

Supercáscaras de hidrógeno neutro

Dr. E. M. Arnal

Entre las estrellas que componen una galaxia como la Vía Láctea existe un medio, denominado medio interestelar, que puede encontrarse bajo una variedad de condiciones físicas. Quizás el componente más conocido de este medio interestelar es el denominado polvo interestelar, que formado por pequeñas partículas con mezclas de constituyentes de carbón y silicio, es el responsable del denominado enrojecimiento de la luz de las estrellas. Por este fenómeno, la intensidad que se observa de la luz de las estrellas es inferior a la que se observaría (o sea que se serían más brillantes) si estas partículas no se encontraran presentes. En términos generales puede decirse que cuando más alejada se encuentre una estrella del Sol, su luz se verá más debilitada (o sea que será más difícil de observar) por este fenómeno. Estas partículas son también responsables de cierta polarización¹ que podría observarse en la luz de las estrellas. Otro de los constituyentes del medio interestelar es el denominado gas interestelar. Como su nombre lo indica está formado por gases, los que pueden encontrarse en estado neutro o ionizado². En estado neutro este gas puede encontrarse bajo la forma atómica o molecular. En su estado atómico, el 92% del gas es hidrógeno (HI), mientras que en su estado molecular el que más abunda es el hidrógeno molecular (H₂).

El estudio a gran escala de las propiedades físicas del gas atómico del medio interestelar comenzó a realizarse con el advenimiento de la Radioastronomía. Mediante el uso de antenas y de equipo electrónico sofisticado, a principios de los años 1950 se detectó por primera vez la radiación emitida por el átomo de hidrógeno del medio interestelar. Esta radiación es emitida en la frecuencia de 1420.4 MHz (equivalente a una longitud de onda de aproximadamente 21 cm.). Con el correr del tiempo estas observaciones permitieron conocer varias características físicas y dinámicas de este gas. En este sentido, se encontró que el HI se encuentra concentrado en grandes estructuras que tiene la forma de brazos en forma de espiral; que en la parte interna (dentro de los 15.000 pc³ del centro de la Vía Láctea) el HI se encuentra distribuido en una capa plana (que define el llamado plano galáctico) con un espesor típico de unos 220 pc y que más allá de esa distancia (de los 15.000 pc!) dicha capa se aleja de ese plano de simetría y se ensancha enormemente (ver Figura 1). También se pudo determinar que la densidad promedio del gas atómico ronda un átomo de HI por centímetro cúbico (1 át/cm³), que la temperatura de dicho gas es del orden de -190 C, que la estructura de brazos en espiral rota como un cuerpo no rígido⁴ (ver Figura 2) alrededor del Centro de la Galaxia, y que a la distancia del Sol al centro de la Galaxia (unos 8.500 pc lo que es equivalente a unos 27.700 años-luz) la velocidad de rotación alrededor de ese centro es del orden de unos 220 km/seg.

Análisis de las bases de datos de hidrógeno neutro obtenidas con los radiotelescopios, mostraron que la distribución espacial del átomo de hidrógeno no es homogénea, sino que presenta estructuras de muy diversas formas y dimensiones. Entre las estructuras más espectaculares que puedan detectarse en el medio interestelar de una galaxia se encuentran las denominadas supercáscaras de hidrógeno neutro. Los trabajos

pioneros en este campo fueron llevados a cabo por el astrónomo estadounidense Carl Heiles (Astrophysical Journal, año 1979, vol. 229, pág. 533; Astrophysical Journal Sup. Series, año 1984, vol. 55, pág. 585) entre fines de la década de los años setenta y mediados de la década de los años ochenta del siglo pasado. En general estas estructuras son observadas en un rango dado de velocidades radiales⁵ como una zona del cielo que presenta un mínimo en la emisión de hidrógeno neutro que se encuentra rodeado por zonas de mayor emisividad (ver Figura 1). Estas últimas (las zonas de mayor emisividad) en general poseen una forma elipsoidal con ejes mayores y menores de varios centenares de pársec. Hasta el momento se han detectado en la Vía Láctea un poco más de un centenar de estas estos objetos.

En un inicio, la génesis de estas enormes estructuras parecía ser sólo la acción conjunta de vientos estelares de estrellas de gran masa (aquellas cuyas masas son al menos unas ocho veces superior a la masa del Sol) y la ulterior explosión de supernova que dichas estrellas inexorablemente sufren. Una primera teoría de los fenómenos que podrían ocurrir en el medio interestelar como consecuencia de los vientos estelares fue desarrollada por varios grupos de investigadores (Weaver y col, Astrophysical Journal, año 1977, vol. 218, pág. 377 y referencias ahí citadas). Es importante destacar que el viento estelar es inyectado en el medio interestelar a una velocidad de varios centenares (incluso miles) de kilómetros por segundo. En estas condiciones se genera en el medio interestelar una onda de choque⁶ que desplaza todo el gas del medio interestelar que se encuentra en las cercanías de la estrella. A medida que este gas se mueve, atrás de la onda de choque queda gas calentado a millones de grados y con muy baja densidad. El gas “barrido” por la onda de choque se acumula en una cáscara que se expande a velocidades muy elevadas al inicio de la expansión. Haciendo uso de ciertas hipótesis (viento estelar isotrópico, medio interestelar homogéneo, la estrella se encuentra en reposo, el medio interestelar no ejerce oposición a la expansión de la cáscara de gas) se encuentran ecuaciones que permiten conocer en todo instante el radio de la estructura en expansión, la velocidad de expansión, y la edad de la misma. En el caso de los vientos estelares las ecuaciones son,

$$R(t) = 27 L_w^{1/5} n_o^{-1/5} t^{3/5} \text{ (pc)}$$

$$V_{\text{exp}} = 17 L_w^{1/5} n_o^{-1/5} t^{-2/5} \text{ (km/seg)}$$

Donde L_w es la luminosidad (expresada en unidades de 10^{36} erg/seg) inyectada al medio interestelar en forma de viento, n_o (expresada en partículas por centímetro cúbico) es la densidad del medio interestelar y t (en unidades de millones de años) es la edad de la estructura. La luminosidad (L_w) se encuentra vinculada con la tasa de pérdida de masa de las estrellas (indicada por dM/dt) y la velocidad del viento estelar (indicada por v_w), mediante la ecuación $L_w = 0.5 dM/dt v_w^2$.

Si las explosiones de supernova fuesen responsables de la expansión de las supercáscaras, también se podrían encontrar ecuaciones matemáticas que describan como varían con el tiempo el radio, la velocidad de expansión y la edad de las mismas. Cabe mencionar que las ecuaciones matemáticas para ambos fenómenos (vientos

estelares y explosiones de supernova) no son iguales, y predicen valores para los distintos parámetros (dimensiones, velocidades de expansión y edades) de las supercáscaras que pueden diferir en forma apreciable. Haciendo uso de las ecuaciones derivadas de las distintas teorías, se ha encontrado que las edades de las supercáscaras varían entre uno y veinte millones de años. Pero, (¡siempre existe un pero!) si se comparan las dimensiones observadas con las predichas por la teoría se encuentra que las observadas son siempre más pequeñas que lo que tendrían que ser. Esta diferencia se denomina la discrepancia edad-tamaño, y son varias las causas (por ejemplo: tasas de pérdida de masa inferiores a las actualmente aceptadas; oposición del gas del medio interestelar a la expansión de las estructuras; densidad del medio interestelar superior; etc.) que podrían originar la misma.

A partir de las ecuaciones anteriores, se podría derivar la cantidad de energía mecánica que sería necesario inyectar al medio interestelar bajo la forma de vientos estelares, a los efectos de originar una estructura que tenga cierto diámetro. Haciendo este cálculo se encuentra que para formar algunas de las estructuras más grandes se necesitaría una enorme cantidad (centenares y a veces miles) de estrellas de gran masa, todas ubicadas en un volumen del espacio relativamente pequeño (¡comparado con las dimensiones de la estructura!). Dado que esos agregados de centenares (o miles) de estrellas de gran masa no son comunes en nuestra Galaxia, diversos grupos de investigación han pensado en fenómenos físicos alternativos para explicar el origen de las estructuras de mayores dimensiones. A respecto cabe mencionar fenómenos tales como las explosiones de rayos gamma (Perna & Raymond, *Astrophysical Journal*, año 2000, vol. 539, pág. 706) y las colisiones de nubes de alta velocidad⁷ con el material del plano galáctico (Tenorio-Tagle, *Astronomy & Astrophysics*, año 1981, vol. 94, pág. 338). Por razones de espacio, no nos podemos extender en los procesos recién mencionados.

Aunque las estructuras son espectaculares por los tamaños que alcanzan y por las energías involucradas en su creación, ¿cuál es la importancia de su estudio? Hemos mencionado que las dimensiones que pueden alcanzar son de varios centenares de pársec. Esto implica que sus tamaños son mucho más grandes que el espesor medio de la capa del HI en nuestra Galaxia. En este caso, cuando la estructura alcanza dimensiones comparables al espesor de la capa de HI, se producen ciertos fenómenos físicos (que no es posible explicar en este espacio) que aceleran aquellas partes más alejadas del plano galáctico, provocando que las mismas se “fracturen” y dejen escapar por esas “fracturas” el gas caliente que se encuentra en su interior. Este gas caliente, que ha sido enriquecido en metales pesados originados en el interior de las estrellas y liberados al medio interestelar por los vientos, es inyectado en el denominado halo galáctico (material que rodea hasta grandes distancias al centro y al plano de las galaxias). Esto no sólo origina una modificación de contenido de metales en una región dada, sino que también modifica las condiciones dinámicas prevalecientes en el material del halo galáctico antes de que se produjese la “inyección” por las “fracturas” mencionadas anteriormente del gas caliente enriquecido químicamente. Otro fenómeno que pueden originar es la formación de nuevas generaciones de estrellas. En efecto, si durante la

expansión de las cáscaras de HI se dan en la misma las condiciones apropiadas, se podrían formar en estas estructuras que se expanden nuevas generaciones de estrellas. Alternativamente, si durante su expansión una supercáscara dada “colisiona” con una nube molecular⁸ ya existente, podría originarse en la misma la formación de nuevas estrellas. Al respecto cabe mencionar que haciendo uso de datos obtenidos con uno de los radiotelescopios del IAR, se ha encontrado una nueva supercáscara de HI (ver Figura 4) que parecería haber originado en el transcurso de su evolución la formación de la asociación de estrellas O y B⁹ denominada Bochum 7 (ver Figura 3). Este último trabajo está siendo realizado por los Drs. Arnal y Corti, ambos pertenecientes al IAR.

En resumen, el medio interestelar de una galaxia como la Vía Láctea es asiento de una plétora de fenómenos físicos que, muy probablemente, se originan en la acción de las estrellas sobre el medio interestelar. Esta interacción, además de originar estructuras espectaculares, modifica las condiciones físicas originalmente imperantes en el medio interestelar, y puede dar origen a nuevas generaciones de estrellas.

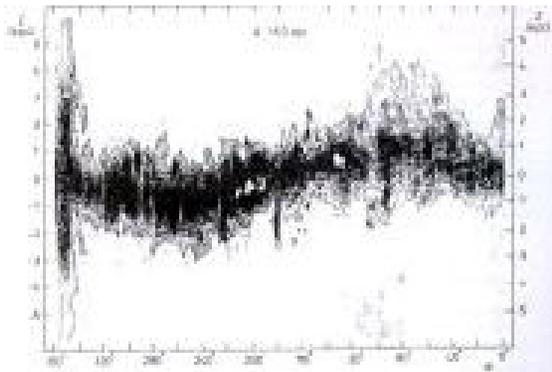


Fig. 1 - Distribución espacial del hidrógeno atómico a una distancia de 16kpc del centro de la galaxia. Las ordenadas indican distancias (en unidades de kiloparsecs, 1 kpc = 1000 pc). Nótese que el gas no se encuentra concentrado alrededor de $z=0$ kpc, sino que presenta una distribución que en algunos puntos se aparta bastante de $z=0$. Esos apartamientos son interpretados como un alabeo del plano de simetría. El eje de las abcisas indica, en forma aproximada, la longitud galáctica (l). El centro galáctico se encuentra hacia $l=0^\circ$ (ó $l=360^\circ$) y el anticentro en la dirección $l=180^\circ$.

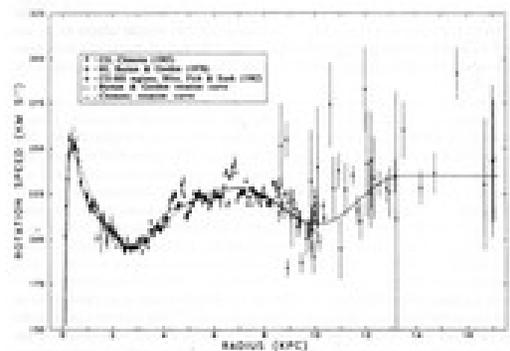


Fig. 2 - Curva de rotación de la galaxia. Dicha curva ha sido derivada a partir de observaciones de monóxido de carbono (CO) y de hidrógeno neutro (HI). Los puntos corresponden a observaciones (los errores en la velocidad de rotación están dados por las barras verticales asociadas a cada punto). La línea continua y la línea de trazos representan ajustes de modelos a las observaciones. El eje de las abcisas indica distancias (en unidades de kpc) al centro galáctico ($R=0$). El Sol se encuentra a $R=8.5$ kpc

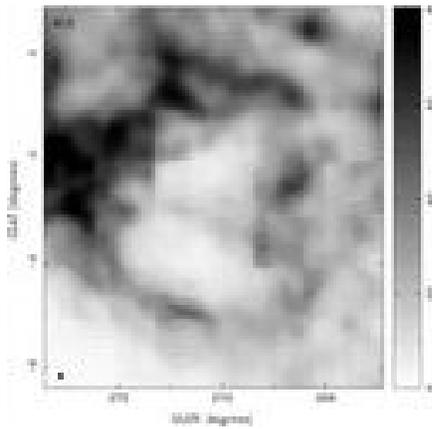


Fig. 3 - Ejemplo de una supercáscara de HI. Las zonas color gris oscuro representan regiones con mayor emisión de hidrógeno. Como puede apreciarse, las supercáscaras no son regulares y distan mucho de ser uniformes. Los ejes coordenados indican coordenadas galácticas.

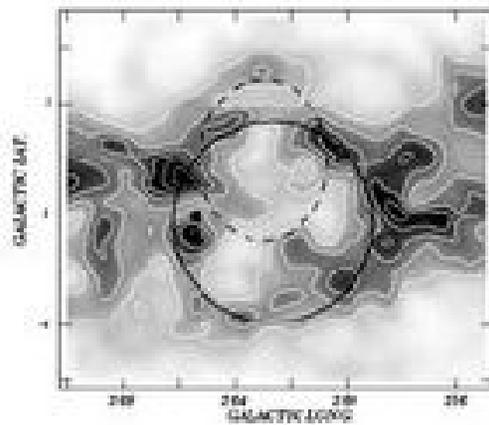


Fig. 4 - Supercáscara GS263-02+45 descubierta en el IAR. Las coordenadas galácticas, longitud y latitud (h) del centro de la estructura son $l=263^\circ$ y $b=-2^\circ$. La velocidad radial central de la misma es de 45km/seg. La semicircunferencia de trazo continuo representa una idealización de la forma de la supercáscara GS263-02+45. La elipse con trazos indica la ubicación de otra supercáscara. La ubicación de la asociación estelar Bochum 7 se encuentra indicado en el punto lleno ubicado en las proximidades de $(l,b)=(265.5,-2)$

¹ La intensidad de la luz que incide sobre un elemento receptor varía según el ángulo de posición con el que se observe la luz.

² En general los átomos son eléctricamente neutros. En términos simples puede decirse que la carga positiva del núcleo es balanceada por la carga negativa de los electrones. Ciertos procesos “arrancan” electrones de los átomos. Cuando eso sucede se dice que el átomo está ionizado.

³ Un pársec es una distancia equivalente a 3,26 años-luz. Un año-luz es la distancia que recorre la luz, viajando a casi 300.000 km/seg, durante un año. Esa distancia equivale a 9,45 billones de kilómetros.

⁴ En un cuerpo que rota en forma rígida, la velocidad tangencial de rotación en un punto dado es directamente proporcional a la distancia de ese punto al centro de rotación. Eso no sucede en el caso de un cuerpo no rígido.

⁵ La velocidad con la que un cuerpo se acerca o se aleja de un observador.

⁶ Una onda de choque se produce cuando una perturbación se propaga en un medio dado con una velocidad superior a la velocidad del sonido en ese medio.

⁷ Las nubes de alta velocidad son objetos constituidos principalmente por hidrógeno atómico, y que no participan del movimiento de rotación alrededor del centro de la galaxia, como lo hace la mayoría del gas. El origen de estos objetos es controvertido.

⁸ Objetos presentes en el medio interestelar constituidos principalmente por compuestos moleculares (de ahí deriva su nombre) y partículas de polvo.

⁹ Las estrellas del Universo se encuentran clasificadas en tipos espectrales. Los tipos O y B corresponden a las estrellas de gran masa.
