

## ¿CÓMO NACIÓ EL SOL?

### Formación de estrellas tipo solar

**Mario Tafalla**

*Observatorio Astronómico Nacional (OAN)*

Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Reimpresión de un artículo publicado en la edición de 2002 del Anuario del Observatorio Astronómico publicado anualmente por el Instituto Geográfico Nacional de España.

#### Abstract

Solar-type stars are presently forming in our Galaxy, and by studying their properties we can attempt to reconstruct the process by which our Sun came to life 4.700 billion years ago. The Sun probably started its life as a dense core approximately 0.5 light years in size, which after a long period of stability began to collapse under the force of gravity. This collapse produced a dense, opaque object at the center (a protostar) surrounded by a disk of high angular momentum material. A powerful bipolar outflow probably helped the disk material to lose angular momentum and fall onto the protostar, in addition to disrupt the core and make the central object optically visible as a contracting T Tauri star. After about 30 million years of slow contraction, the central temperature and density reached the high values needed to sustain hydrogen burning, and the T Tauri star became the main sequence star we see every day in the sky.

#### El problema de la formación de estrellas

Una estrella como el Sol produce energía mediante la conversión nuclear de hidrógeno en helio en las zonas más densas y calientes de su interior. En la terminología astronómica, se dice que el Sol se encuentra en la *secuencia principal*, que corresponde a la fase más estable y duradera de la vida de una estrella (el Sol lleva unos 4.700 millones de años en esta fase y le quedan otros tantos para abandonarla). En la secuencia principal, la estructura interna de la estrella es tal que la fuerza de la gravedad es exactamente compensada por la presión interna debida al calor liberado en la combustión nuclear del hidrógeno en el centro. Entender cómo el Sol, o cualquiera de las más de cien mil millones de estrellas que le acompañan en la Vía Láctea, llegó a adquirir las condiciones físicas precisas que permiten tal equilibrio es un problema fundamental de la astronomía contemporánea.

El estudio de las estrellas en la secuencia principal ofrece pocas pistas sobre la forma en que éstas alcanzaron su estado presente. Esto difiere del

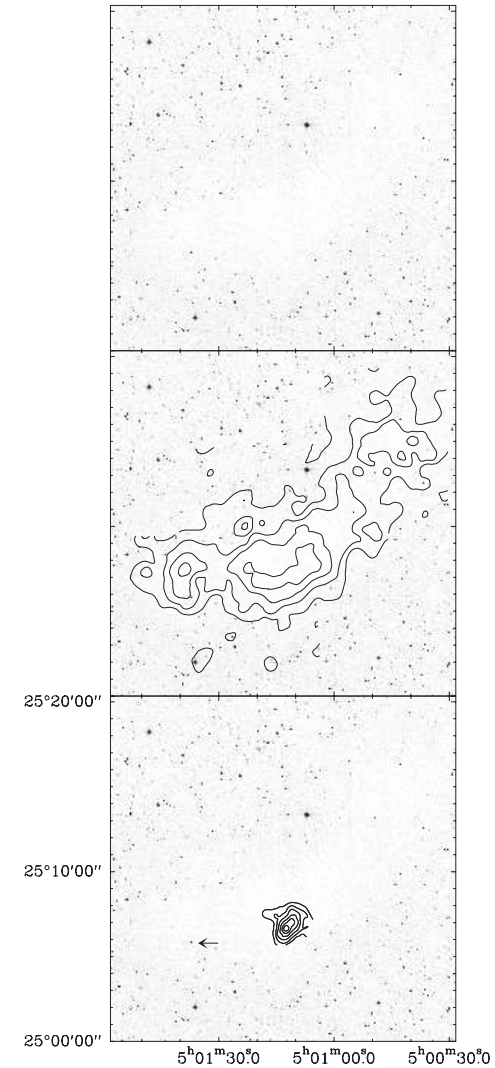
estudio de la evolución posterior (post-secuencia principal), que en parte puede inferirse mediante simulación numérica a partir de las condiciones físicas en la secuencia principal. La diferencia resulta de que algunos de los procesos que acompañan la formación de una estrella borran cualquier memoria de los eventos anteriores, y ello impide reconstruir la historia pasada a partir de la estructura presente. Afortunadamente, el proceso de formación estelar sigue activo en nuestra Galaxia, por lo que existen estrellas que están en este momento pasando por estadios que nuestro Sol recorrió hace casi cinco mil millones de años. El estudio de estas regiones de formación estelar ha aportado durante las últimas décadas una información fundamental para poder reconstruir (todavía parcialmente) los eventos que rodean el nacimiento de una estrella como nuestro Sol.

### Nubes moleculares: cunas de las estrellas

Todas las regiones de formación estelar conocidas se encuentran dentro de nubes moleculares. Éstas son condensaciones más o menos amorfas (que recuerdan a las nubes del cielo) compuestas de gas molecular, en su mayoría hidrógeno, y de pequeñas partículas sólidas llamadas granos de polvo. Las nubes moleculares pueden ser extremadamente opacas dada la facilidad con que los granos de polvo absorben la luz, por lo que las regiones de formación estelar son en su mayor parte invisibles en observaciones ópticas. Esta situación cambia cuando las regiones se observan con detectores sensibles a las ondas infrarrojas y radio (milimétricas), algo técnicamente posible sólo a partir de los años 70. Para estas ondas, el material de la nube es casi o totalmente transparente, lo que permite ver con ellas el proceso de formación estelar en acción (ver Fig. 1).

Figura 1: Tres vistas de la nube molecular formadora de estrellas L1544 en Tauro. El panel superior muestra la imagen óptica roja del Digital Sky Survey (Copyright (c) 1992-8, Caltech and AURA), donde se aprecia un menor número de estrellas a lo largo de la diagonal que conecta el vértice inferior izquierdo con el superior derecho. Esta aparente falta de estrellas resulta de la presencia de una nube molecular, cuyos granos de polvo extinguen la luz de las estrellas situadas tras ella. (Las coordenadas son Ascensión Recta y Declinación época 1950). El panel central muestra los contornos de intensidad de la emisión de la molécula  $C^{18}O$  (2,7 mm de longitud de onda) superpuestos a la imagen óptica. La emisión de  $C^{18}O$  coincide con la zona de extinción, y permite estudiar en detalle la forma de la nube molecular. Ésta es alargada, de unos 2,5 años luz de longitud, y presenta diversos máximos de emisión. Finalmente, el panel inferior muestra los contornos de intensidad del ion molecular  $N_2H^+$ , superpuestos también sobre la imagen óptica.  $N_2H^+$  es muy sensible a la presencia de gas denso, y su emisión concentrada indica

la presencia de un núcleo denso en la zona central de la nube. Este núcleo denso parece estar a punto de colapsar para formar una estrella, o podría haber iniciado ya el proceso colapso. A su izquierda, e indicada con una flecha, se encuentra un estrella tipo T Tauri, resultado de una fase de formación anterior en la nube. (Salvo indicado, datos del autor.)



Si las estrellas se forman en nubes moleculares, el gas y el polvo de estas nubes tiene que constituir la materia prima para formar soles. Observaciones radio indican que las densidades del gas molecular en regiones de formación estelar oscilan en torno a  $10^{-19}$  gramos por centímetro cúbico, y esto da una idea de la enorme complejidad del proceso de formación estelar: el material de una nube debe comprimirse 20 órdenes de magnitud ( $10^{20}$ ) hasta llegar a las densidades típicas de una estrella. En términos de tamaño, si el material inicialmente llena una esfera, el radio de dicha esfera debe disminuir más de un millón de veces hasta llegar al tamaño de una estrella.

La variedad de procesos físicos que pueden entrar en juego en la formación de una estrella es muy grande, pues cualquier parámetro proporcional a la densidad (por ejemplo) puede magnificarse por un factor  $10^{20}$ . Hay un elemento, sin embargo, que domina a todas las escalas espaciales, y que en última instancia es el máximo responsable de la formación estelar: la inexorable fuerza de la gravedad. La vida de una estrella, desde su formación a su muerte, es en gran medida la lucha de la materia para vencer la siempre atractiva fuerza de la gravedad. A lo largo del camino existen victorias parciales, como el largo periodo de estabilidad que representa la secuencia principal, donde la gravedad es compensada por la combustión de hidrógeno. Sin embargo, uno a uno, los combustibles nucleares disponibles se agotan, y la fuerza de la gravedad vuelve siempre a recuperar su ventaja. Sólo como enana blanca o como estrella de neutrones, la materia consigue controlar la gravedad, pero pagando el alto precio de formar un objeto inerte que poco a poco se va enfriando para desaparecer en la oscuridad. La gravedad es por tanto el motor de la vida y la muerte de las estrellas. En el proceso de formación estelar, es el motor de la vida, pues convierte el oscuro material molecular en un objeto luminoso y visible. En la evolución posterior, es el implacable motor de su muerte.

### Formación estelar aislada y en cúmulos

El estudio sistemático de regiones de formación estelar revela que no todas las estrellas nacen en las mismas condiciones ambientales. En la Nebulosa de Orión, por ejemplo, más de 3.500 estrellas han nacido recientemente (1 millón de años) formando una agrupación tan compacta (cúmulo) que las 100 estrellas centrales ocupan el volumen de una esfera con radio tan sólo de 0,35 años luz (al). En la región de  $\rho$  Ophiuchi, hace falta una esfera de casi 2 al de radio para contener ese mismo número de estrellas recién nacidas, y en la nube molecular de Tauro la densidad es tan baja que el radio de una tal esfera debe ser de casi 15 al. Como el volumen de una esfera crece como el radio al cubo, la densidad de estrellas jóvenes en Orión es más de 100 veces mayor que en  $\rho$  Ophiuchi, y unas 100.000 veces mayor que en Tauro. El origen de esta diferencia en densidades estelares no se conoce todavía, aunque se cree que resulta de

distintas condiciones en el gas molecular (temperatura, turbulencia, campo magnético).

Una diferencia entre las regiones de formación estelar compacta y las de formación aislada, es que sólo las primeras son capaces de formar estrellas masivas. Estrellas 10 veces más masivas que el Sol, por ejemplo, sólo nacen en cúmulos densos como el de Orión, mientras que estrellas de una masa solar parecen formarse en todo tipo de entornos. Esta ubicuidad de las estrellas como el Sol plantea la pregunta de si nuestro astro nació en un medio tan denso como el cúmulo de Orión o si empezó su vida aisladamente, como lo han hecho las estrellas de la nube molecular de Tauro. Desgraciadamente todavía no somos capaces de inferir las características precisas del entorno del proto Sol, y para simplificar la presentación de este artículo, nos concentraremos a partir de ahora en la formación de estrellas de forma aislada.

### Núcleos densos

Si el Sol nació de forma aislada, su historia empezó con un núcleo denso de unos 0,5 al de diámetro aproximadamente, parecido a los que actualmente se observan en Tauro o Camaleón (Figura 1). Estos núcleos densos son condensaciones discretas dentro de nubes moleculares mucho mayores, las cuales pueden extenderse por decenas de años luz y contener decenas o centenares de miles de veces la masa de nuestro Sol. Los núcleos densos son objetos extremadamente fríos (unos 10 grados por encima del cero absoluto), y la densidad en su interior suele aumentar hacia el centro, indicando que la gravedad ha empezado a jugar un papel importante. La estabilidad de un núcleo denso contra su propia gravedad procede en parte de la presión térmica del gas en su interior, que lucha por expandirse una vez comprimido (como el aire de un globo hinchado a presión). Existe además una posible contribución de un campo magnético “congelado” en su interior. El papel de los campos magnéticos en la estabilidad de los núcleos densos es un asunto de intenso debate, pues la dificultad de medirlos ha hecho que no conozcamos con precisión su intensidad o geometría. Aunque el grado de ionización del gas en una nube es pequeño, resulta suficiente para que la materia no pueda moverse sin arrastrar al campo magnético interior (de ahí el término “congelado”), y la resistencia natural de un campo magnético a comprimirse puede aportar un elemento adicional a la estabilidad del núcleo denso.

Durante un millón de años aproximadamente el núcleo denso parece mantenerse en equilibrio, pero poco a poco va perdiendo estabilidad, probablemente debido a la difusión y debilitamiento del campo magnético. Si esto es así, y el núcleo es lo suficientemente concentrado, debe llegar un momento en que la fuerza de la gravedad rompa el equilibrio y haga que el gas empiece a colapsar hacia el interior. Según modelos teóricos, el colapso gravitacional empieza en las zonas más internas del núcleo, que

caen antes, y poco a poco va afectando al gas de zonas más externas. El momento de la inestabilidad gravitacional marca el auténtico comienzo del nacimiento de una estrella.

### Ha nacido una protoestrella

El gas que colapsa por acción de la gravedad lo hace hasta que llega a una densidad tal que es opaco a su propia radiación. En este momento, el gas no puede liberar fácilmente la energía cinética que gana por la aceleración gravitacional y empieza a calentarse, aumentando su presión y llegando otra vez a una situación de equilibrio. En el centro del núcleo colapsando, empieza pues a formarse un objeto denso que es el precursor de la estrella, y que va lentamente aumentando de masa gracias a la continua caída de material. Este objeto central, denominado protoestrella, emite ya luz, pero ésta no procede de reacciones nucleares en su interior (es demasiado frío para que éstas ocurran), sino de la liberación de energía cinética producida por el colapso (el ruido de un objeto que cae y choca contra el suelo también resulta de la energía ganada por acción de la gravedad). La luz de la protoestrella, sin embargo, es absorbida inmediatamente por el polvo de la condensación circundante y degradada a longitudes de onda infrarrojas o radio. La protoestrella es por tanto ópticamente invisible, pero su presencia puede ya ser detectada con instrumental sensible a longitudes de onda mayores (ver Figura 2).

Desde el primer momento, la protoestrella no está aislada en el centro de la condensación colapsando, sino que está rodeada de un disco que gira a su alrededor y que resulta del material de la nube que no puede caer directamente hacia el centro por tener demasiado momento angular. Este momento angular es una medida de la rotación de la materia, y es una cantidad que se conserva durante el colapso gravitacional. Igual que un patinador que al recoger sus brazos acelera su rotación, el material de una nube que colapsa aumenta su velocidad de giro al acercarse hacia el centro. El efecto en el material que colapsa es mucho más pronunciado que en el patinador, pues éste puede variar su radio (recogiendo sus brazos) sólo un factor 3 o 4, mientras que el material de la nube colapsando disminuye de radio un factor un millón. El aumento de la rotación es tal que llega un momento en el que la fuerza centrífuga compensa la fuerza de la gravedad, y el material no sigue colapsando sino que empieza a orbitar (como un planeta) alrededor de la protoestrella. Se forma así un disco (de varios cientos de unidades astronómicas de diámetro) continuamente alimentado por material de la nube que cae pero no consigue alcanzar el centro (ver Figure 3).

El disco no es un objeto pasivo que se limite a girar alrededor de la protoestrella, sino que es un mecanismo eficaz por el cual el material de la nube es capaz de perder su momento angular y terminar alimentando a la protoestrella central. Aunque los detalles físicos no han sido todavía total-

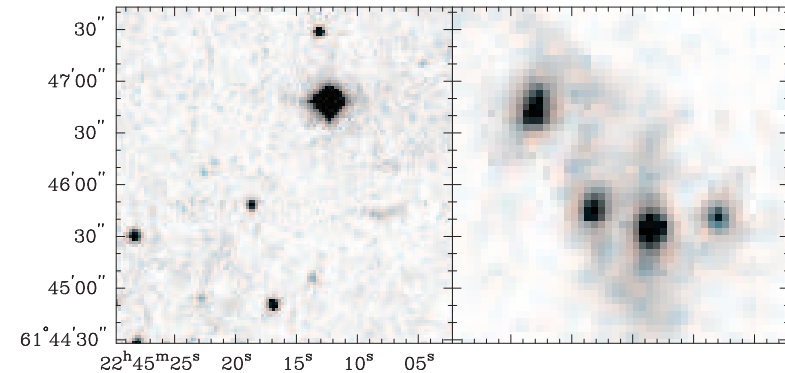


Figura 2: Estrellas y protoestrellas. El panel de la izquierda muestra la imagen óptica roja del Digital Sky Survey en dirección a la nube molecular L1211 (Copyright (c) 1994, Association of Universities for Research in Astronomy, Inc.). Las estrellas visibles en este panel no están asociadas a la nube, y simplemente se encuentran en su misma dirección, entre ella y nosotros. El panel de la derecha muestra una imagen del mismo campo a longitud de onda de 1,2 milímetros. A esta longitud de onda, las estrellas de la imagen izquierda son invisibles, mientras que aparece un grupo de cuatro protoestrellas. Estas protoestrellas se encuentran en el interior de la nube L1211 y su emisión óptica no es detectable por ser totalmente absorbida por los granos de polvo de la nube. A 1,2 mm, la nube molecular es transparente, y las protoestrellas son fácilmente detectables. (Las coordenadas son Ascensión Recta y Declinación época 1950, y la separación máxima entre las protoestrellas es aproximadamente 1,5 años luz.)

mente clarificados, de alguna manera el material en el disco es capaz de transferir momento angular del centro a la periferia, haciendo que sólo una pequeña fracción del gas acumule la mayor parte del momento, mientras que la mayor parte del material es capaz de descender lentamente en espiral para acabar cayendo a la protoestrella. Esta reorganización del momento angular, crucial para el nacimiento de una estrella, es evidente en nuestro sistema solar, donde el Sol, con un 99.9% de la masa contiene solo el 2% del momento angular (el resto está en la rotación de los planetas, especialmente Júpiter). El mecanismo responsable de la redistribución, todavía no completamente entendido, es claramente muy eficiente.

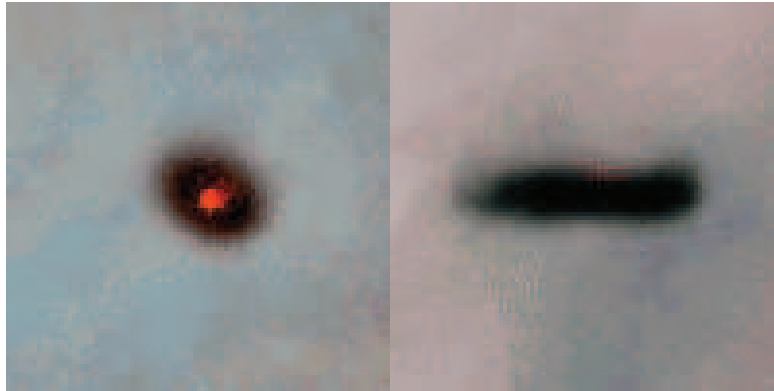


Figura 3: Dos ejemplos de estrellas jóvenes con disco en la nebulosa de Orión. Las condiciones especiales en Orión, con una fuerte emisión de fondo debida al gas ionizado, permiten ver a contraluz los discos opacos que rodean a las estrellas tipo T Tauri que se encuentra en la zona anterior de la nebulosa. En el panel de la izquierda, el disco aparece casi de frente, y la estrella central es visible como un punto brillante. En el panel de la derecha, el disco aparece casi de perfil, y es tan opaco que oculta totalmente la luz de la estrella central. El disco de la izquierda tiene un diámetro de unas 250 unidades astronómicas (0,004 años luz), aproximadamente 3 veces el diámetro de nuestro Sistema Solar. Imágenes tomadas con el telescopio espacial Hubble, cortesía de Mark McCaughrean (Max-Planck-Institute for Astronomy), C. Robert O'Dell (Rice University) y NASA.

### Protoestrellas binarias

Una forma alternativa de redistribuir del momento angular es acumularlo en forma de movimiento orbital de dos protoestrellas girando alrededor de su centro de masa común, es decir, formando un sistema binario. La naturaleza parece usar esta alternativa con frecuencia, pues más de dos tercios de las estrellas en la vecindad solar están formando parte de sistemas binarios o múltiples. Esta estadística se refiere a estrellas nacidas hace ya millones de años, y por tanto a sistemas binarios que han sobrevivido por largo tiempo. Estudios de frecuencia de binarias en sistemas jóvenes no han sido posibles hasta muy recientemente, y los datos preliminares parecen sugerir que la frecuencia de binarias depende del entorno en el que se forman las estrellas. Regiones de formación en cúmulo (como la Nebulosa de Orión) parecen tener una frecuencia de binarias igual a la observada en la vecindad solar, mientras que regiones de formación aislada (como Tauro)

parecen formar binarias con aún mayor frecuencia. Esta diferencia puede originarse por la ruptura de sistemas binarios en cúmulos densos (debido a la interacción gravitacional con otras estrellas), o por la dificultad de formar binarias en este tipo de regiones. Dadas las actuales estadísticas, no es posible descartar que la naturaleza sólo forme binarias, y que lo que vemos ahora como estrellas aisladas es el resultado de binarias que se han destruido.

Aunque existe una pequeña posibilidad de que el Sol forme parte de una binaria de tan largo periodo como para que su compañera todavía no haya sido detectada, todo parece indicar que nuestro astro vive aislado. Cómo explicar entonces esta anomalía, que afecta a menos de un tercio de las estrellas ya maduras? Una posibilidad es que el Sol formó parte de un sistema binario o múltiple y que éste fue destruido por alguna interacción. Otra posibilidad es que el Sol se formó en un entorno tan denso (como la Nebulosa de Orión, por ejemplo) que inhibió la formación de tal sistema. Desgraciadamente, la pregunta permanece sin respuesta, pero es posible que en el futuro, gracias a una mejor comprensión de la formación de sistemas múltiples de estrellas y de las características de sus sistemas planetarios asociados, seamos capaces de reconstruir el entorno en el que nació el Sol, casi cinco mil años después de que ésto sucediera.

### Flujos bipolares

Además de la protoestrella central, el disco y el gas en proceso de colapso gravitacional, hay un elemento fundamental en la formación de una estrella que no fue descubierto hasta principios de los años 80. En esa época, el estudio de los movimientos del gas alrededor de protoestrellas reveló sorprendentemente que una gran cantidad del gas no esta contrayéndose, como debería esperarse por la acción de la gravedad, sino expandiéndose rápidamente en forma de dos corrientes opuestas. Este fenómeno, llamado flujo bipolar, muestra que la protoestrella, además de recibir material de la nube ambiente, es capaz de eyectar gas a alta velocidad que escapa de sus proximidades. Resulta paradójico que una estrella nazca de la mezcla de contracción gravitacional y flujo bipolar, pero como ahora veremos esta combinación parece ser necesaria para la formación de una estrella. La coexistencia de estos movimientos es posible porque el flujo bipolar sólo ocupa un pequeño ángulo sólido alrededor de la estrella, mientras que el gas en contracción ocupa el resto (ver Figura 4).

Aunque el mecanismo exacto que produce un flujo bipolar es todavía un motivo de debate dentro de la comunidad astronómica, parece haber consenso en que los elementos esenciales para producirlo son la rotación del disco y la presencia de un campo magnético focalizador. Mediante la combinación de estos ingredientes, una parte del material del disco que está en proceso de caer a la protoestrella es acelerado en dirección perpendicular, parte hacia arriba y parte hacia abajo, saliendo despedido

a muy alta velocidad (alrededor de unos 100 km por segundo). Como resultado de este proceso, el material eyectado roba momento angular, permitiendo que parte del material del disco se frene lo necesario como para caer finalmente a la protoestrella central. El flujo bipolar, por tanto, es capaz de resolver el problema final que tiene el gas del disco para caer a la protoestrella: su exceso de momento angular. Según modelos recientes, esto se logra transmitiendo el momento angular sobrante (vía campo magnético) a una pequeña cantidad del gas que es eyectada (10-20%), mientras que el resto del material puede pasar a formar parte de la estrella central.

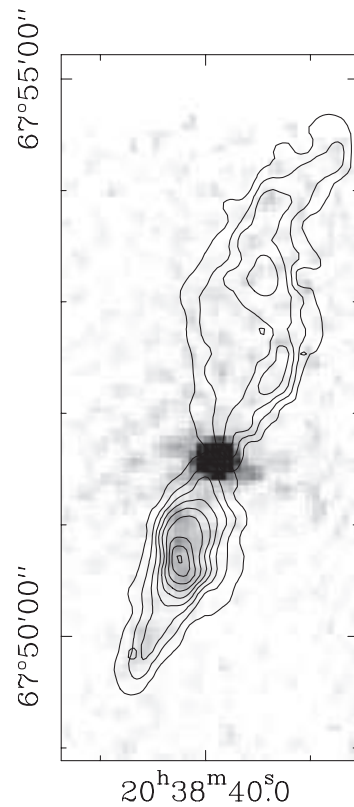


Figura 4: Protoestrella con flujo bipolar en la nube L1157. La escala de grises es una imagen a longitud de onda de 1,2 mm que muestra una protoestrella brillante hacia el centro del panel. Los contornos superpuestos muestran la emisión de la molécula  $^{12}\text{CO}$  (1,3 mm de longitud de onda), e indican la distribución de gas acelerado por la protoestrella central. El gas forma dos lóbulos que divergen de la

protoestrella y se extienden por una distancia de unos 2 años luz. Datos del flujo bipolar cortesía de Rafael Bachiller y Miguel Pérez Gutiérrez (Observatorio Astronómico Nacional).

Además de su importante papel de redistribuidor del momento angular, el flujo bipolar parece cumplir otra misión crucial en el nacimiento de una estrella: la dispersión de su núcleo denso. Esto ocurre debido a la gran energía cinética del flujo bipolar, que es transmitida al gas ambiente mediante violentos choques supersónicos. El gas del núcleo denso va así siendo poco a poco acelerado por el flujo bipolar, y este movimiento contrarresta la atracción gravitacional de la protoestrella. Parece muy posible que de esta manera, al cabo de varios cientos de miles de años de iniciarse el colapso gravitacional, el flujo bipolar inhiba totalmente este movimiento, y dé por finalizada la fase principal de crecimiento del sistema disco-protostrella.

### Estrellas pre-secuencia principal

La dispersión de parte del núcleo denso por el flujo bipolar tiene como consecuencia adicional hacer visible ópticamente a la protoestrella. Por convención, hablamos entonces de una estrella pre-secuencia principal, o en referencia al primer caso conocido, de una estrella T Tauri (Figuras 1 y 3). Este tipo de estrella no emite todavía energía por combustión de hidrógeno en helio, sino por la lenta contracción que la va aproximando al deseado estado de equilibrio. La estrella no puede realizar esta contracción de forma rápida, pues como hemos visto, para contraerse necesita liberar energía, y al ser un objeto opaco esta energía no puede escapar fácilmente. Una estrella como el Sol, necesita unos 30 millones de años para liberar la energía extra y alcanzar finalmente la secuencia principal. En este proceso, el radio de la estrella disminuye aproximadamente un factor 5, hasta alcanzar los aproximadamente 700.000 km que el Sol tiene en la actualidad.

Aunque la contracción gravitacional no es una fuente de energía muy duradera, sí es eficiente, como lo muestra el hecho de que durante la fase T Tauri una estrella como el Sol sea unas diez veces más luminosa que en la secuencia principal. Desde el punto de vista observacional, la emisión de una estrella T Tauri empieza a parecerse a la de un objeto de la secuencia principal, pero todavía incluye cierto grado de actividad atípica, como variaciones de luminosidad y emisión en líneas de hidrógeno. Estas características llamaron la atención de los astrónomos a principios de los años 40, y ahora podemos entenderlas como signos de juventud estelar. Parte de la variabilidad, por ejemplo, es debida a la presencia de enormes zonas frías (manchas) en la superficie, parecidas a las que presenta el Sol en tiempo de máximo solar pero a una escala miles de veces mayor (en una estrella T Tauri típica, las manchas pueden cubrir el 10% de su superficie).

Estas manchas, y otros fenómenos como la emisión de rayos X, indican la presencia de intensos campos magnéticos en la superficie, que resultan de la rotación estelar y de una estructura convectiva (la convección transmite la energía del interior mediante movimientos de materia, como en un fluido en ebullición).

Tanto el disco como el flujo bipolar siguen presentes en la fase T Tauri, al menos durante los primeros millones de años. El disco se va haciendo menos masivo, pues ha perdido la fuente de material que representa el núcleo denso colapsando. Sigue sin embargo alimentando de material a la estrella, y se estima que en la fase T Tauri, ésta adquiere el 10% final de su masa total a través del disco. El flujo bipolar, por su parte, es menos energético que antes, probablemente debido a la menor actividad del disco. A medida que transcurre la fase T Tauri, el disco y el flujo van perdiendo prominencia, como los otros signos de juventud estelar representados por la variabilidad y la intensidad de las líneas de emisión de hidrógeno. La luminosidad de la estrella va también decreciendo lentamente, aproximándose al valor correspondiente a la secuencia principal.

### **Aproximación final a la secuencia principal**

Aunque la principal fuente de luminosidad de la estrella T Tauri procede de su contracción, existen períodos donde ésta se frena temporalmente al aparecer fuentes de energía alternativas. Cuando la temperatura central de la estrella llega a un millón de grados, por ejemplo, el deuterio (hidrógeno pesado) en el interior es capaz de reaccionar, y así producir energía que compensa la fuerza gravitatoria. El deuterio, sin embargo, es un elemento minoritario en la composición estelar (un par de partes por 10.000), y no constituye por tanto una solución de largo plazo al equilibrio final. En una estrella como el Sol, la combustión de deuterio dura unos cien mil años, y una vez agotado éste, la estrella vuelve a su lenta contracción gravitacional.

A medida que la contracción progresa y la luminosidad de la estrella disminuye, llega un momento en que el interior estelar cambia de estructura, y pasa a ser radiativo. Esto significa que la energía en el interior ya no se transmite hacia la superficie mediante un movimiento de materia similar a la ebullición, sino que lo hace a través de radiación que se mueve en un medio estático. Ese cambio representa el último ajuste estructural de la estrella, que sigue contrayéndose lentamente, pero ahora con luminosidad casi constante (de hecho aumenta un poco). En una estrella como el Sol, se estima que tras unos 30 millones de años de contracción gradual, la temperatura y la densidad centrales alcanzan los aproximadamente 14 millones de grados y 100 gramos por centímetro cúbico necesarios para comenzar la combustión nuclear de hidrógeno en helio. Este momento marca la llegada de la estrella a la secuencia principal; representa el final de su juventud y el principio de su edad madura. La gran cantidad de combustible de que

dispone la estrella (un 70% de su masa es hidrógeno) permite que esta fase sea la más larga de su vida, y represente un triunfo (aunque tan solo temporal) frente a la implacable acción de la gravedad.

### **El ciclo de vida y muerte de las estrellas**

Las nubes moleculares que están formando estrellas en la actualidad, o la que formó al Sol hace 4.700 millones de años, están compuestas mayoritariamente de hidrógeno y helio, pero también contienen elementos más pesados, que en astronomía llamamos genéricamente “metales”. Esta presencia de metales indica que las nubes no tienen una composición primordial, esto es, no tienen la composición inicial del universo tras el Big Bang (casi en su totalidad hidrógeno y helio), sino que ha sido enriquecidas con elementos más pesados. El único mecanismo eficaz para formar elementos pesados es mediante la combustión nuclear en el interior de estrellas, proceso que poco a poco va convirtiendo el hidrógeno y helio primordial en elementos pesados como el carbono, oxígeno, y nitrógeno. Ya sea mediante explosiones tipo supernova (en las estrellas más masivas) o mediante potentes vientos estelares (estrellas menos masivas), las estrellas al morir devuelven al medio interestelar parte de los elementos generados en su interior, y de esta manera, los elementos vuelven a quedar disponibles para formar nuevas estrellas. Este reciclaje a escala galáctica lleva funcionando miles de millones de años, y es el causante de la composición no primordial de todas las estrellas conocidas.

Como hemos visto en este artículo, nuestro conocimiento del proceso de formación estelar es todavía demasiado incompleto como para responder con confianza preguntas como si nuestro Sol nació aislado o formando un grupo, o qué hizo que el Sol terminase su formación con la masa que tiene ahora y no con otra mayor (o menor). La enorme actividad investigadora en este campo hace que podamos ser optimistas de que en un futuro cercano tendremos respuestas a estas preguntas, y a otras que vayan surgiendo a medida que profundizamos en nuestro entendimiento de la formación estelar. De lo que sí podemos estar seguros es de que el Sol transcurrirá su larga fase de estabilidad en la secuencia principal, para después iniciar los cambios estructurales que conlleva el agotamiento de hidrógeno en su centro. Pasada una fase de gigante roja, y tras un breve período de estabilidad quemando helio, el Sol empezará su proceso de formación de una enana blanca perdiendo por el camino gran parte del material que tomó prestado al nacer. Este material, mezclado con el procedente de otras estrellas de distintas partes de la Galaxia, volverá de nuevo a formar una nube molecular, a condensarse formando un núcleo denso, y con el tiempo, a repetir el complejo proceso que un día hizo nacer a nuestro Sol.