

¿Cómo se forma un sol?

TRANSCURREN ENTRE 50 Y 60 MILLONES DE AÑOS DESDE QUE PARTE DE UNA NUBE DE GAS Y POLVO COMIENZA A CONTRAERSE HASTA QUE LA ESTRELLA COMIENZA A QUEMAR HIDRÓGENO. SEGUIMOS EL PROCESO PASO A PASO.

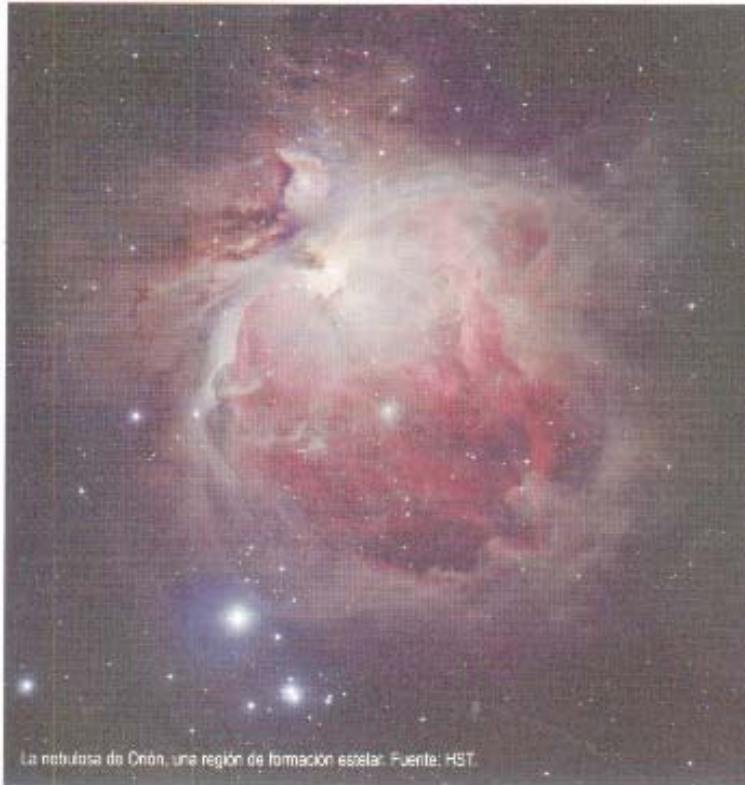
Por Matilde Fernández (IAA-CSIC)

LA ENERGÍA DE LAS ESTRELLAS.

En 1967, Hans A. Bethe recibió el premio Nóbel de Física por sus contribuciones teóricas al estudio de las reacciones nucleares y, en particular, por su descubrimiento en relación con la producción de energía en las estrellas. Gracias a él sabemos que su principal fuente de energía es la fusión del hidrógeno que las constituye (se trata de una reacción que tiene lugar a nivel de los componentes de los átomos y que libera gran cantidad de energía). Esta reacción hace posible que una estrella como el Sol lance al espacio cada segundo la energía equivalente a la producción anual de más de dos millones de centrales eléctricas grandes. El Sol nos puede parecer, así, una fuente inagotable de energía. De hecho, a pesar de que en la Tierra ha habido décadas en las que ha descendido la temperatura media algunos grados, no hay indicios de que la potencia del Sol esté mermando. Sin embargo, sabiendo que su calor se genera a partir de la materia que lo constituye, basta pensar que tiene una masa limitada (2×10^{30} kgs) para entender que su fuente de energía sí es agotable. La vida del Sol será, sin embargo, muy larga: brillará todavía unos 5000 millones de años antes de empezar a apagarse. Este es también, aproximadamente, el tiempo que ha transcurrido desde que empezó a brillar. Si el Sol, en lugar de estar formado por hidrógeno y helio, estuviese constituido por carbón, al ritmo actual de producción de energía no podría brillar más de 330 años. Pero la fusión del hidrógeno requiere que el gas alcance temperaturas muy altas, de casi seis millones de grados. Teniendo en cuenta que la materia a partir de la que se forma una estrella está a una temperatura muy inferior a ésta ¿cómo llega a brillar una estrella?

El nacimiento

Las estrellas se forman en el seno de las nubes interestelares, llamadas así por su parecido en fotografías a las nubes de la atmósfera terrestre. Estas nubes están constituidas por gas (en gran parte hidrógeno) y polvo, que brillan cuando reflejan o remiten la luz que les llega de estrellas en su proximidad.



La nebulosa de Orión, una región de formación estelar. Fuente: HST.

La nebulosa de Orión, una región de formación estelar. Fuente: HST

Debido a mecanismos todavía en estudio, la densidad (no homogénea) de una zona de una nube interestelar puede aumentar, atrayendo hacia sí la materia de los alrededores. Se trata de un proceso que se retroalimenta: cuanto más materia se acerca a la zona o núcleo denso y pasa a formar parte de él, mayor es la atracción que éste ejerce sobre la materia de su entorno. El gas y el polvo que se mueven hacia el núcleo se aceleran y se calientan. La radiación emitida por ese núcleo, cuya temperatura va en aumento, es absorbida en su mayor parte por la materia que lo rodea. En estos momentos la futura estrella obtiene su energía a partir de la energía gravitacional (potencial) del gas y polvo de la nube que van cayendo hacia la zona central de ese núcleo en contracción. La densidad va aumentando. La temperatura también. Cada vez se emite una mayor cantidad de radiación (energía) al exterior, con lo que se calienta el gas y polvo menos denso de la zona de la nube interestelar que rodea al núcleo. todavía en formación. Es decir, cuando este gas y polvo del entorno se hacen

más tenues, podemos ver la estrella empieza a emitir suficiente energía en las longitudes de onda visibles. Desde el punto de vista formal no podemos decir que se trate de una estrella, porque en esta fase la fuente de energía es la contracción gravitatoria, no la fusión del hidrógeno, sin embargo, a simple vista es indistinguible de las verdaderas estrellas. Nuestra futura estrella tiene algo menos de un millón de años. Esta edad se calcula a partir del momento en el que se inició la contracción del núcleo denso de la nube interestelar. La característica que define de una manera más decisiva la vida y evolución de una estrella es su masa. De la misma manera también hay diferencias entre la formación de estrellas masivas (varias veces la masa del Sol) y las de menor masa. Aquí nos ocuparemos de la formación de estas últimas, entre las que se encuentra el Sol. Es en estas estrellas, en las que el núcleo denso en contracción empieza a brillar y a ser visible para nosotros, cuando ha transcurrido algo menos de un millón de años desde que comenzó la contracción del gas y polvo de la

nube interestelar. Cuando la futura estrella alcanza una edad de uno a dos millones de años, su parecido con las estrellas propiamente dichas es muy grande: aunque todavía está en la fase

La característica que define de una manera más decisiva la vida y evolución de una estrella es su masa; también hay diferencias entre la formación de estrellas masivas y las de menos masa

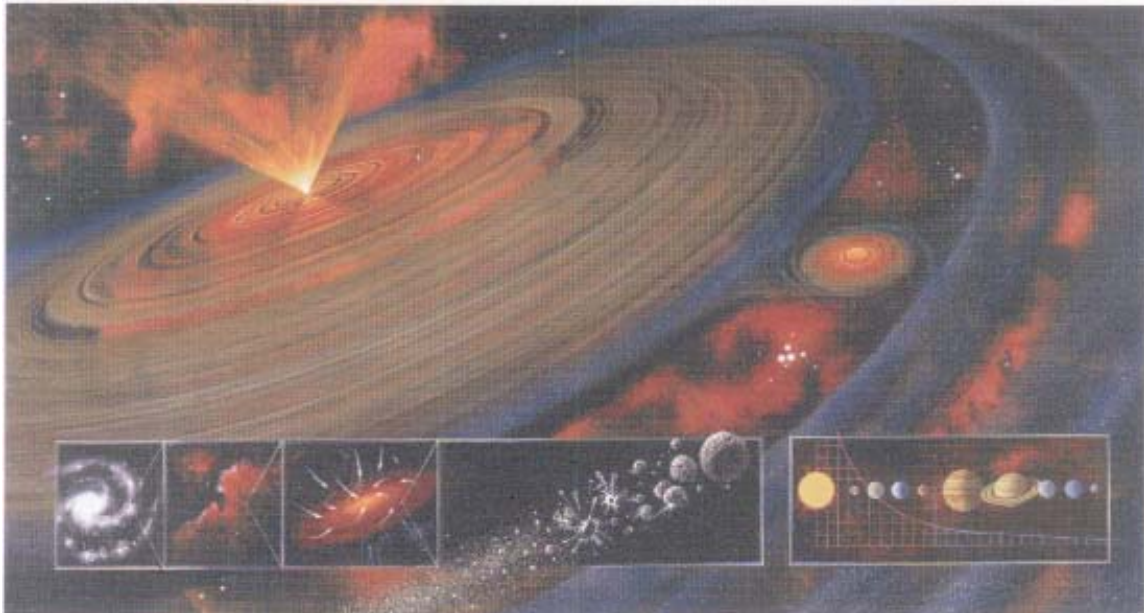
de contracción, su tamaño es ya sólo dos o tres veces superior al que será su tamaño final y a su temperatura superficial le faltan sólo unos 1.500 grados para alcanzar la

temperatura final. Su brillo es muy similar al que tendrá en la etapa de fusión del hidrógeno, porque el hecho de tener todavía una temperatura superficial inferior a la final queda compensado por su mayor volumen (mayor superficie emisora). Se estima que la estrella en formación tarda unos 50 o 60 millones de años en alcanzar la etapa en la que su fuente principal de energía es la fusión del hidrógeno y no la contracción gravitatoria. Esa etapa se denomina secuencia principal, porque es en la que discurre gran parte de la vida de la estrella. Se trata de la etapa más estable, en la que el brillo es más constante. Para una estrella como el Sol esta etapa dura unos 10.000 millones de años.

¿Y los planetas?

La situación que hemos descrito hasta ahora corresponde al caso del colapso

de un núcleo denso en una nube interestelar en reposo. En este escenario no parece que haya cabida para la formación de planetas y cuerpos menores, como los que giran en torno al Sol, ya que la materia que no pasa a formar parte de la estrella se disipa, alejándose de la estrella en todas las direcciones. Sin embargo, las nubes interestelares de una galaxia no siempre están en reposo. En una galaxia como la nuestra estas nubes comparten el giro de las estrellas en torno al centro de la galaxia. Por ello, la formación de una estrella en realidad resulta del colapso de gas y polvo en movimiento que acelera su giro durante el colapso hacia la zona central del núcleo denso, al igual que una bailarina acelera su giro al acercar sus brazos al cuerpo. Al tener en cuenta este giro, añadimos un ingrediente esencial al modelo de formación de estrellas como el Sol. Lo que hasta ahora era un



Recreación artística de un disco de acreción en el que empiezan a formarse los planetas y cuerpos menores que en el futuro orbitarán en torno a la estrella central

núcleo en contracción, sobre el que caía la materia de la nube, se trata en realidad de un núcleo en torno al que gira un disco de materia, en un esquema semejante, en apariencia, a Saturno y sus anillos. Este disco se forma porque la materia de la nube que experimenta la atracción hacia el núcleo en contracción está contagiada de una cierta velocidad de rotación que le impide caer directamente sobre el núcleo. La materia que cae desde la nube se va acercando al plano perpendicular al eje de giro del núcleo y de esta manera se forma un disco. La materia del disco gira en torno al núcleo, en órbitas que, a diferencia de lo que ocurre en los anillos de Saturno, no son estables. La densidad del disco

es alta y el rozamiento provoca una pérdida de energía que hace que la materia del disco se vaya desplazando a órbitas cada vez más próximas al núcleo, hasta terminar cayendo sobre él. Por este motivo estos discos reciben el nombre de discos de acreción. Cuando la futura estrella tiene una edad de un millón de años, este disco juega todavía un papel importante, no tanto por la materia que va a aportar a la estrella (que va a ser menos del 1% de lo que será la masa final de la estrella), sino porque gran parte de las variaciones de brillo que caracterizan a la estrella en este momento están relacionados con él. La materia del disco que cae sobre la estrella produce un calentamiento en la zona del

impacto, en la que la temperatura puede ascender 2000 o 3000 grados sobre la temperatura del resto de la superficie de la estrella. Esta región tan

En ocasiones el paso muy próximo de otra estrella ejerce una atracción gravitatoria que perturba el disco y puede distorsionarlo de tal manera que se frena el proceso de acreción de materia sobre la estrella.

caliente produce un exceso de emisión que apreciamos como un aumento

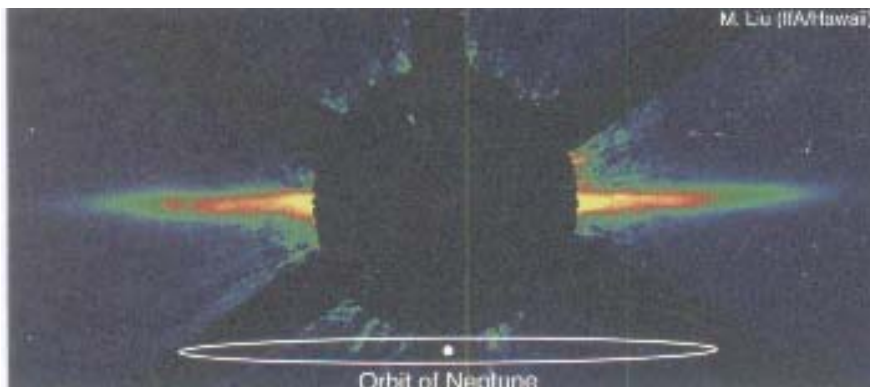
temporal del brillo de la estrella, de la misma manera que el impacto del cometa Shoemaker-Levy provocó manchas brillantes sobre la superficie de Júpiter en julio de 1994. Este es el tipo de variaciones de brillo que midió Alfred H. Joy en 1945 (ver recuadro en la esta página).

El disco se disipa

Normalmente, en el transcurso de unos pocos millones de años el disco de acrecimiento se va gastando: una parte de la materia cae sobre la estrella y otra parte es lanzada al exterior. El tiempo que el disco de acreción tarda en disiparse varía mucho en función del entorno de la estrella. En el caso de estrellas que se forman en nubes de baja densidad, en las que se están formando pocas estrellas y bastante alejadas unas de otras, el proceso de disipación del disco es lento y encontramos estrellas con casi diez millones de años que todavía tienen disco. Este es el caso de la asociación de TW Hya, en el hemisferio sur. Sin embargo, en otras regiones en las que

se están formando muchas estrellas a partir de una nube grande y densa, como es el caso de Orión, podemos encontrar estrellas con tan solo uno o dos millones de años en las que el disco se ha disipado ya. En ocasiones el paso muy próximo de otra estrella ejerce una atracción gravitatoria que perturba el disco y que puede llegar a distorsionarlo de tal manera que se frena el proceso de acreción de materia sobre la estrella. En resumen, la evolución del sistema estrella-disco no depende sólo de la masa del núcleo que será la futura estrella, sino también de su entorno. Cuando decimos que el disco se disipa queremos decir, realmente, que dejamos de verlo y dejamos de ver su efecto sobre la estrella. Pero gran parte de la materia del disco sigue estando ahí. Lo que ocurre es que se va enfriando y ya no emite radiación que podamos ver (visible), aunque todavía se puede detectar en el infrarrojo y, sobre todo, a longitudes de onda de radio, utilizando radiotelescopios. El polvo que forma parte de la materia del disco, que proviene de la nube

interestelar, está formado por partículas de diversos tamaños, del orden de una micra. Cuando el proceso de acreción de masa sobre la estrella se frena, la temperatura del disco va bajando y estas partículas comienzan a unirse unas a otras (coagulación). Todavía no se conoce el proceso completo, pero se tiene la certeza de que, a pesar de la turbulencia del disco y del hecho de que las colisiones vuelven a provocar la ruptura de partículas de menor tamaño, el efecto dominante es el aglutinamiento de las partículas en piedras cada vez mayores. Cálculos llevados a cabo en los últimos años parecen confirmar que en medio millón de años se podría formar un protoplaneta que tuviese una masa sesenta veces inferior a la de la Tierra. El proceso completo de formación de un planeta como el nuestro está todavía por determinar. Algunos expertos apuntan a una duración de 50 a 100 millones de años, mientras que otros consideran posible que se formase en tan solo diez millones de años.



AU Mic, una estrella roja poco brillante con tan solo la mitad de masa que el Sol, muestra un disco de gas y polvo con irregularidades que indican la presencia de planetas en formación. Fuente: M. Liu (IfA/Hawaii).

ESTRELLAS PRE-SECUENCIA PRINCIPAL

El estudio de la formación de una estrella, que corresponde a la etapa pre-secuencia principal, llevaría demasiado tiempo si nos dedicásemos a seguir la evolución de una estrella en particular, por eso se buscan muestras de estrellas con edades variadas (desde menos de un millón de años hasta casi cien millones) y se completa de esta manera lo que es, en promedio, el proceso de formación de una estrella como el Sol. Sin embargo, habíamos mencionado que ya con un millón de años la futura estrella tiene la apariencia de una auténtica estrella. ¿Cómo se distinguen, entonces, las estrellas que están todavía en la etapa pre-secuencia principal de las otras estrellas?

Las primeras estrellas jóvenes (todavía en formación) de las que se tuvo certeza se descubrieron de manera fortuita. En 1945 Alfred H. Joy, astrónomo estadounidense, publicó un estudio sobre las variaciones de brillo de varias estrellas de la constelación del Toro. Se trataba de un grupo de estrellas variables irregulares, que no fueron clasificadas en ninguno de los grupos de estrellas variables conocidos hasta el momento. Dos años después, el astrónomo armenio-ruso Víctor A. Ambartsumian propuso que se trataba de estrellas en formación.

La variabilidad que descubrió Alfred H. Joy se debe esencialmente a que una estrella tarda millones de años en emitir energía de una manera estable. En sus etapas más tempranas esas variaciones están estrechamente ligadas a la materia de la nube interestelar que todavía queda en el entorno de la estrella; cuando esa materia se disipa, las variaciones de brillo (ya menores) están asociadas al campo magnético de la estrella, todavía intenso, con el mecanismo a través del cual se transporta la energía desde el interior de la estrella hasta su superficie. No debemos olvidar que una estrella es una esfera de gas (plasma) en equilibrio entre la expansión a la que empuja la energía que se produce en su interior y el colapso al que tenderían las zonas más externas por la atracción gravitatoria del interior. Alcanzar este equilibrio estable requiere, para estrellas como el Sol, varias decenas de millones de años. Esta

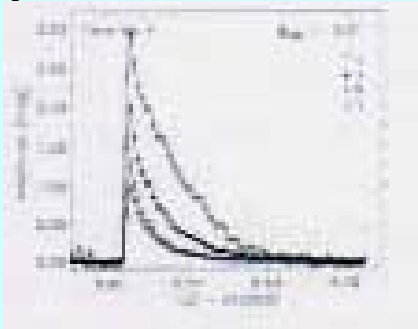


Cerca del centro de la imagen está la estrella V410 Tau, de masa similar al Sol pero con solo un millón de años de edad. La nube en la que se ha formado es oscura porque no hay ninguna estrella suficientemente brillante que la ilumine.

variabilidad ha servido para descubrir más estrellas en formación en distintas zonas del cielo. Se ha visto que las estrellas se forman en cúmulos y asociaciones. Las regiones de formación estelar suelen ser fácilmente reconocibles porque el gas y el polvo que todavía quedan de la nube interestelar original, absorben, reflejan y/o reemiten la luz de las estrellas en formación. Sin embargo, la identificación de estas estrellas no es siempre fácil, ya que con frecuencia se confunden con estrellas de fondo y con estrellas más viejas de otras regiones más próximas a nosotros, situadas en la línea de visión. La particular variabilidad de su brillo, al igual que otras características o indicadores de juventud, son las herramientas que nos permiten distinguir las estrellas jóvenes del resto de las estrellas. En el año 1988 se conocían unas 750 estrellas en formación; en la actualidad el número supera ya las 10.000. Casi todas ellas están en nuestra Galaxia, ya que el estudio de estrellas individuales de masa parecida a la del Sol en otras galaxias está muy limitado por las posibilidades técnicas.

CÓMO INFLUYE LA ESTRELLA JOVEN SOBRE LAS ATMÓSFERAS PLANETARIAS?

Dado que la Tierra debió de formarse dentro del periodo de tiempo en el que se formó el Sol, es muy posible que las variaciones de brillo del joven Sol influyesen en ciertas etapas de la formación de la Tierra. En particular, en la evolución de nuestra atmósfera. Es sabido que la atmósfera terrestre actual dista mucho de la que tenía el planeta originalmente. Se ha propuesto una secuencia de varias atmósferas intermedias hasta llegar a la actual. Para que tuviese lugar la primera de estas transiciones habría sido necesario que la emisión ultravioleta del Sol en ese periodo hubiese sido cien veces superior a la actual. Esa emisión habría hecho posible el mecanismo denominado escape hidrodinámico del hidrógeno. El hidrógeno es un gas muy abundante en la atmósfera terrestre original pero del que no quedan restos en la atmósfera actual. En el año 2001 llevamos a cabo una campaña internacional de observaciones coordinadas con la estrella V410 Tau y descubrimos que atravesaba una etapa de frecuentes fulguraciones.



Las fulguraciones son un fenómeno asociado a la variabilidad mencionada anteriormente, que caracteriza a las estrellas en formación una vez que se disipa el disco. Se cree que son similares, en naturaleza, a las del Sol, pero emiten mucha más energía que sus análogas solares.

La más intensa de estas fulguraciones se muestra en la imagen. Nuestros cálculos indican que la energía ultravioleta liberada por varias de las fulguraciones de V410 Tau estuvo por encima del umbral establecido por los que estudian la evolución de la atmósfera terrestre, por lo que, de haber tenido lugar en el Sol joven, estas fulguraciones podrían haber sido la forma de proporcionar a la atmósfera terrestre original la energía necesaria para que tuviese lugar el escape hidrodinámico del hidrógeno. Dado que V410 Tau tiene tan solo un millón de años, es probable que los posibles planetas en formación en su entorno no hayan adquirido todavía una fracción considerable de su masa. Por ello estamos extendiendo nuestras observaciones a estrellas con edades comprendidas entre tres y cien millones de años, con objeto de estudiar en ellas la frecuencia de fulguraciones que liberen energías por encima del mencionado umbral y ver si podrían provocar el escape hidrodinámico del hidrógeno en las atmósferas de los posibles planetas en formación en su entorno. Esta será una pieza más a colocar en el gran puzzle que todavía es el proceso de formación del Sol y de su sistema planetario.

¿CÓMO LANZAN LAS ESTRELLAS MATERIA AL EXTERIOR?

En unos pocos millones de años el disco de acreción se va gastando: una parte de la materia cae sobre la estrella y otra parte es lanzada al exterior. Este segundo fenómeno, el de la eyección de materia, resulta un poco sorprendente ya que se supone que estamos tratando el proceso por el que la futura estrella logra acumular toda su masa. A nivel teórico todavía no se conocen todos los detalles de esta eyección de materia, pero en las últimas décadas se ha avanzado mucho en el modelado de los chorros que salen despedidos desde la estrella en formación. Se sabe que son el mecanismo que utiliza la estrella para liberarse del exceso de energía de rotación (momento angular) de la materia que cae sobre el disco. Los procesos de eyección y de acreción de materia son simultáneos, en el sentido de que un aumento repentino de la cantidad de materia del disco que cae sobre la estrella va asociado a un aumento repentino de la materia eyectada. La cantidad de materia que se lanza es una pequeña fracción de la que será la masa de la estrella, pero la gran cantidad de energía liberada en estos chorros y su espectacular interacción (choques) con los restos de la nube interestelar los convierten en el fenómeno más llamativo dentro del proceso de formación de una estrella como el Sol.

Algunos de estos chorros pueden seguir hasta distancias de veinte años luz de la estrella en formación, que es varias veces la distancia que nos separa de Próxima Centauro, la estrella más cercana al Sol, situada a 4.2 años luz.



HH-47, un denso chorro eyectado por una estrella joven. STScI, ESA, Univ. Arizona y NASA

NOTA: Este artículo aparece en el nº 20 (octubre 2006) de la revista *Información y Actualidad Astronómica*, del Instituto de Astrofísica de Andalucía/Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAA/CSIC), con cuyo permiso lo reproducimos aquí.