

Capítulo /1

Formación del Sistema Solar

La formación y evolución del Sistema Solar, el sistema planetario que cobija a la Tierra, están determinadas por un modelo que ahora es muy aceptado y conocido como la "hipótesis de la nebulosa solar". Este modelo fue desarrollado en el siglo XVIII por Emanuel Swedenborg, Immanuel Kant y Pierre-Simon de Laplace. Los desarrollos que siguen esta hipótesis han involucrado una amplia variedad de disciplinas científicas, incluidas la astronomía, la física, la geología y la planetología. Desde el comienzo de la conquista del espacio en la década de 1950 y tras el descubrimiento de exoplanetas en la década de 1990, los modelos han sido cuestionados y refinados para tener en cuenta las nuevas observaciones.

Según las estimaciones de este modelo, el Sistema Solar comenzó a existir hace 4.55 a 4.560 millones de años con el colapso gravitacional de una pequeña parte de una nube molecular gigante. La mayor parte de la masa de la nube inicial colapsó en el centro de

esta área, formando el Sol, mientras que sus restos dispersos formaron el disco protoplanetario sobre la base del cual se formaron los planetas, lunas, asteroides y otros cuerpos pequeños del Sistema Solar. El Sistema Solar ha evolucionado considerablemente desde su formación inicial. Muchas lunas se formaron a partir del disco gaseoso y el polvo que rodeaba a sus planetas asociados, mientras que se supone que otras se formaron de forma independiente y luego fueron capturadas por un planeta. Finalmente, otros, como el satélite natural de la Tierra, la Luna, serían (muy probablemente) el resultado de colisiones cataclísmicas. Las colisiones entre cuerpos han tenido lugar continuamente hasta la actualidad y han desempeñado un papel central en la evolución del Sistema Solar. Las posiciones de los planetas se han deslizado notablemente, y algunos planetas han intercambiado sus lugares¹. Ahora se supone que esta migración planetaria fue el motor principal de la evolución del joven Sistema Solar. En unos 5 mil millones de años, el Sol se enfriará y se expandirá mucho más allá de su diámetro actual, para convertirse en una gigante roja. Luego expulsará sus capas superiores según el esquema de las nebulosas

planetarias, y dejará atrás un cadáver estelar: una enana blanca. En un futuro lejano, la atracción gravitacional de las estrellas que pasan cerca arrancará gradualmente la procesión de los planetas del antiguo sistema de su estrella. Algunos planetas serán destruidos, mientras que otros serán expulsados al espacio. Después de varios miles de millones de años, es probable que el Sol, que se ha convertido en una enana negra, esté solo y helado, sin ningún cuerpo gravitatorio en su órbita.

Historia de la teoría actual

Pierre-Simon de Laplace, uno de los fundadores de la hipótesis de la nebulosa solar. Las ideas relacionadas con los orígenes y el futuro del mundo se informan en los escritos más antiguos conocidos. Sin embargo, como aún no se conocía la existencia del Sistema Solar tal como se define actualmente, la formación y evolución del mundo no se refería a él. El primer paso que abrió la puerta a una explicación racional fue la aceptación del heliocentrismo, que colocaba al Sol en el centro del sistema y a la Tierra en órbita a su alrededor. Si esta

concepción era conocida por los precursores, como Aristarco de Samos ya en el 280 a.C. En el año J.-C., permaneció en gestación durante siglos, y fue ampliamente aceptado solo a fines del siglo XVII. El término "Sistema Solar", estrictamente hablando, se usó por primera vez en 1704. Immanuel Kant en 1755 y, de forma independiente, Pierre-Simon de Laplace en el siglo XVIII fueron los primeros en formular la hipótesis de la nebulosa solar. Esta hipótesis es el embrión de la teoría estándar actualmente asociada con la formación del Sistema Solar. La crítica más importante a esta hipótesis fue su aparente incapacidad para explicar la relativa falta de momento angular del Sol en comparación con los planetas. Sin embargo, desde principios de la década de 1980, la observación y el estudio de estrellas jóvenes han demostrado que están rodeadas de discos fríos de polvo y gas, exactamente como lo predijo la hipótesis de la nebulosa solar, lo que le valió un crédito renovado. Determinar cuál será la evolución futura del Sol, el actor principal del Sistema Solar, requiere comprender de dónde obtiene su energía. La validación de Arthur Eddington del principio de relatividad de Albert

Einstein nos enseña que la energía del Sol proviene de las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en su corazón. En 1935, Eddington continuó con este razonamiento y sugirió que otros elementos también podrían haberse formado dentro de las estrellas. Fred Hoyle elabora sobre estas bases y explica que las estrellas evolucionadas que se llaman gigantes rojas crean una gran cantidad de elementos más pesados que el hidrógeno y el helio en su interior. Cuando una gigante roja finalmente expulsa sus capas externas, los elementos que ha acumulado allí se liberan y pueden reintegrarse en la formación de nuevos sistemas estelares.

El modelo actual de formación de los planetas del Sistema Solar, por acreción de planetesimales, fue desarrollado en la década de 1960 por el astrofísico ruso Viktor Safronov.

Citas

Usando la datación radiactiva, los científicos estiman que la edad del Sistema Solar tiene aproximadamente 4.600 millones de años. Los granos de circón terrestres incluidos en rocas más nuevas que ellos han

sido fechados hace más de 4.200 millones de años, o incluso hasta 4.4. Las rocas terrestres más antiguas tienen una antigüedad de unos 4 mil millones de años. Las rocas de esta edad son raras, porque la corteza terrestre está siendo moldeada constantemente por la erosión, el vulcanismo y la tectónica de placas. Para estimar la edad del Sistema Solar, los científicos necesitan usar meteoritos que se formaron al comienzo de la condensación de la nebulosa solar. Los meteoritos más antiguos, como el meteorito Diablo Canyon, tienen 4.600 millones de años; por lo tanto, el Sistema Solar debe tener al menos esa edad. La condensación del Sistema Solar a partir de la nebulosa primitiva habría ocurrido en 10 millones de años como máximo.

Formación

Nebulosa

presolar

Ilustración de las etapas clave previas a la formación del Sistema Solar.

Esta ilustración está construida a partir de fotos de eventos similares a los discutidos, pero observados en otras partes del Universo.

Según la hipótesis de la nebulosa presolar, el Sistema Solar se formó como resultado del colapso gravitacional de un fragmento de una nube molecular de varios años luz de diámetro. Incluso hace unas décadas, comúnmente se creía que el Sol se formaba en un ambiente relativamente aislado, pero el estudio de meteoritos antiguos reveló rastros de isótopos con una vida media reducida, como el hierro 60, que se forma solo durante la explosión de estrellas masivas de corta duración. Esto revela que una o más supernovas ocurrieron en las cercanías del Sol mientras se estaba formando. Una onda de choque resultante de una supernova podría haber desencadenado la formación del Sol al crear regiones más densas dentro de la nube, hasta el punto de iniciar su colapso. Debido a que solo las estrellas masivas de corta duración forman supernovas, el Sol habría aparecido en una amplia región de producción masiva de estrellas, probablemente comparable a la nebulosa de Orión. El estudio de la estructura del Cinturón de Kuiper y los materiales inesperados encontrados allí sugiere que el Sol se formó entre un conjunto de estrellas agrupadas en un diámetro de 6,5 a 19,5 años luz y que representan una masa colectiva equivalente

a 3.000 veces la del Sol. Diferentes simulaciones de un Sol joven, interactuando con estrellas cercanas durante los primeros 100 millones de años de su vida, producen órbitas anormales. Tales órbitas se observan en el Sistema Solar exterior, especialmente las de objetos dispersos.

Una de estas regiones colapsantes de gas, la "nebulosa presolar", habría formado lo que se convertiría en el Sistema Solar. Esta región tenía un diámetro de entre 7.000 y 20.000 unidades astronómicas y una masa un poco mayor que la del Sol. Su composición era aproximadamente la misma que la del Sol actual. Incluía hidrógeno, acompañado de helio y trazas de litio producidas por nucleosíntesis primordial, formando alrededor del 98% de su masa. El 2% restante de la masa representa los elementos más pesados, creados por la nucleosíntesis de generaciones anteriores de estrellas. Al final de sus vidas, estas estrellas antiguas habían expulsado los elementos más pesados del medio interestelar y de la nebulosa solar. Debido a la conservación del momento angular, la nebulosa giró más rápido a medida que colapsaba. A medida que los materiales dentro de la nebulosa se condensaban, aumentaba la frecuencia de colisiones

de los átomos que los componían, convirtiendo su energía cinética en calor. El centro, donde se recogió la mayor parte de la masa, se calentó cada vez más, mucho más que el disco que lo rodeaba. Durante un período de 100.000 años, las fuerzas competitivas de la gravedad, la presión del gas, los campos magnéticos y la rotación causaron la contracción y el aplanamiento de la nebulosa en un disco protoplanetario giratorio con un diámetro de aproximadamente 200 ua y formando en su centro una protoestrella caliente y densa (una estrella dentro de la cual la fusión de hidrógeno aún no puede comenzar). En este punto de su evolución, el Sol era probablemente una estrella variable del tipo T Tauri. Los estudios de las estrellas T Tauri muestran que son a menudo acompañado de discos de materia preplanetaria con masas de 0,001 a 0,1 masas solares. Estos discos se extienden a lo largo de varios cientos de unidades astronómicas (el Telescopio Espacial Hubble ha observado discos protoplanetarios de hasta 1000 ua de diámetro en regiones de formación estelar como la nebulosa de Orión) y alcanzan una temperatura de mil kelvin como máximo. Después de 50 millones de años, la temperatura y la

presión en el corazón del Sol se elevaron tanto que su hidrógeno comenzó a fusionarse, creando una fuente de energía interna que se opuso a la contracción gravitacional hasta lograr el equilibrio hidrostático. Esto marcó la entrada del Sol en la primera fase de su vida, conocida como secuencia principal. Las estrellas de la secuencia principal obtienen su energía de la fusión de Hidrógeno en helio en su núcleo. El Sol sigue siendo una estrella de secuencia principal hasta el día de hoy.

Formación de planetas

Se supone que los diversos planetas se formaron sobre la base de la nebulosa solar, una nube en forma de disco, hecha de gas y polvo, que no había sido envuelta directamente en la formación del Sol. El fenómeno, actualmente retenido por la comunidad científica, según el cual se formaron los planetas se denomina "acreción". De acuerdo con este proceso, los planetas nacen de los granos de polvo del disco de acreción que orbita la protoestrella central. Como resultado de los contactos directos, estos granos se agregan en bloques de 1 a 10 kilómetros de diámetro,

que, a su vez, chocan entre sí para formar cuerpos más grandes de unos 5 km de ancho, planetesimales. Estos últimos aumentan gradualmente a medida que ocurren nuevas colisiones, aumentando a un ritmo de unos pocos centímetros por año durante los próximos millones de años

El Sistema Solar interior, la región del sistema a 4 ua del Sol, está demasiado caliente para que se condensen moléculas volátiles como el agua y el metano. Además, los planetesimales que se forman allí solo pueden consistir en componentes químicos con un alto nivel de sublimación, como metales (como hierro, níquel y aluminio) y rocas de silicato. Estos cuerpos rocosos se convertirán en los planetas terrestres: Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Como estos compuestos químicos son bastante raros en el Universo, correspondiendo solo al 0,6% de la masa de la nebulosa, los planetas terrestres no están experimentando un crecimiento muy significativo¹¹. El embrión de la Tierra crece en tamaño en no más de 0,05 masas terrestres y deja de acumular materia 100.000 años después de la formación del Sol. Las nuevas colisiones y la fusión de cuerpos del tamaño de cuasiplanetas permiten que los planetas terrestres

crezcan a sus tamaños actuales (ver Planetas terrestres a continuación).

Cuando se forman los planetas terrestres, continúan evolucionando en un disco de gas y polvo. El gas está parcialmente soportado por los mecanismos de presión y, por lo tanto, no orbita tan rápido como los planetas alrededor del Sol. La resistencia inducida por el medio provoca una transferencia de momento angular y, como resultado, los planetas migran gradualmente a nuevas órbitas. Los modelos matemáticos muestran que las variaciones de temperatura en el disco gobiernan esta velocidad de migración, pero los planetas interiores claramente tienden a acercarse al Sol, a medida que el disco se disipa. Esta migración finalmente coloca a los planetas terrestres en sus órbitas actuales. Los planetas gaseosos gigantes, a saber, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, se forman más hacia afuera, más allá de la línea de hielo (también llamada "línea de escarcha"). Esta línea designa el límite, entre las órbitas de Marte y Júpiter, donde la materia está lo suficientemente fría como para que sus compuestos volátiles de hielo permanezcan en estado sólido. Los hielos que forman los gigantes gaseosos son más

abundantes que los metales y silicatos que forman los planetas terrestres. Esto permite que los gigantes se vuelvan lo suficientemente masivos como para eventualmente capturar hidrógeno y helio, los elementos más ligeros pero también los más abundantes del Universo. Los planetesimales formados más allá de la línea de hielo acumulan hasta más de cuatro masas terrestres durante un período de tres millones de años. Hoy en día, los cuatro gigantes gaseosos representan casi el 99% de la masa total que orbita el Sol. Los astrofísicos creen que no es casualidad que Júpiter se encuentre justo más allá de la línea de hielo. La línea de hielo acumularía entonces grandes cantidades de agua por evaporación del hielo que cae de las regiones externas. Esto crearía una región de baja presión que facilitaría la aceleración de las partículas que orbitan en el borde de esta línea e interrumpiría sus movimientos hacia el Sol. De hecho, la línea de hielo actúa como una barrera que provoca la rápida acumulación de material a unas cinco unidades astronómicas del Sol. Este exceso de material se fusiona en un gran embrión de unas diez masas terrestres, que luego comienza a crecer rápidamente envolviendo el hidrógeno presente

en el disco circundante. Luego, el embrión alcanza 150 masas terrestres en solo 1.000 años, hasta alcanzar su masa nominal, 318 veces la de la Tierra. La masa significativamente menor de Saturno podría explicarse por el hecho de que se habría formado unos pocos millones de años después de Júpiter, cuando había menos gas disponible en su entorno. Se supone que Urano y Neptuno se formaron después de Júpiter y Saturno. El poderoso viento solar luego se llevó la mayor parte del material del disco. Como resultado, los planetas tienen la oportunidad de acumular solo una pequeña cantidad de hidrógeno y helio, no más de una masa terrestre cada uno. Urano y Neptuno a veces se denominan "núcleos fallidos", es decir, "núcleos fallidos". El problema central que encuentran las diferentes teorías de la formación del Sistema Solar está asociado a la escala de tiempo necesaria para su formación. Donde se encuentran los planetas, les habría llevado cien millones de años agregar sus núcleos. Esto significa que Urano y Neptuno probablemente se formaron más cerca del Sol, cerca de Saturno o tal vez incluso entre él y Júpiter, y que luego migraron hacia afuera (ver "Migración Planetaria" a continuación). No todos los

movimientos en la zona planetesimal estaban necesariamente dirigidos hacia el Sol; las muestras que la nave espacial Stardust trajo del cometa Wild sugieren que los materiales de la primera formación del sistema solar ha migrado de las regiones más cálidas del sistema a las regiones del Cinturón de Kuiper.

Después de unos cuatro millones de años, todo el gas y todo el polvo del disco de protoplanetas se disipan debido a la acreción en el Sol y los vientos estelares del joven Sol. Después de este punto, solo quedan los planetesimales.

Cúmulo restela

Según simulaciones publicadas previamente en agosto de 2023, "la distribución orbital de los objetos de disco dispersos puede explicarse si se produjo un encuentro estelar particularmente cercano desde el principio (por ejemplo, una enana M con una masa aproximada de $0.02 M_{\odot}$ acercándose al Sol a 200 au). Para que tal encuentro ocurra con una probabilidad razonablemente alta, el Sol debe haberse formado en un cúmulo estelar con $n \sim 10^4$ a 10^5 miembros a 10^4 pc de distancia, 10^4 Ma pc $^{-3}$,

donde η es la densidad numérica estelar [es decir, el número de estrellas por unidad de volumen] y T es el tiempo de residencia del Sol en el cúmulo ".

Evolución

adicional

Las primeras teorías sobre la formación del Sistema Solar suponían que los planetas se formaron en las proximidades de donde orbitan actualmente. Este punto de vista cambió radicalmente a finales del siglo XX y principios del XXI. Actualmente, se cree que el Sistema Solar era muy diferente después de su formación inicial de lo que es hoy: varios objetos al menos tan masivos como Mercurio estaban presentes en el Sistema Solar interior, la parte exterior del sistema era mucho más compacta de lo que es ahora, y el Cinturón de Kuiper estaba mucho más cerca del Sol.

A principios del siglo XXI, es comúnmente aceptado dentro de la comunidad científica que los impactos de meteoritos ocurrieron regularmente, pero relativamente raramente, durante el desarrollo y evolución del Sistema Solar. La formación de la Luna, como la del sistema Plutón-Caronte, es el resultado de una colisión de objetos del Cinturón de Kuiper. Otras lunas cercanas a asteroides y otros objetos del

Cinturón de Kuiper también serían producto de colisiones. Tales choques continúan ocurriendo, como lo ilustra la colisión del cometa shoemaker-Levy con Júpiter en julio de 1994, o el evento de Tunguska el 30 de junio de 1908.

Planetas terrestres

Al final de la época en que se formaron los planetas, el Sistema Solar estaba poblado por entre 50 y 100 lunas, algunas de las cuales eran comparables en tamaño al del protoplaneta que formaría Marte. La continuación de su crecimiento fue posible solo porque estos organismos colisionaron y se fusionaron entre sí, bajo el efecto de la gravitación, durante otros 100 millones de años. Una de estas colisiones gigantes probablemente esté en el origen de la formación de la Luna, mientras que otra habría eliminado la capa exterior del joven Mercurio. Este modelo no puede explicar cómo las órbitas iniciales de los protoplanetas terrestres, que habrían tenido que ser muy excéntricas para poder colisionar, produjeron las órbitas cuasi circulares notablemente estables que tienen los planetas terrestres en la