

Formación estelar inducida en la Vía Láctea por supercáscaras de hidrógeno neutro en expansión

Dr. E. M. Arnal

- BREVE INTRODUCCION

Existe vasta y variada evidencia de que nuevas generaciones de estrellas se han formado en el pasado, y se están formando en la actualidad, en distintas partes de la Vía Láctea. El entendimiento de los procesos involucrados en la formación estelar es de suma importancia en la ciencia astronómica, ya que entender los mismos es clave para promover el progreso en otras áreas de la investigación astrofísica, que abarcan desde campos tan dispares como la evolución estelar, los procesos que determinan las condiciones físicas del medio interestelar¹, y la formación de sistemas planetarios.

También existe evidencia de que la formación de estrellas tiene lugar en el interior de regiones de la Vía Láctea en las que se encuentran concentradas grandes cantidades de moléculas, átomos y partículas de polvo. Estas regiones, conocidas genéricamente con el nombre de nubes moleculares, pues estos constituyentes (las moléculas) son los que más abundan, son generalmente muy opacas a la radiación que puede ser detectada por nuestros ojos. En términos generales, la radiación (o el rango de frecuencias) a la que nuestros ojos son sensibles define lo que se conoce bajo el nombre de *ventana óptica* del espectro electromagnético. La alta opacidad de las nubes moleculares en la ventana óptica, implica que el astrónomo que usa las técnicas de observación tradicionales, sólo pueda tener acceso (¡figurativamente hablando!) a las capas superficiales de las mismas, pero le es imposible penetrar en su interior. Por lo tanto, si no puede “ver” el interior de las nubes moleculares, que es donde se forman las estrellas, las técnicas de observación de la astronomía óptica son de poca ayuda para dilucidar los procesos involucrados en la formación de nuevas generaciones de estrellas. Por esta limitación, para avanzar en el conocimiento de los mecanismos que desembocan en la formación de estrellas, es necesario disponer de instrumentos de observación que pueden trabajar en zonas del espectro electromagnético que permitan obtener información de las condiciones físicas imperantes en el interior de las nubes moleculares. Con este fin, se han construido instrumentos que pueden efectuar observaciones de las nubes moleculares en el infrarrojo cercano, medio y lejano, y en las bandas centimétrica, milimétrica y sub-milimétrica del espectro electromagnético. A estas longitudes de onda, las nubes moleculares son “casi transparentes”.

Dentro del campo de investigación de la formación estelar, existe una amplia variedad de problemáticas que necesitan ser investigadas a los fines de intentar arrojar alguna luz sobre los

mecanismos que originan, y eventualmente controlan, la formación de nuevas generaciones de estrellas. La variedad de problemáticas a la que se hace mención puede resumirse en una serie de preguntas, tales como:

- a) ¿Cuál es la velocidad y eficiencia de la formación de estrellas en la Vía Láctea?
- b) ¿Varía la velocidad y eficiencia de formación de estrellas con el tiempo y/o depende de la posición del lugar de formación de estrellas en la galaxia?
- c) ¿Cuáles son los procesos que conducen a la fragmentación² de una nube molecular y a la eventual formación de asociaciones estelares³ y cúmulos de estrellas?
- d) ¿Bajo qué condiciones la acción de un proceso “disparador” (por ejemplo, el impacto de una onda de choque⁴ sobre una nube molecular, o la colisión entre sí de nubes moleculares, o la fragmentación que pueda tener lugar en una estructura en expansión) es requerida.
- e) ¿Actúan los mismos procesos físicos en la formación de estrellas de alta masa⁵ que en la formación de estrellas de baja masa?
- f) ¿Qué procesos determinan el espectro⁶ de masas?
- g) ¿Qué parámetros controlan la formación de estrellas múltiples?
- h) ¿Cómo se puede determinar observacionalmente que un objeto dado pueda ser identificado como una proto-estrella⁷?

Como podrá apreciarse por parte del lector, las preguntas son de sentido común. Aunque parezca mentira, las respuestas a la mayoría de ellas no son conocidas con suficiente seguridad.

2.- FORMACIÓN ESTELAR INDUCIDA

En el marco de las preguntas formuladas con anterioridad, en este artículo nos restringiremos a intentar dar al lector una idea de las respuestas que podrían darse a la pregunta d). La formación estelar que pudiese originarse como consecuencia de la acción de estos “*procesos disparadores*” se conoce bajo el nombre de “*formación estelar inducida*”. En este contexto es válido preguntarse si el “proceso disparador” al que se hace referencia, es sólo requerido para iniciar los procesos que conducen a la formación de estrellas de alta masa, o si es requerido en un contexto tal que, por ejemplo, pudiese generar en algún sector de una nube molecular las condiciones para formar estrellas de distinta masa (alta y/o baja) por un proceso gradual, como sería el proceso de formación espontánea.

En el contexto de una formación estelar “disparada” pueden distinguirse diversas opciones, tales como:

1) Formación estelar como consecuencia de la presencia de turbulencia supersónica en el medio interestelar originada por colisiones al azar del gas presente en el medio interestelar. Estas colisiones podrían generar la formación transitoria de regiones de alta densidad. Estas últimas, bajo las condiciones apropiadas, podrían colapsar y formar nuevas estrellas. Esta posibilidad fue originalmente propuesta por B. Elmegreen (el lector interesado en ahondar en este mecanismo, ver *The Astrophysical Journal*, volumen 232, página 729, 1979).

2) Formación estelar inducida, a escala galáctica, por la interacción de una nube molecular “normal” existente en el medio interestelar, con las ondas de choque originadas en vientos estelares de estrellas tempranas, frentes de ionización, remanentes de supernova, ondas de densidad galácticas, colisión con otra nube molecular. Esta posibilidad fue originalmente propuesta por B. Elmegreen & C. Lada (*The Astrophysical Journal*, volumen 214, página 725, 1977).

3) Formación estelar originada en la fragmentación del material que constituye las estructuras en expansión originadas por los vientos estelares, frentes de ionización o remanentes de supernova. Estos efectos pueden ser originados en estrellas individuales o en conglomerados (cúmulos abiertos, asociaciones OB) de las mismas. (Whitworth et al. 1994, *MNRAS*, 268, 291, Elmegreen et al. 1977, *ApJ* 214, 725).

Uno de los proyectos de investigación en los que se encuentra involucrado el autor, se encuentra orientado hacia investigar la última opción.

A esta altura el lector podrá estar preguntándose, qué demonios son “las estructuras en expansión” que se mencionan. Antes de continuar, y en aras de hacer la lectura de este artículo lo más clara posible, explicaré brevemente, y en los términos más sencillos posibles, qué se quiere decir.

Es conocido en Física, que cuando un material se mueve en un medio dado con una velocidad superior a la velocidad del sonido en ese medio, se produce en este último lo que se conoce con el nombre de una onda de choque. A su vez, es una característica de estas ondas que “barran” el material del medio en el que mueven. A modo de ejemplo simple, imaginémonos que tenemos una estrella de gran masa que llega al final de su vida. Los modelos teóricos predicen que en tal situación se desencadenarán una serie de procesos en el interior de la estrella que terminarán con una enorme explosión (conocida como explosión de supernova) de la misma. En esta explosión, gran parte de la materia que compone la estrella es expulsada al medio interestelar que rodea a la

estrella que explota, con una velocidad de varios miles de kilómetros por segundo. Como la velocidad del sonido en el medio interestelar es del orden de 1 km/seg, este material que se desplaza a velocidades tan elevadas da origen a una onda de choque que se propaga en el medio interestelar. Esta onda, “barre” (¡como si fuese una enorme escoba cósmica!) todo el material ubicado en las cercanías de la estrella y lo apila en una capa de materia. Si suponemos que la explosión es isotrópica y que el medio interestelar es homogéneo y no posee campos magnéticos (¡ciertamente una gran simplificación!), la onda de choque será esférica y el material barrido por la misma podría asemejarse a la cáscara de una hipotética naranja cósmica, con la salvedad que el interior de la naranja se encontraría vacío (¡sería una especie de naranja hueca!) pues el material de su interior habría sido barrido por la onda de choque. Esta materia “barrida” por la onda de choque se mueve a velocidades muy elevadas al principio, pero a medida que pasa el tiempo, su velocidad va disminuyendo. La cantidad de materia que forma parte de la cáscara se incrementa con el paso del tiempo. Algo similar, aunque con sus particularidades, podría suceder en el medio interestelar en los alrededores de una estrella de gran masa relativamente joven. En este caso, la intensa radiación emitida por la estrella y los fuertes vientos estelares que las mismas poseen, serían los agentes que originarían la onda de choque. En el caso de tener muchos objetos de alta masa localizados en un volumen pequeño del espacio, estos efectos se magnifican y el tamaño de la hipotética naranja puede alcanzar dimensiones gigantescas, con diámetros de centenares de parsecs⁸. Estas estructuras gigantescas reciben el nombre de supercáscaras, y son observadas por los astrónomos principalmente en la radiación emitida por el átomo de hidrógeno en una longitud de onda cercana a los 21 cm. En estas estructuras, la cantidad de materia presente en la cáscara barrida por la onda de choque suele ser de centenares de miles o millones de veces la masa de nuestro Sol (¡cuya masa es de 2×10^{33} gramos, o en términos “entendibles” un número 2 seguido de treinta y tres ceros!).

A lo largo de la evolución temporal de las supercáscaras, las mismas podrían “chocar” con una nube molecular existente en el medio interestelar. Como consecuencia de tal colisión cósmica, en la zona donde la nube molecular es impactada por la onda de choque externa, podrían generarse las condiciones apropiadas para nazcan nuevas estrellas. Otra posibilidad es que a lo largo de su evolución, el material acumulado en las supercáscaras sufra ciertos procesos físicos que den lugar a la fragmentación del mismo. En esos fragmentos podrían formarse nuevas estrellas.

De lo mencionado, puede deducirse que las supercáscaras a lo largo de su evolución podrían dar lugar, por un mecanismo u otro, a la formación de nuevas generaciones de estrellas.

Lamentablemente, aunque factible, se desconoce (¡pues existen muy pocos casos constatados!) cuán importante puede ser este mecanismo, en comparación con otras alternativas propuestas, como “fábrica” de nuevas estrellas. Por lo tanto, puede aseverarse que la formación estelar

posiblemente originada en la evolución temporal de supercáscaras de HI, es un fenómeno que no ha sido investigado en forma sistemática hasta el presente.

3) UN NUEVO EJEMPLO DE FORMACIÓN ESTELAR INDUCIDA

Teniendo en cuenta lo mencionado en los párrafos anteriores, hace algunos años se ha iniciado en el IAR un proyecto de investigación cuyo objetivo científico es tratar de establecer la eventual importancia de este proceso. Para lograr este objetivo, se ha procedido a estudiar en detalle, haciendo uso de diversas técnicas de observación y bases de datos existentes en distintas longitudes de onda, varios objetos candidatos a ser supercáscaras de HI.

Uno de los objetos estudiados es la supercáscara denominada GS263-02+45. En dicha denominación se encuentra codificada información acerca de su posición en la Vía Láctea, y de la velocidad de acercamiento o alejamiento con la que se mueve. La posición se encuentra dada en el sistema de coordenadas galácticas⁹. Las siglas GS provienen del inglés “*Giant Shell*” (Cáscara Gigante), 263 indica la longitud galáctica aproximada del centro de la estructura, -02 indica su latitud galáctica, y +45 indica su velocidad a lo largo de la línea que une al Sol con la ubicación del objeto. En este caso el objeto se aleja de nosotros a unos 45 km/seg (¡unos 18.000 km/h!). Esta estructura posee un diámetro angular en el cielo del orden de 8° (16 veces el tamaño de la Luna Llena).

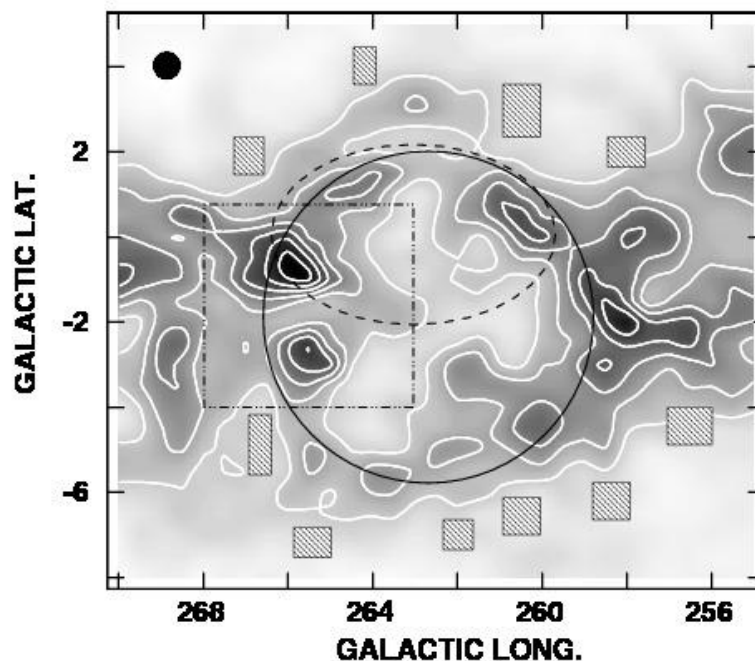


Figura 1: La estructura en forma de anillo representa la supercáscara GS263-02+45 tal como se la observa en la emisión de hidrógeno neutro

GS263-02+45, que se encuentra ubicada en la parte externa de la galaxia, posee un diámetro del orden de 650 pc (unos 4,5 millones de veces más grande que el sistema planetario del Sol), y en

la concentración de material que define sus paredes se encuentra un conglomerado joven de estrellas de gran masa denominado Bochum 7. Este objeto estelar fue estudiado por Corti, Bosch & Niemela en el año 2007 (el trabajo completo puede verse en la revista *Astronomy & Astrophysics*, volumen 467, página 137). En la Figura 1 puede verse una representación de la intensidad de la radiación de HI en una longitud de onda de 21 cm, emitida por el objeto GS263-02+45. La representación se efectúa en una escala de grises, en la que las zonas más oscuras representan mayor intensidad de emisión (mayor cantidad de material) y las líneas de contorno blancas que se encuentran dibujadas, representan líneas de igual intensidad de emisión del átomo de hidrogeno. La zona abarcada por GS263-02+45 se encuentra indicada por la circunferencia de línea continua. Nótese que el hidrógeno neutro asociado a la supercáscara (indicado en la figura por una circunferencia de trazos continuos) se encuentra confinado a una cáscara que dista de ser uniforme (existen como “grumos”), lo que podría interpretarse como evidencia de que el proceso de fragmentación se ha iniciado en la cáscara. En la zona central de GS263-02+45 predominan los tonos de gris claro, indicando que la cantidad de material en esa región es menor, tal como es predicho por la teoría. El punto blanco grueso indica la ubicación de Bochum 7, que se encuentra dentro de la zona de la cáscara de material, pero en una región de mucha menor emisión de HI. Dicha disminución podría ser consecuencia de la radiación de las estrellas de Bochum 7 sobre el medio circundante. Los rectángulos rayados marcan las regiones que fueron usadas para eliminar (en la medida de lo posible) emisión del átomo de HI que no se encontraba asociada físicamente a GS263-02+45. En el máximo de emisión de HI ubicado ligeramente al sur de Bochum 7, un satélite (denominado IRAS del inglés *InfaRed Astronomical Satellite*) que observó el Universo a longitudes de onda infrarrojas, detectó una fuente intensa. La misma se denomina IRAS0842-46. El análisis en la información suministrada por ese satélite en diversas bandas de frecuencias, parecería indicar que la fuente IRAS es un objeto estelar joven, o en formación. De ser esta interpretación correcta, la misma podría representar la punta del “iceberg” de una generación de estrellas más jóvenes que Bochum 7. Por lo expresado, en la zona de GS263-02+45 existirían al menos dos generaciones de estrellas que podrían encontrarse genéticamente vinculadas. O sea, al menos en esta supercáscara de HI parecería que hemos encontrado evidencia de formación estelar inducida.

Lo que no podemos saber con la información disponible, es si Bochum 7 fue formado como consecuencia de la interacción de la supercáscara GS263-02+45 con una nube molecular existente en el medio interestelar, o si por el contrario, Bochum 7 fue formado como consecuencia de la fragmentación de la supercáscara.

Con posteridad, se efectuaron observaciones en la zona de la fuente IRAS para detectar la posible presencia de una nube molecular que albergara a esta fuente. Recuérdese que al inicio de este artículo se ha mencionado que las estrellas nacen en nubes moleculares. Del análisis de esas observaciones, se ha encontrado una pequeña nube molecular en la que se encontraría localizada

la fuente infrarroja IRAS0842-46. Estas observaciones permiten confirmar que al menos en el caso de la supercáscara GS263-02+45, el proceso de formación estelar inducida ha dado sus frutos. Este estudio particular muestra que la asociación estelar Bochum 7 se ha formado en el material de la supercáscara GS263-02+45, y que a su vez las estrellas de Bochum 7 al interactuar por medio de su campo de radiación y de sus vientos estelares con una nube molecular cercana, han dado origen a una nueva generación de estrellas. De esta última IRAS0842-46 sería su miembro más conspicuo. En la Figura 2 se muestra, en una representación en colores, la distribución espacial de la emisión de la molécula de ^{12}CO . La emisión más intensa se encuentra indicada por colores rojos y la más débil por colores azules. Superpuesta sobre los colores pueden apreciarse diferentes líneas de contorno que encierran regiones de diferente intensidad de la emisión de la molécula. Las dimensiones de la nube se encuentran dadas por la primera línea de contornos. Lo que se muestra en dicha figura es la nube molecular a la que se encuentra vinculada la fuente IRAS0842-46. La misma se encuentra ubicada en la parte más intensa (color rojo) de la nube molecular.

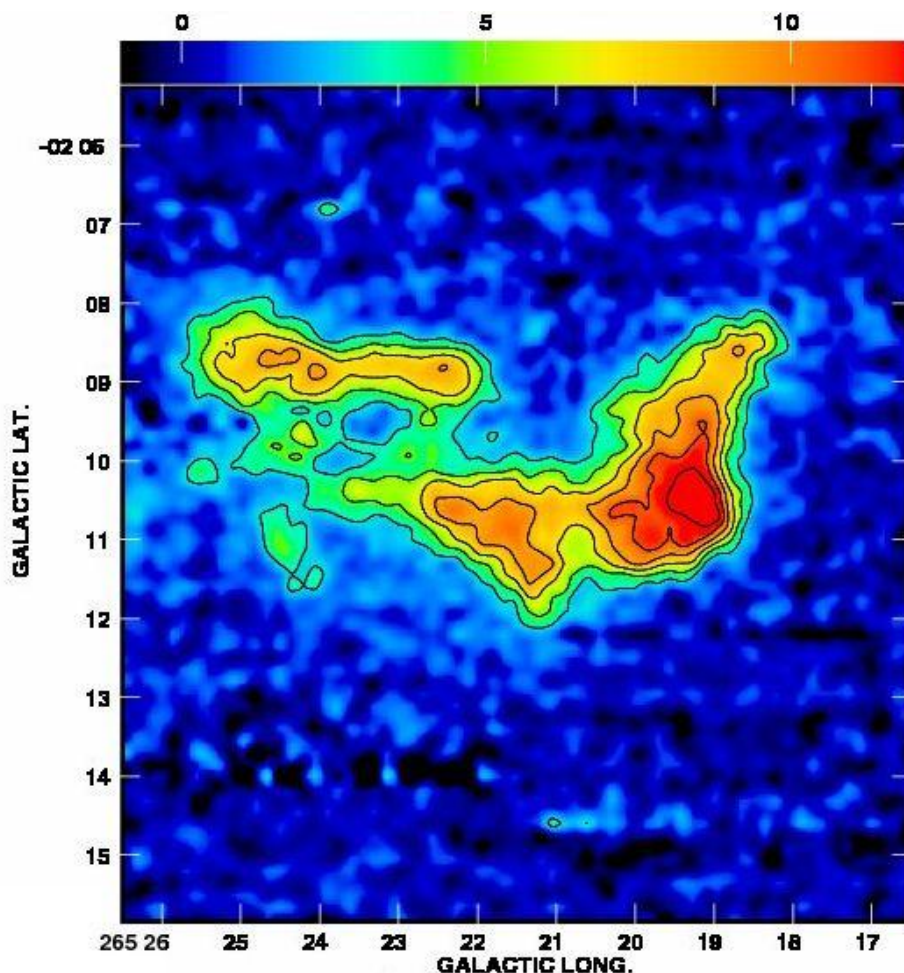


Figura 2: Representación en colores de la distribución espacial de la emisión de la molécula de ^{12}CO .

Además del Dr. Arnal participan de éste proyecto de investigación los Dres. César. Caiafa, Silvina Cichowolsky, Mariela Cortu, Serge Pineault, Laura Suad y Juan Carlos Testori.

SOBRE EL AUTOR

El **Dr. E. Marcelo Arnal** es Investigador Principal de CONICET. Desde el año 2007 es Director del Instituto Argentino de Radioastronomía. Es autor de más de 190 artículos en revistas nacionales e internacionales, y 144 conferencias orales y presentaciones murales en Congresos Nacionales e Internacionales. Estas contribuciones han tenido un poco más de 1960 citas. También ha tenido a su cargo el dictado de 52 conferencias de divulgación y la publicación de 7 artículos de la misma índole. Dirigió y codirigió 16 Tesis Doctorales y de Licenciatura; dirigió 18 Becas de Entrenamiento, Doctorales, y Postdoctorales; y tuvo a su cargo la dirección de investigadores.

Notas:

- 1) El **medio interestelar** es el contenido de materia y energía que existe entre las estrellas que constituyen una galaxia.
- 2) **Fragmentación** es el proceso por el que una nube molecular se "rompe" en componentes de menor tamaño.
- 3) **Una asociación estelar** es un conjunto de estrellas, en general algunas son de alta masa, que se encuentra caracterizada por una unión gravitacional muy débil entre sus miembros. Esta atracción gravitacional es menos intensa que aquella que sufren las estrellas miembros de los denominados cúmulos abiertos y cúmulos globulares.
- 4) Una **onda de choque** es una onda de presión abrupta producida por un objeto que viaja más rápido que la velocidad del sonido en dicho medio, que a través de diversos fenómenos produce en el material alcanzado por la onda de choque: a) diferencias de presión extremas; b) un aumento de la temperatura; y c) una modificación del estado dinámico del gas. La onda de presión se desplaza como una *onda de frente* por el medio.
- 5) Una estrella se define como de **alta masa**, cuando su masa es mayor a ocho (8) veces la masa de nuestro Sol.
- 6) La masa de las estrellas varía, siendo las más abundantes las de baja masa y menos comunes las de alta masa. La forma en la que el número de estrellas varía con la masa se denomina **función de masa**, o **espectro de masas**.
- 7) Se denomina **protoestrella** al periodo de evolución de una estrella desde su nacimiento en una nube molecular, hasta que la misma alcanza la denominada secuencia principal en el diagrama de Hertzsprung-Russell. En este contexto, protoestrella es una estrella en formación.
- 8) Un **parsec** es una medida de distancia y se define como la distancia a la que hay que alejarse del Sol, para que el radio de la órbita terrestre alrededor del Sol subtienda un ángulo de un segundo de arco (1") (unas 1800 veces menor que el tamaño de la Luna Llena). Esa distancia (el parsec) es equivalente a 3,26 años-luz. Visto desde otro punto de vista, un parsec es aproximadamente igual a unos 30,9 billones de kilómetros.
- 9) El sistema de **coordenadas galácticas** es un sistema de coordenadas celestes centrada en el Sol y alineada con el centro aparente de la Vía Láctea. El "ecuador" está alineado con el plano de la galaxia. El sistema de referencia gira con el Sol alrededor de la galaxia. Las coordenadas son la longitud galáctica (l) y la latitud galáctica (b). La **longitud galáctica** se mide sobre el plano de la misma, en sentido contrario a las agujas del reloj a partir de la línea que une al Sol con el centro de la galaxia ($0^\circ \leq l \leq 360^\circ$). La **latitud galáctica** es el ángulo que forma el objeto con el plano de la galaxia. Se mide en grados positivos al norte y negativos al sur ($-90^\circ \leq b \leq 90^\circ$).

Si quiere buscar los artículos referenciados visite la web del ADS:

http://adswww.harvard.edu/abstract_service.html