

La vida de las estrellas y los planetas.

Juan Fabregat.

Introducción

La vida es el fenómeno más fascinante del Universo. Pero el Cosmos no siempre ha tenido vida. La vida precisa de elementos que no existen desde el principio del Universo. Tal y como la conocemos, la vida se basa en la química del Carbono. Precisa del agua líquida, que está formada por Hidrógeno y Oxígeno. Precisa de un planeta rocoso, formado por Hierro, Níquel y Silicatos. Ninguno de estos elementos existían en el Universo primitivo, originado en una gran explosión en la que sólo se formaron el Hidrógeno y el Helio.

La aparición de la vida es una fase reciente de la historia del Universo. Comienza con el nacimiento de las primeras estrellas, que crean los elementos químicos necesarios para la vida y enriquecen el espacio lanzándolos al exterior en las grandes explosiones que marcan su muerte. La muerte explosiva de una estrella desencadena el nacimiento de otras muchas, en un ambiente ya rico en elementos pesados. Alrededor de las nuevas estrellas se formarán planetas, algunos gigantes como Júpiter, otros pequeños y rocosos como la Tierra. En estos últimos aparecerá la vida.

Somos hijos de las estrellas. El material que compone nuestros cuerpos, el Carbono, el Oxígeno, el Hierro, el Calcio, han sido formados por las estrellas. Probablemente por una sola estrella, que explotó hace más de cinco mil millones de años en nuestro rincón de la Galaxia, y que desencadenó la formación del Sol, de la Tierra y de nosotros mismos.

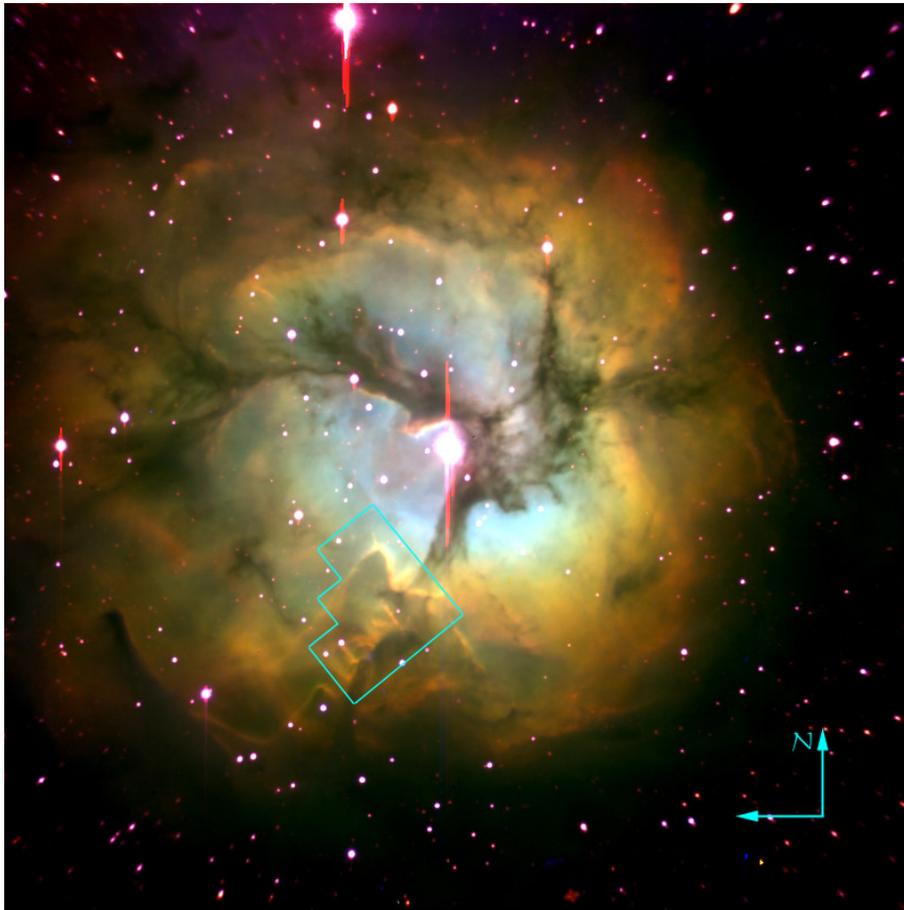
Formación estelar

Cuando miramos al cielo nocturno lo vemos siempre igual, inmutable. Sólo algunos cambios lo alteran, como el movimiento de la Luna y de los planetas, o la aparición esporádica de estrellas fugaces, y en casos excepcionales de algún gran cometa. Pero las estrellas siempre son las mismas. Fijas en su posición, delinean las figuras de las constelaciones.

Sin embargo, el cielo no ha sido siempre igual. Las estrellas no son siempre las mismas. En el intervalo de tiempo de la vida humana apenas podemos apreciar cambios, pero en escalas temporales mucho más largas las estrellas siguen un proceso vital, lo que llamamos la evolución estelar. Las estrellas nacen en gigantescas nubes de gas que pueblan las galaxias jóvenes. Tienen una vida más o menos violenta según su masa, que determina también su muerte. Las estrellas pequeñas se apagan plácidamente, mientras que las más grandes finalizan su existencia a través de una explosión devastadora, pero que puede desencadenar el nacimiento de nuevas estrellas en su entorno.

Las estrellas nacen en el seno de nubes de gas muy extensa, las nebulosas galácticas, compuestas principalmente de Hidrógeno molecular y Helio. Estas nubes son muy abundantes en las galaxias jóvenes como la nuestra, y se distribuyen a lo largo de sus

brazos espirales. En nuestra galaxia tenemos muchos ejemplos de grandes nebulosas en las cuales están naciendo estrellas, como por ejemplo la nebulosa de Orión o la nebulosa Trífida en Sagitario.



Nebulosa Trífida, en Sagitario

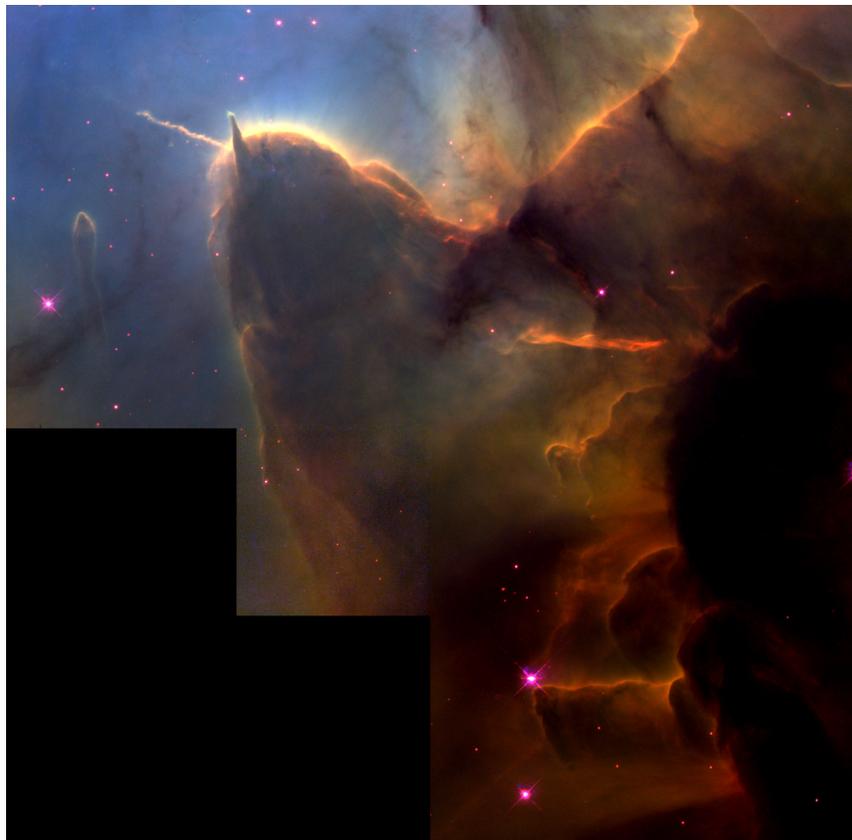
Los procesos que conducen a la formación de estrellas se inician cuando una parte de la nebulosa gaseosa empieza a contraerse, a colapsar. Esto puede deberse a varias causas. La nebulosa en principio es estable, está en equilibrio, no tendrían porqué aparecer cambios en ella. Sin embargo ese equilibrio no es estable. La nebulosa, como las estrellas, gira alrededor del centro de la Galaxia. Como es muy extensa, las partes más cercanas al centro galáctico tienden a girar más deprisa, y las alejadas más despacio. Esto estira y desgarran la nube. La ocurrencia en ella de explosiones de estrellas formadas con anterioridad también producen choques y empujes que comprimen el gas de la nube y facilitan el comienzo de un colapso.

En principio nos puede parecer extraño que una nube de gas se contraiga y colapse. Nuestra experiencia con gases en los laboratorios terrestres parece indicar que lo que ocurre es lo contrario: los gases libres tienden a expandirse, por efecto de su presión interna. En el espacio la situación es distinta. La densidad de las nebulosas es tan baja que en la Tierra podría considerarse que constituyen un vacío de laboratorio casi perfecto. En efecto, la

densidad típica de una nube molecular galáctica es de un millón de átomos por centímetro cúbico. Un gas a presión atmosférica tiene más de un millón de billones (10^{18}) de átomos, es más de un billón de veces más denso. Con una densidad tan baja, la atracción gravitatoria entre átomos y moléculas, que hace que la nube tienda a contraerse, es comparable a la presión térmica producida por el movimiento de esas partículas, que hace que tienda a expandirse.

El hecho de que una nube de gas en el espacio se contraiga o se expanda vendrá determinado por la relación entre esas dos fuerzas. En las condiciones típicas de una de las nebulosas gigantes de nuestra Galaxia, es necesario que un volumen de gas tenga una masa 30.000 veces superior a la masa del Sol para empezar a contraerse. Si la masa es más pequeña, la nube se expandirá. Este cálculo nos indica como comienzan la formación estelar: las estrellas no nace solas, sino en grandes grupos, que se denominan cúmulos estelares. El proceso de formación estelar se inicia a partir de una nube muy grande, y tiene como resultado la formación simultáneo de miles de estrellas.

Una vez esta nube comienza a contraerse, su densidad aumenta. Al ser más densa la gravedad actúa con más fuerza, y entonces no es necesaria una masa tan grande para que prosiga el colapso. La nube se rompe, se va fragmentando, y cada uno de esos fragmentos sigue contrayéndose a su vez, haciéndose más denso y fragmentándose de nuevo. Al final, de lo que empezó como la contracción de una nube gigantesca nos queda miles de pequeños fragmentos de masa estelar, siguiendo un colapso individual que llevará a cada uno de ellos a convertirse en una estrella.

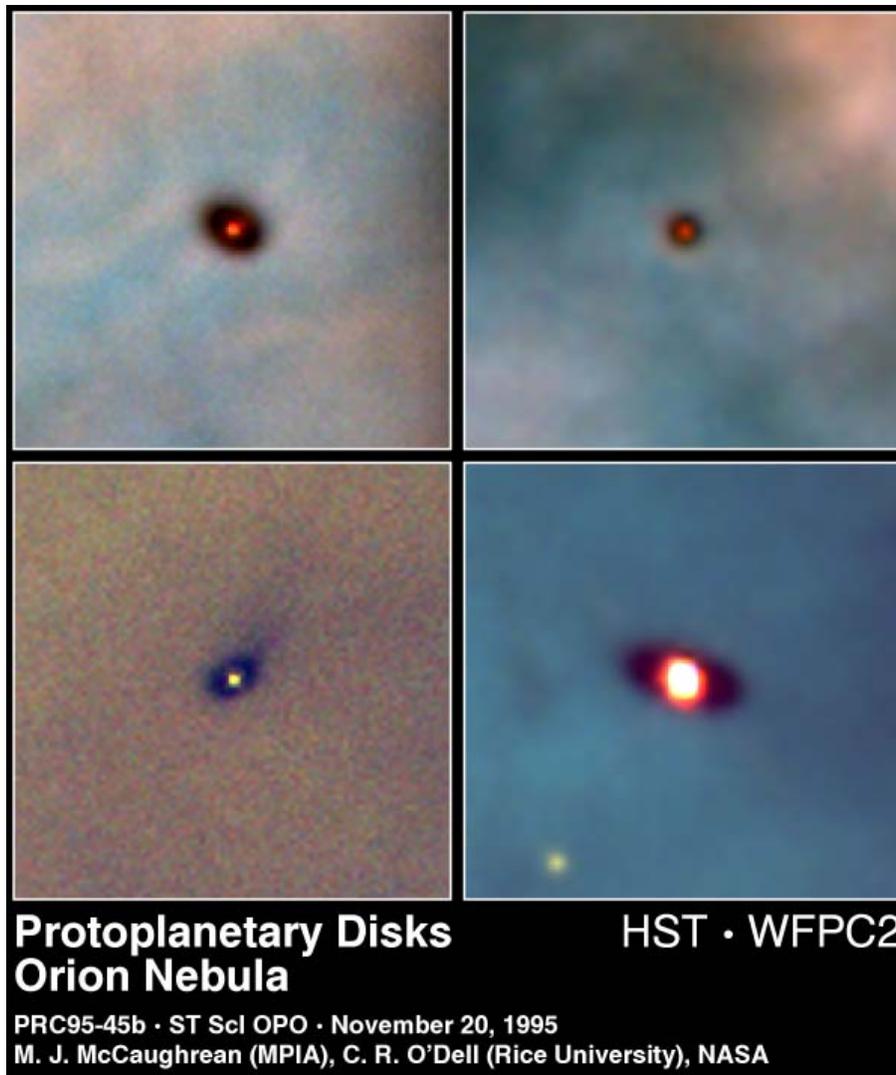


Nebulosa Trífida (detalle)

Podemos seguir este proceso de contracción y fragmentación en las imágenes de la nebulosa Trífida obtenidas por el telescopio espacial Hubble. Por todas partes vemos pequeños grumos de materia, pequeñas nubecitas que se desgajan del cuerpo central de la nebulosa y siguen una evolución aislada que les llevará a convertirse en una estrella. Al final del proceso tenemos pequeñas nubes oscuras, muy densas, opacas, que no dejan pasar la luz de la nebulosa brillante sobre la que destacan. Son ya tan densas que tampoco dejan escapar la radiación que se produce en su interior, y por tanto empiezan a calentarse. Sabemos que todo gas que se contrae se calienta. Al principio del colapso, la nube era muy poco densa y prácticamente transparente, de forma que el calor producido por la contracción salía de la nube, se emitía al espacio en forma de radiación. Por eso la nube prácticamente no aumentaba su temperatura. Al progresar el colapso la nube se hace densa, y el calor ya no escapa, se queda en su interior en forma de energía interna. Por tanto la nube se hace cada vez más caliente. Su temperatura se eleva hasta varios miles de grados, con lo que se convierte en una nube brillante, como las que vemos en el interior de la nebulosa de Orión.

Al calentarse la nube, el colapso se hace más lento. Cuando la nube era fría nada podía oponerse a la gravedad, que cada vez era más intensa al aumentar la densidad de la nube. Ahora el colapso produce un aumento de la temperatura, que a su vez hace que la presión térmica aumente, oponiéndose a la gravedad. ¿Podría la presión térmica detener completamente el colapso? Supongamos que es así, que la presión térmica iguala a la gravedad, y el colapso se detiene. Al no haber colapso no hay más aporte de energía, la temperatura no sube. Por otra parte, la nube caliente es brillante, está emitiendo radiación electromagnética, y por tanto está perdiendo energía. En consecuencia la nube se enfría, con lo que disminuye la presión térmica, que ya no es capaz de detener a la gravedad. El colapso volvería a empezar.

Vemos por tanto que si la única fuente de energía es la contracción del gas, el colapso nunca se detendrá. Ahora bien, la energía producida por la contracción hace que el colapso progrese muy lentamente. Esta fase final del colapso puede durar millones de años. La nube ya ha adoptado forma esférica, su aspecto es muy parecido al de una estrella. Ya no es una nebulosa, pero todavía no es una estrella: se le denomina protoestrella. En efecto, en la fotografías del telescopio Hubble vemos como las protoestrellas tienen un aspecto puntual, observacionalmente es muy difícil distinguirlas de las estrellas. Si que tienen sin embargo una característica diferenciadora: muchas de ellas aparecen rodeadas de un disco oscuro de materia, formado por gas y por polvo. Es un residuo del colapso de la nube, y en algunos casos es tan denso que oscurece la protoestrella central. Recibe el nombre de disco protoplanetario, lo cual nos indica que es en el seno de ese disco donde se formará el sistema planetario que acompañará a la joven estrella una vez se complete su formación.



Discos protoplanetarios en la Nebulosa de Orión

Ha nacido una estrella.

¿Cuándo se detiene el colapso de la protoestrella? A medida que la contracción progresa la temperatura sigue aumentando, aunque como hemos visto este hecho por sí mismo no puede detener el colapso. Por tanto este continúa, y la temperatura sube más y más. Llega un momento en que la temperatura en el centro de la protoestrella alcanza un valor próximo a los diez millones de grados. En este momento aparece una nueva e inmensa fuente de energía en su interior: se inician las reacciones nucleares.

Las primeras reacciones nucleares son las que convierten el Hidrógeno en Helio. En ellas, cuatro núcleos de Hidrógeno (protones) se convierten en un núcleo de Helio. Esta reacción genera una gran cantidad de energía. La masa del núcleo de Helio resultante es menor que la suma de las masas de los cuatro núcleos incidentes. La masa que falta se ha convertido

en energía, en una cantidad que nos indica la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$.

¿Porqué ha sido necesario esperar a que se alcance una temperatura tan elevada? Recordemos que en el interior de la protoestrella, a temperaturas de miles o millones de grados, la materia está en estado de plasma. Es un estado similar al de gas, pero formado por partículas cargadas. No hay átomos ni moléculas, sino electrones libres y protones y núcleos desnudos también libres. La reacción nuclear tiene lugar cuando los protones se unen, debido a una fuerza denominada nuclear fuerte. Esta fuerza es mucho más intensa que la fuerza electrostática, pero sólo actúa a distancias muy cortas, los protones deben acercarse mucho para sentirla. Normalmente, los protones no pueden acercarse mucho. Son partículas con carga eléctrica positiva, y por tanto la fuerza electrostática hace que se repelan.

Si un protón se aproxima a otro, la repulsión electrostática hará que el acercamiento se detenga, y una vez detenido los protones se repelarán. Si se acercan a mayor velocidad, se aproximarán un poco más, pero finalmente se detendrán y separarán. Ahora bien, cuanto mayor es la temperatura, mayor es la velocidad de agitación de las partículas, estas se mueven más deprisa. A diez millones de grados, la velocidad de los protones es tan alta que llegan a acercarse lo suficiente para sentir la fuerza nuclear fuerte, y vencer así la repulsión electrostática. Una vez actúa esta fuerza, los protones se unen, y tiene lugar la reacción nuclear.

Una vez comienzan, las reacciones nucleares se generalizan por todo el núcleo de la protoestrella. Ésta ha encontrado una fuente de energía estable, capaz de oponerse a la gravedad. Por lo tanto el colapso se detiene. Cuando esto sucede, nuestro astro ya no es una protoestrella: acaba de nacer una estrella. La diferencia entre protoestrella y estrella, aunque su aspecto exterior sea similar, es que la primera obtiene su energía del colapso gravitatorio, y la segunda de las reacciones nucleares.

Las reacciones nucleares producen energía de forma estable y regular, que mantiene la temperatura de la estrella. La presión térmica y la presión de la radiación se igualan a la fuerza de la gravedad, estableciendo un equilibrio que determina el tamaño de la estrella, y que se mantiene casi sin cambios durante el 90% de su vida.

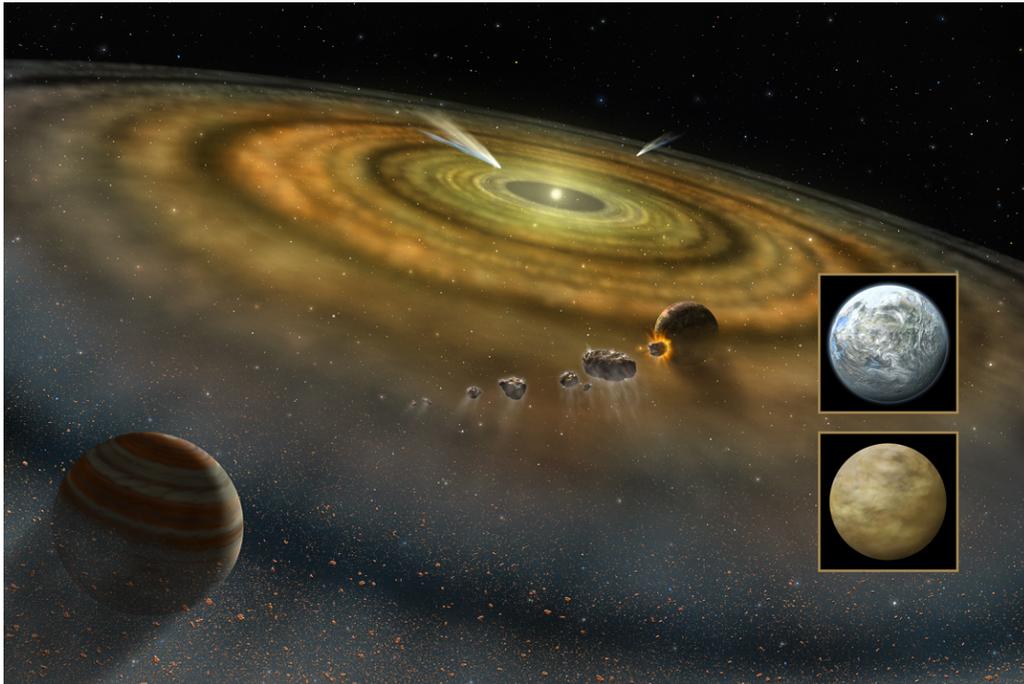
El límite subestelar: las enanas marrones.

No todas las protoestrellas siguen el camino que hemos descrito para convertirse en estrella. Algunas de ellas, las más pequeñas, nunca alcanzarán en su interior la temperatura necesaria para que se desencadenen las reacciones nucleares. Estos astros serán protoestrellas toda su vida. En su juventud, mientras obtienen energía partir del colapso gravitatorio serán astros calientes y brillantes. Posteriormente, cuando su materia ya no se pueda seguir comprimiendo el colapso se detendrá, y la protoestrella se irá enfriando y apagando progresivamente. A estos astros que nunca serán estrellas se les denomina enanas marrones. Esta denominación, que no es muy acertada, tiene que ver con su baja temperatura. Las estrellas más pequeñas y frías son de color rojo. Las enanas marrones son de un rojizo oscuro, apagado, casi marrón.

El parámetro que determina que una protoestrella pueda alcanzar la temperatura suficiente para convertirse en estrella es su masa. El valor crítico de la masa para que esto suceda es 0,075 veces la masa del Sol. O lo que es lo mismo, 75 veces la masa de Júpiter, ya que se da el hecho afortunado de que la masa de Júpiter es una milésima de la masa solar. A este valor se le llama el límite subestelar. Una protoestrella con una masa superior al límite subestelar iniciará sus reacciones nucleares, y se convertirá en una estrella. Una protoestrella con una masa inferior no podrá iniciarlas, será siempre una protoestrella, una enana marrón.

La formación de los planetas.

Casi toda la materia de la nube que se contrae para convertirse en una estrella acabará dentro de la propia estrella. Sin embargo, una pequeña fracción escapará al colapso y quedará girando alrededor de la estrella, formando lo que se denomina un disco protoplanetario. El material que compone el disco es principalmente Hidrógeno molecular y Helio, que son los elementos más abundantes del Universo. Si el proceso de formación está teniendo lugar en una galaxia algo evolucionada como la nuestra, en ese disco hay también Carbono y Oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono, Silicio, Hierro, Níquel, y muchos otros elementos en cantidades menores. También hay granos de polvo, de diversos tamaños, compuesto principalmente por silicatos.



Proceso de formación de planetas

Las moléculas y los granos de polvo giran todos alrededor de la estrella central. En ese movimiento orbital se producen interacciones y choques. Las colisiones tienen lugar a velocidad relativa muy baja, de forma que al chocar los granos se van uniendo, se produce

un fenómeno de agregación que lleva a la formación de aglomerados cada vez más grandes. Al final del proceso, todo el material que contenía el disco protoplanetario se ha unido para formar unos cuantos cuerpos muy grandes orbitando alrededor de la estrella. Son los planetas.

El proceso de formación de un planeta es diferente según tenga lugar cerca o lejos de su estrella central. Uno de los componentes más abundantes del disco protoplanetario es el vapor de agua. Si se encuentra lejos de la estrella, el agua puede formar cristallitos de hielo, que también pueden unirse entre sí y con los granos de polvo, facilitando los procesos de agregación y permitiendo la formación de planetas más grandes. Cerca de la estrella el agua no forma hielo, y por tanto sólo el polvo y los silicatos participan en los procesos de agregación que conducirán a la formación de planetas rocosos más pequeños.

Nuestro sistema planetario es un ejemplo de este mecanismo de formación. La distancia de nuestro Sol a la cual los cristales de hielo pueden sobrevivir es de cinco unidades astronómicas. La unidad astronómica es la distancia media de la Tierra al Sol, y equivale a 150 millones de kilómetros. A una distancia menor de esas cinco unidades astronómicas encontramos los cuatro planetas pequeños y rocosos: Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Estos planetas están compuestos principalmente por Hierro, Níquel y Silicatos, tienen una superficie sólida y, con la excepción de Mercurio, una pequeña atmósfera gaseosa.

Más allá de cinco unidades astronómicas encontramos los planetas gigantes gaseosos: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. En el lugar donde se formaron los cristales de hielo contribuyeron al crecimiento del protoplaneta. Al ser éste muy masivo, su fuerza de gravedad permitió retener también el Hidrógeno y el Helio, que pasaron a formar parte del planeta. De esta forma, los planetas exteriores son gigantescas bolas de gas, sin superficie sólida, ricas en Hidrógeno y Helio, con un núcleo rocoso.

Los planetas extrasolares.

Hoy sabemos que nuestro sistema solar no es un caso único en el Universo. En los últimos veinte años se ha descubierto más de mil planetas orbitando alrededor de otras estrellas. Se les denomina planetas extrasolares. La mayoría son gigantes gaseosos, como Júpiter. Pero esto es un efecto de selección: los planetas gigantes son mucho más fáciles de detectar que los planetas pequeños como la Tierra. Aún así, ya se ha descubierto varios planetas cuyas masas son inferiores a cinco veces la masa de la Tierra, e incluso muy recientemente uno de tamaño similar al de Mercurio. Esto es una buena noticia de cara a la búsqueda de vida fuera del Sistema Solar.

La mayoría de los planetas extrasolares descubiertos giran a muy poca distancia de su estrella. Sus periodos orbitales, sus años, no duran más que unos pocos días, algunos menos de dos días. Como en su mayoría son planetas gigantes, su descubrimiento originó una gran confusión. Como ya hemos explicado, un planeta gigante no puede originarse cerca de la estrella, pues requiere para su formación la presencia de hielo en el disco protoplanetario.

Este hecho se explica a través de un proceso denominado migración planetaria. Los

planetas gigantes gaseosos se forman siempre lejos de su estrella. Ahora bien, si en el momento de la formación del planeta el disco todavía es muy denso, todavía contiene mucho gas y polvo residual, el planeta recién formado sufre fenómenos de rozamiento en los que pierde energía orbital. El disco protoplanetario denso frena el movimiento del planeta, lo que hace que éste empiece a caer hacia la estrella siguiendo una trayectoria espiral.

La migración del planeta, su caída en espiral, se detiene cuando el disco protoplanetario queda libre del material residual que produce el rozamiento. Esto sucede en la fase final de la vida de la protoestrella. Cuando tienen lugar los procesos de formación de planetas, el objeto central del sistema todavía no es una estrella, es una protoestrella al final de su evolución que la llevará a convertirse en estrella. La fase final de la vida de las protoestrellas es muy violenta. Su estructura está todavía estabilizándose, y tiene lugar fenómenos muy energéticos de emisión de partículas a gran velocidad, lo que se denomina viento estelar. Cuando se llega a esta fase, el intenso viento estelar barre los restos del disco protoplanetario, los empuja a las profundidades del espacio. En el entrono de la protoestrella quedan sólo los planetas ya formados, que al ver su medio interplanetario libre y limpio dejan de caer en espiral y se estabilizan en sus órbitas definitivas.

Por tanto, la posición que finalmente ocupa un planeta depende de la diferencia de tiempo entre su formación y el barrido de los restos del disco protoplanetario. Si este barrido se produce inmediatamente después de la formación del planeta, este se queda en su órbita original. Esto es lo que se cree que ha sucedido en el sistema solar, donde los planetas están en lugares adecuados para los procesos de formación que los originaron. Si el barrido ocurre mucho más tarde que la formación del planeta, este ha tenido tiempo de acercarse a la estrella, y su órbita final estará a una distancia muy corta de la misma. Se conocen casos en que, al no producirse la limpieza del medio interplanetario a tiempo, los planetas han acabado cayendo y siendo engullidos por la estrella.

5.- La evolución estelar.

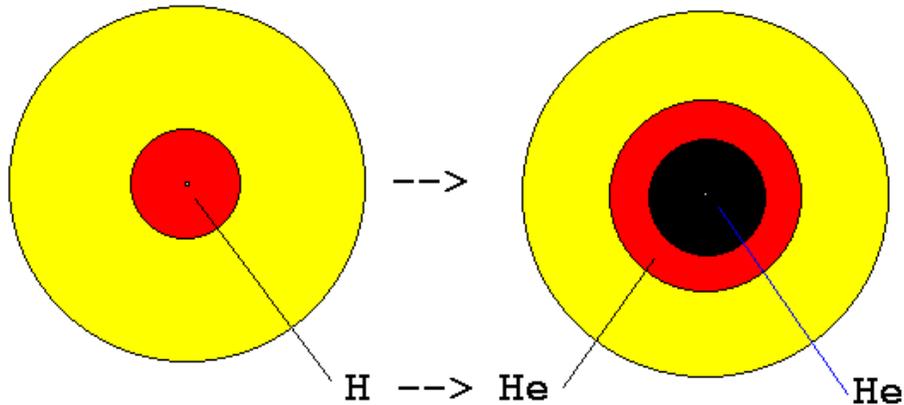
La estrella recién nacida tiene una estructura muy simple. En su parte central se encuentra el núcleo, donde tienen lugar las reacciones nucleares, y donde se genera toda la energía que mantiene a la estrella estable. Fuera del núcleo se halla la zona inerte, en la cual no hay producción de energía. La energía generada en el núcleo mantiene caliente toda la estrella, propagándose desde el núcleo hasta la superficie atravesando toda la zona inerte.

Esta estructura se mantiene durante el 90% de la vida de la estrella. Es una fase muy estable, apacible, donde apenas ocurren cambios. La emisión de energía es continua y constante, lo cual supone un importante beneficio para los hipotéticos planetas habitados que la estrella tenga a su alrededor. El Sol se encuentra actualmente en esta fase, lleva en ella cinco mil millones de años y le quedan otros tantos antes de que fenómenos catastróficos marquen el principio del fin de su vida.

Cuando la estrella se acerca a su final, importantes cambios empiezan a ocurrir. Durante toda su vida la estrella ha producido energía convirtiendo Hidrógeno en Helio. Esto ha

cambiado su composición: en su núcleo cada vez hay más Helio. El Hidrógeno, el combustible nuclear, empieza a escasear. El Helio pesa más que el Hidrógeno, y por tanto cae hacia el centro de la estrella. La estructura de la estrella ha cambiado. En su centro hay ahora un núcleo de Helio inerte, en el que no se producen reacciones nucleares. A su alrededor se encuentra la región de producción de energía, mediante las reacciones nucleares de Hidrógeno a Helio. Fuera está la zona inerte.

El núcleo de Helio inerte no tiene ninguna fuente de energía. Y la gravedad sigue actuando, como siempre. Al núcleo de Helio le sucede lo mismo que a la protoestrella del inicio de nuestra historia: empieza a contraerse. Al hacerlo, se hace más denso y más caliente. La gravedad aumenta, y como consecuencia la capa de producción de energía también se hace más densa y caliente. Las reacciones nucleares empiezan a producirse a un ritmo más vivo, más deprisa. La producción de energía de la estrella aumenta, y en consecuencia aumenta la presión térmica y la presión de radiación, que ganan la partida a la gravedad.



Estructura de una estrella joven, y desarrollo del núcleo de Helio

Como consecuencia, a la contracción del núcleo de Helio le sigue una expansión de la estrella. Se hace mucho más grande, y por tanto sus capas exteriores quedan muy lejos del núcleo, se enfrían y la estrella se enrojece. Se ha convertido en una estrella gigante roja. Cuando al Sol le suceda esto, en su expansión engullirá los planetas Mercurio y Venus, y abrasará y fundirá la Tierra. Esto marcará el final de la vida en nuestro planeta. Si nuestra raza humana ha podido pervivir hasta entonces, habrá tenido que preocuparse de emigrar a otros mundos alrededor de estrellas más jóvenes y propicias.

En algunas estrellas, la expansión es tan grande que las capas más exteriores de la estrella se pierden en el espacio, formando estructuras en forma de anillo que llamamos nebulosas planetarias. En su interior queda el núcleo desnudo, formado por el Helio inerte y la capa de producción de energía. El Sol es una de estas estrellas, en el futuro creará una nebulosa planetaria mucho mayor que nuestro Sistema Solar actual.

¿Y qué sucede después? El núcleo de Helio inerte va creciendo más y más, la capa de producción de energía se ve empujada hacia zonas cada vez más externas, más frías. El Hidrógeno sigue escaseando. Llega un momento en que las reacciones nucleares se detienen. La estrella se apaga. Al quedarse sin fuente de energía la presión térmica y la presión de radiación se debilitan, y al final siempre es la gravedad la que vence la batalla. La estrella se contrae, y esta vez no aparecerán más fuerzas que detengan el colapso. El colapso continúa hasta que la materia no se puede comprimir más. Llega un momento en que los electrones del plasma no se pueden juntar más unos con otros.



Nebulosa planetaria

Es entonces cuando el colapso se detiene. La estrella ha reducido muchísimo su volumen, una estrella como el Sol ha quedado reducida al tamaño de la Tierra. Por tanto su densidad es tremenda, un centímetro cúbico pesa toneladas. A lo que queda después del colapso se le denomina enana blanca. Enana por su pequeño tamaño, y blanca porque nada más detenerse el colapso está muy caliente, es brillante. Con el tiempo se irá enfriando, apagando, y se convertirá en una enana negra.

Pero no todas las estrellas acaban así su vida. Las estrellas muy masivas, con masas superiores a dos o tres veces la del Sol, tienen un final más largo y complejo. Durante la contracción de su núcleo de Helio, este llega a alcanzar temperaturas superiores a los cien

millones de grados en su centro. A esa temperatura se inician nuevas cadenas de reacciones nucleares. Los núcleos de Helio se unen para dar lugar a elementos más pesados. Tres núcleos de Helio originan uno de Carbono, y cuatro uno Oxígeno. De nuevo hay una pérdida de masa que se convierte en energía. Las reacciones se extienden, la presión se equilibra con la gravedad, y el núcleo de Helio inerte detiene su colapso.

La estrella encuentra una segunda juventud. Pero ahora su estructura es mucho más compleja. Tiene dos zonas de producción de energía: el centro donde el Helio se convierte en Carbono y Oxígeno y la capa de combustión del Hidrógeno en Helio. Entre ambas está la zona de Helio inerte, y fuera la zona exterior también inerte. El ritmo de producción de energía es muy grande, aumenta la presión y la estrella se expande aún más: se convierte en una estrella supergigante roja.

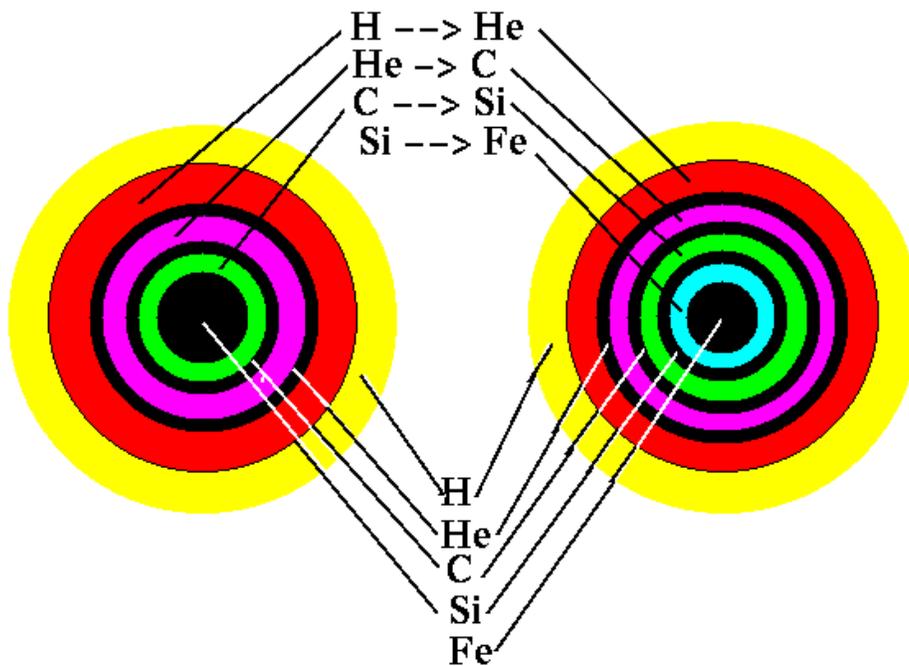
Pero la nueva fuente de energía también termina por agotarse. En el centro de la estrella ha crecido un núcleo de Carbono y Oxígeno inertes, mientras que Helio e Hidrógeno comienzan a escasear. El núcleo inerte va creciendo, empuja las zonas de combustión nuclear hacia el exterior de la estrella, que finalmente se apaga. De nuevo la gravedad marca el camino inexorable del colapso que convertirá nuestra estrella moribunda en una enana blanca.

Sin embargo, todavía queda una posibilidad para escapar a este destino. En las estrellas más masivas, de más de ocho masas solares esta vez, la temperatura del núcleo inerte de Carbono y Oxígeno se eleva tanto que nuevas reacciones nucleares aparecen en escena. A partir de Carbono y Oxígeno se crea Silicio. La estructura de la estrella se complica. Además, la temperatura y la presión son tan grandes que las reacciones van muy deprisa. A la estrella le quedan ya pocos días de vida.

Dentro del núcleo de Silicio inerte nuevas reacciones producen Hierro. Un elemento más para una estructura de muchas capas, que recuerdan a las de una cebolla. El núcleo de Hierro inerte se desarrolla rápidamente. Y aquí el lector ya espera que dentro de ese núcleo se produzca una nueva reacción nuclear, y luego otra y otra, y así hasta el infinito. Pero no es así. La producción de Hierro es el último eslabón de toda la cadena de reacciones.

El Hierro es el elemento que contiene menos energía. Si dividimos la masa total de un núcleo atómico por el número de protones y neutrones que lo forman, el valor mínimo corresponde al Hierro. Esto quiere decir que en ninguna reacción nuclear a partir del Hierro se producirá energía. Al contrario, si por algún mecanismo conseguimos que el Hierro reaccione, esa reacción será endotérmica, es decir, consumirá energía en lugar de producirla.

Por tanto el núcleo de Hierro crece sin freno, hasta ocupar una gran parte de la estrella. Como no tiene ninguna fuente de energía colapsa, y su temperatura crece desmesuradamente sin que aparezca ninguna reacción que pueda oponerse al tremendo empuje de la gravedad. Cuando la temperatura alcanza el billón de grados, aparece un nuevo y colosal fenómeno que en pocos segundos rompe por completo la estrella. Se llama fotodisociación del Hierro.



Estructura de una estrella masiva en las fases finales de su vida

Sabemos que los objetos calientes emiten radiación electromagnética. Cuanto mayor es la temperatura, más energética es la radiación. Nuestros cuerpos emiten en el infrarrojo. Los filamentos incandescentes de las bombillas eléctricas, al igual que la superficie del Sol, emiten luz visible. La corona del Sol, a un millón de grados, emite rayos X. El núcleo de Hierro de una estrella a un billón de grados emite rayos gamma de una energía devastadora. Tan grande que un sólo fotón es capaz de romper un núcleo atómico de Hierro al colisionar con él. Y esto es lo que sucede. A esa temperatura extrema, la radiación térmica rompe los núcleos de Hierro, y convierte cada uno de ellos en 13 núcleos de Helio. Como hemos visto, esa reacción no produce energía, la absorbe.

El núcleo de Hierro extremadamente caliente, que con su presión térmica y de radiación mantenía la estructura de la estrella, desaparece súbitamente. Es sustituido por un núcleo de Helio frío, sin propiedades estructurales, que no es capaz de compensar la gravedad. La estrella colapsa, se desploma sobre si misma en una rápida implosión. Las capas exteriores, en caída libre, se derrumban sobre el interior de la estrella. En su centro, la caída de materia produce una presión tan enorme que ni siquiera la repulsión entre los electrones es capaz de soportar. Los electrones son empujados contra los protones, formando neutrones. Se forma un núcleo de neutrones gigantesco y extremadamente denso. Se le llama estrella de neutrones.

La estrella de neutrones recién creada en el interior de la estrella que colapsa es un astro extraordinario. Está formado por un gas de neutrones tremendamente denso. Su masa es una vez y media la masa del Sol, y su radio sólo diez kilómetros. !Toda la masa del Sol en

el tamaño de una ciudad! Es como si fuera un núcleo de un átomo, pero desmesuradamente gigantesco.

La materia sigue cayendo sobre la estrella de neutrones que se acaba de formar. Como ésta es tan densa y rígida, la materia que cae rebota sobre su superficie, y sale despedida en dirección contraria. Es como una onda de choque que empuja hacia fuera toda la materia que seguía cayendo. La implosión se convierte en una explosión, las capas exteriores de la estrella salen despedidas hacia el espacio. A este fenómeno se le llama explosión de supernova, o simplemente supernova.

Durante la explosión, la supernova brilla tanto como una galaxia entera, como cien mil millones de estrellas juntas. Este brillo se mantiene durante dos o tres meses. En su interior, la colisión entre la onda de choque y la materia en caída eleva tanto la temperatura que se producen reacciones nucleares a un ritmo muy intenso. Las reacciones producen todo tipo de elementos, muchos de ellos radioactivos. Es la emisión de los elementos radioactivos lo que calienta por dentro la supernova en explosión, y mantiene su brillo durante unos pocos meses. Después, la supernova sigue su expansión y toda la materia que hasta entonces formaba la estrella se esparce y se difumina por el espacio. Como residuo de lo que fue una estrella de gran masa sólo queda la pequeña estrella de neutrones.

En ocasiones la onda de choque no es capaz de frenar toda la materia que cae durante la implosión. La materia se acumula sobre la estrella de neutrones, y la desestabiliza. La presión del gas de neutrones sólo puede aguantar el peso de una vez y media la masa del Sol. Si la caída de materia hace que este límite se rebase, los neutrones se rompen, y la estrella de neutrones colapsa. Empieza una contracción que *a priori* es indefinida, porque una vez superada la resistencia del gas de neutrones no conocemos ninguna otra estructura de la naturaleza capaz de frenar a la fuerza de gravedad. El colapso por tanto sería hasta el infinito, pero antes de que podamos ver el final de ese colapso la estrella desaparece de nuestra vista. Se ha convertido en un agujero negro.

Para entender lo que es un agujero negro debemos primero conocer el concepto de velocidad de escape de un astro. En la Tierra, si lanzamos un objeto hacia arriba, este sube, se detiene, y acaba cayendo. Si lo lanzamos con más velocidad sube más alto pero también cae. Si lo lanzásemos sin embargo a una velocidad de once kilómetros por segundo nunca caería, abandonaría la tierra y saldría al espacio. Esa es la velocidad de escape de la Tierra, la velocidad que hay que comunicarle a un cuerpo para que venza el campo gravitatorio y escape al espacio. Cuanto mayor es la fuerza de gravedad, mayor es la velocidad de escape necesaria para abandonar el astro. La velocidad de escape del Sol es de más de seiscientos kilómetros por segundo.

Volvamos a nuestro objeto que esta colapsando más allá de la estructura de estrella de neutrones. Como es tremendamente denso y masivo, su velocidad de escape es mucho más elevada. Y va en aumento a medida que se produce el colapso. Llega un momento en que la velocidad de escape es igual a la velocidad de la luz, trescientos mil kilómetros por segundo. La física relativista nos dice que nada, ningún objeto ni partícula, puede superar la velocidad de la luz. Por tanto nada puede salir del objeto que colapsa. Nada, ni siquiera la

propia luz. Es como si el astro hubiese desaparecido. Pero no ha desaparecido del todo, queda su tremenda fuerza de gravedad. Esto es un agujero negro. Es una región del espacio con una gran fuerza de gravedad, y de la cual no puede salir nada. En su interior, el objeto compacto sigue contrayéndose hasta no se sabe donde.

Epílogo: el origen de la vida en el Universo.

En el Universo primitivo sólo había Hidrógeno y Helio. La vida necesita de otros muchos elementos: el Carbono, el Oxígeno, el Calcio, el Silicio, el Hierro.... Por tanto, en el Universo primitivo no podía aparecer la vida.

Hemos visto que muchos de esos elementos son sintetizados en el interior de las estrellas a lo largo de su vida normal, mientras duran las reacciones nucleares que les proporcionan su energía. Pero esos elementos nunca salen al espacio. Cuando la estrella se muere quedan confinados en el interior de la enana blanca, donde las condiciones son tan extremas que no puede darse ningún tipo de vida.

En las explosiones de supernova también se crean elementos. Cuando la onda de choque colisiona con la materia que se desploma se producen reacciones nucleares de todo tipo, se generan prácticamente todos los elementos pesados. Y estos elementos se lanzan al espacio durante la explosión. Cuando los restos de supernova se expanden, se mezclan con la materia que encuentran en su entorno. En particular, contaminan de elementos pesados las nebulosas galácticas, donde tienen lugar los procesos de formación de estrellas.

El origen de la vida en el Universo lo encontramos en las explosiones de supernova. Si en una nebulosa contaminada de elementos pesados se forman nuevas estrellas, sus discos protoplanetarios contendrán Hierro y Silicio para formar planetas rocosos como la Tierra. Contendrán Oxígeno para que en esos planetas haya agua. Y contendrán Carbono para que se creen las moléculas que son la base de la vida.