélites. Ejemplos son los sistemas Luna - Tierra y Plutón - Caronte
- Captura. Un objeto externo al planeta pasa cerca de él y queda encerrado en la su gravitatorio. Ejemplos son los satélites de Marte.

### **Nuevos desafíos para la teoría**

Hasta este punto hemos revisado la formación en sistemas de estrellas convencionales, pero es sorprendente que hayan detectado planetas en otros tipos de estrellas, por ejemplo, alrededor del púlsar PSR 1257 + 12. Parece muy improbable que sobreviviesen a las últimas fases de su estrella y a su explosión final como supernova. Es más posible que este tipo de planetas se creen a partir de los escombros coagulados de la explosión.

También se han detectado discos de material alrededor de enanas blancas, pero en este caso no hay indicios de planetas, posiblemente en este caso no exista material suficiente para formar más que planetesimales.

Respecto a los sistemas estelares binarios o múltiples, se han realizado simulaciones numéricas, en las que se introducen unas condiciones físicas de partida (una determinada distribución de planetesimales distribuidos en un supuesto disco a distancias progresivas de la estrella, con densidades medias y choques inelásticos). Los resultados deben tomarse con reserva, pero indican que la existencia de más de una estrella en un sistema planetario tiende a hacerlo más inestable (sobreviven menos planetas y con órbitas más elípticas), a menos que las estrellas giren en el mismo plano

que los planetas y que la distancia entre ellas no sea ni muy grande ni muy pequeña<sup>19</sup>.

En general, existe una tendencia a que las estrellas que orbitan en otros planos tiren de los planetas y provoquen que salgan de su plano orbital, formando sus órbitas en conjunto un elipsoide. En casos extremos, el plano orbital de algún planeta puede girar hasta media vuelta (180 °) y cambiar el sentido de su órbita; es decir, hacerla retrógrada, como se ya se ha observado en algún caso.



*Disco de formación planetaria*

*Fuente: [jpl.nasa.gov](http://jpl.nasa.gov)*

### **El futuro**

Cualquier teoría de formación planetaria se desarrollará en paralelo con las observaciones de planetas lejanos. Estos últimos años, especialmente fecundos en descubrimientos han ayudado a desarrollar una teoría razonablemente robusta. En el futuro, en la medida en que nuestros telescopios sean capaces de detectar más exoplanetas, y cada vez más pequeños y alejados de sus estrellas, tendremos más datos para poder ajustar los detalles de los procesos físicos que dieron lugar a esa amplia gama de variedad planetaria.

Esperamos ver esos momentos y disfrutar del conocimiento de esos mundos extraños y distantes, pero a la vez no tan diferentes de los nuestros.

### **Referencias.**

He aquí una selección de los artículos y documentación consultados para la redacción de este artículo.

---

<sup>19</sup> Distancias del orden 10 UA para estrellas del tamaño del Sol provocan sistemas especialmente inestables.

En la revista Investigación y Ciencia:

- *La génesis de los planetas*. Douglas N.C. Lin, Julio 2008.
- *Sistemas planetarios extrasolares*. Gregory P. Laughlin.
- *Planetas ectópicos*. Michael W. Werner y Michael A. Jura. Agosto 2009.

Artículos en Wikipedia:

- *Nebular hypothesis*.
- *Formation & evolution of the Solar System*.

Artículos específicos:

- *Terrestrial planet formation in binary star systems*. Jack Lissauer, Elisa V. Quintana.
- *Tornados and hurricanes in planet formation*. H. Klair and P. Bodenheimer.
- *Migraciones en el Sistema Solar*. Neomenia. Alex Mediolaogitia.
- *El tiempo y la humanidad. Origen del mundo*. Taller Digital, en [www.cervantesvirtual.com](http://www.cervantesvirtual.com)