



Proyecto Académico con el Radio Telescopio de NASA en Robledo

[Página principal](#) [El proyecto y sus objetivos](#) [Cómo participar](#) [Cursos de radioastronomía](#) [Material](#) [Novedades](#)

CURSO DE INICIACIÓN A LA RADIOASTRONOMÍA

[Índice](#) [Introducción](#) [Capítulo 1](#) **[Capítulo 2](#)** [Capítulo 3](#) [Capítulo 4](#) [Capítulo 5](#) [Capítulo 6](#)

© LAEFF-INTA, Madrid 2003

CAPÍTULO 2

Fuentes de ondas de radio I: medio interestelar

1. Nuestro punto de observación

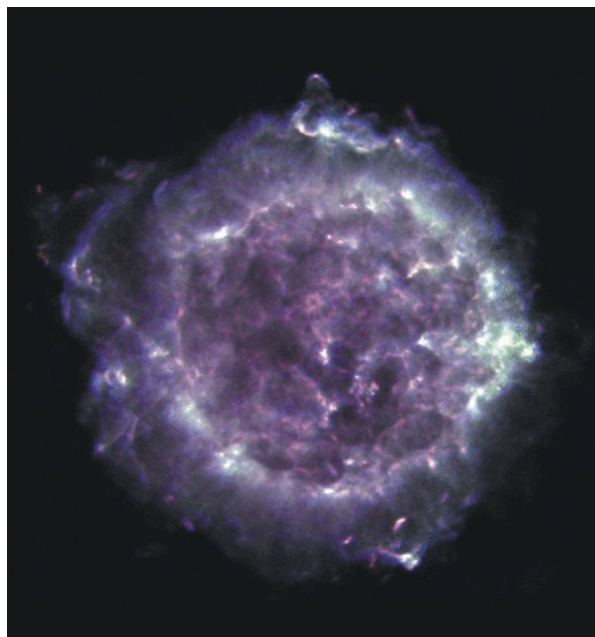
2. El medio interestelar

2.1 Regiones de gas atómico (HI)

2.2 Regiones de gas molecular

2.3 Regiones de gas ionizado

2.4 El equilibrio de fase en el medio interestelar



*Resto de supernova en Cassiopea A
Cortesía de NRAO/AUI*

1. Nuestro punto de observación

Antes de empezar a ver qué tipo de objetos del Universo podemos estudiar mediante radiotelescopios, deberíamos comprender desde qué lugar estamos realizando las observaciones.

La Tierra es parte del Sistema Solar, un sistema planetario compuesto por nueve planetas y varios miles de cuerpos menores (asteroides y cometas). Salvo Plutón, todos los planetas del sistema solar giran en torno al Sol aproximadamente en un plano (el plano de la eclíptica).

El Sistema Solar está dentro de una galaxia llamada Vía

Láctea. Muchas de las estrellas y del gas que componen nuestra galaxia se encuentran también aproximadamente en un plano (el *plano galáctico*). Hacia el centro encontramos una zona más o menos esférica (el *bulbo*). Así que la Vía Láctea tiene un aspecto parecido a un huevo frito. Las estrellas más jóvenes se encuentran casi siempre en el plano galáctico. Rodeando todo este sistema plano-bulbo encontramos una región también esférica, con una densidad mucho menor de estrellas: el *halo*. Las estrellas del halo son mucho más viejas; muchas de ellas podrían aún ser de la primera generación de estrellas de nuestra galaxia.

Nuestro Sistema Solar se encuentra en el plano galáctico, a unos 30 000 años luz (8500 parsec, ó 8.5 kiloparsec) del centro. (El *parsec* es una unidad utilizada en astronomía que equivale a 3.26 años luz. Un objeto está situado a un parsec de distancia de la Tierra, cuando su paralaje es un segundo de arco, es decir, cuando la diferencia en su posición respecto a las estrellas tan lejanas que se consideran fijas, al observar ese objeto con 6 meses de diferencia, es de un segundo de arco.)

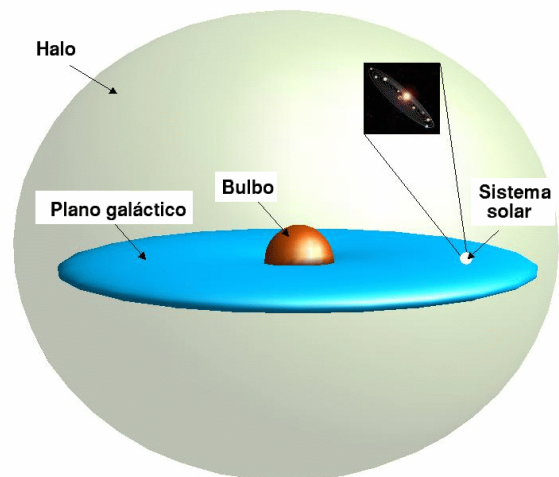


Fig.2.1. Posición del sistema solar dentro de la galaxia



2. El medio interestelar

El espacio entre las estrellas y galaxias no está vacío. Gran parte de la materia del Universo no forma parte de estrellas, por lo que es difícil de ver mediante telescopios ópticos. Este "medio interestelar" es gas que, con mayor o menor densidad, llena todo el cosmos conocido. En nuestra galaxia, constituye un 1% de la masa total.

La materia del Universo está compuesta, en su mayor parte, por hidrógeno. Un 90% de los átomos (que suponen un 70% de la masa total) son de este elemento. Del otro 10%, prácticamente todos son átomos de helio. El resto de los elementos apenas pasan de ser meras "anécdotas", a pesar de su evidente importancia para nuestra vida cotidiana. El medio interestelar no es una excepción y está también compuesto mayoritariamente por hidrógeno. Este hidrógeno interestelar puede encontrarse en tres estados: atómico, molecular e ionizado (ver figura 2.2.)

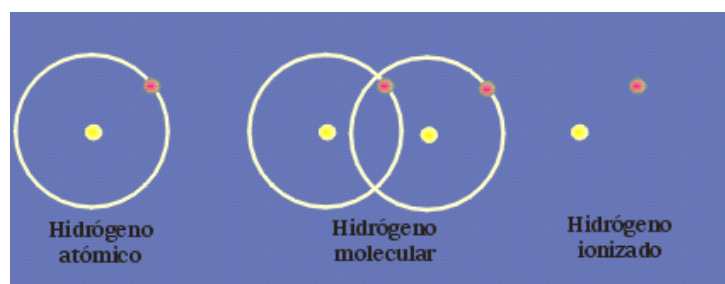


Fig.2.2. Hidrógeno atómico (a), molecular (b), ionizado (c)

El *hidrógeno atómico* está compuesto por átomos aislados, cada uno de los cuales consiste en un electrón ligado a un núcleo de hidrógeno (es decir, a un protón). En Astronomía se designa este estado como HI. En esta nomenclatura, el número romano designa el estado de ionización: I representa el estado neutro.

El *hidrógeno molecular* se encuentra en forma de moléculas: dos átomos de hidrógeno ligados entre sí. La molécula de hidrógeno se designa como H₂.

En el *hidrógeno ionizado*, los protones y los electrones se encuentran libres, formando lo que se llama un *plasma*. Este estado del hidrógeno se designa HII, es decir, el segundo estado de ionización, en el que el átomo pierde uno de sus electrones. Como el hidrógeno neutro no posee más que un electrón, este elemento no puede ya tener un tercer estado de ionización (que significaría haber perdido dos electrones, cosa que sí puede ocurrir con otros elementos).

La Radioastronomía nos proporciona las herramientas más adecuadas para estudiar en detalle estos tres estados del hidrógeno en el medio interestelar.

A pesar de que estamos llamando "medio interestelar" precisamente a la materia que no forma parte de las estrellas, este medio está íntimamente relacionado con el origen y el destino de éstas. Las estrellas no son algo estático, como uno se podría imaginar. A lo largo de su vida van pasando por diferentes etapas, desde el momento de su nacimiento como tales, cuando comienzan sus reacciones nucleares, hasta el tiempo en el que estas reacciones terminan y la estrella finaliza su vida apagándose.

El medio interestelar se puede ver como el eslabón que enlaza la última fase de una estrella con las razones de su formación. La muerte de una estrella, en la mayoría de los casos, pasa por la expulsión de su material al medio que la rodea, ya sea como supernova (ver **capítulo 3, sección 3.1**) o como nebulosa planetaria (ver **capítulo 3, sección 3.2**). Este material expulsado pasará a formar parte del medio interestelar. A su vez, este medio es la materia prima de la que se formará la siguiente generación de estrellas y planetas. Resulta curioso pensar que la materia que forma nuestros propios cuerpos fue alguna vez parte de una estrella que murió hace millones de años. *Todos los elementos*, excepto el hidrógeno y el helio, son productos que se crearon a partir de reacciones nucleares en estrellas.

En general, en el medio interestelar podremos encontrar gas (mayoritariamente hidrógeno, con una pequeña parte de otros elementos) y partículas sólidas (polvo). La cantidad de polvo es mucho menor que la de gas (sólo constituye un 1% de la masa total) pero es importante también para la evolución del medio y para la forma en que podemos estudiarlo.

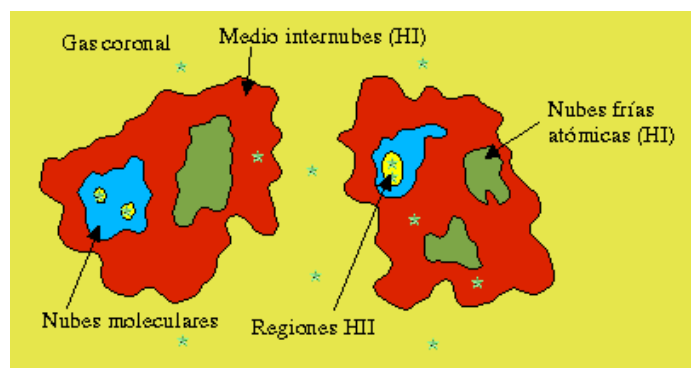


Fig.2.3. Medio interestelar



Según el estado en el que se encuentra el hidrógeno, el medio interestelar se organiza en diferentes fases (Fig 2.3):

2.1. Regiones de gas atómico (HI)

Son regiones compuestas principalmente por hidrógeno neutro atómico (HI), aunque pueden existir también algunos iones de baja excitación (CII, CaII). El gas atómico en la Galaxia podemos encontrarlo de dos formas:

- *Nubes frías atómicas:*

Con temperaturas entre 50 y 100 K, y densidades del orden de 50 partículas por cm^3 .

- *Gas internubes:*

Menos denso (~ 0.5 partículas por cm^3) y más caliente (5000 K) que las nubes de gas atómico. Este gas internube ocupa aproximadamente la mitad de todo el volumen de la Galaxia.

En total, el gas atómico (nubes frías + gas internubes) constituye la mitad de la masa del medio interestelar galáctico.

El gas atómico se estudia fundamentalmente mediante la línea de 21 cm del hidrógeno, de la cual se ha hablado en el **Capítulo 3** del curso de "Fundamentos físicos de radioastronomía".

La importancia de esta línea radica en que

permite el estudio de zonas de la Galaxia completamente invisibles en el rango óptico. Su existencia fue predicha por Van de Hulst en 1945 a instancias de Oort. Buscaban una transición en radio del átomo de hidrógeno, por ser el elemento más abundante del Universo. La idea era utilizar el *desplazamiento Doppler* (ver **Capítulo 4** del curso de Fundamentos Físicos de Radioastronomía) de esta línea para estudiar el comportamiento de las nubes de gas dentro de la galaxia, y poder así calcular su distancia y hacer un mapa de su distribución.

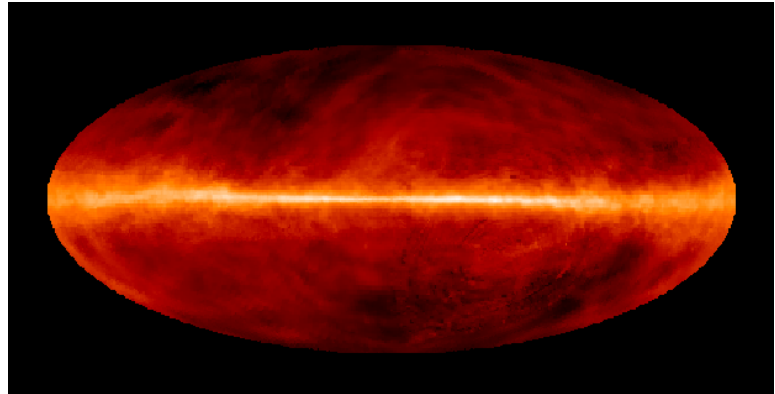


Fig.2.4. Imagen de la galaxia en la línea de HI (21 cm). Cortesía de J. Dickey (UMn), F. Lockman (NRAO), SkyView.

En la figura 2.4. vemos un mapa de la Galaxia tomado en la línea de HI, a 21 cm. En este mapa no se ven estrellas, sino que se aprecia el gas atómico, que se concentra fundamentalmente en el plano galáctico.

Esta componente atómica del medio interestelar es tan abundante que, cuando sintonizamos un radiotelescopio en la frecuencia de la línea de 21 cm, siempre detectaremos emisión, no importa donde apuntemos, aunque la emisión más intensa se concentre en el plano galáctico. Esto complica las observaciones, puesto que se recibe una emisión significativa de los lóbulos secundarios de la antena (ver **Capítulo 5**), es decir, de direcciones bastante alejadas de la dirección de apuntado. En la práctica, esto introduce "ruido" en las observaciones de HI, que limita la sensibilidad que se puede alcanzar.

La línea de HI se emite a una frecuencia determinada (1420.4 MHz) en el sistema de referencia del átomo de hidrógeno, es decir, si consideramos que el hidrógeno está en reposo. Sin embargo, si los átomos emisores se mueven respecto a nosotros, veremos pequeñas variaciones en la frecuencia de la línea que recibimos, debidas al **efecto Doppler**. Por lo tanto, veremos la línea de hidrógeno desplazada al rojo (a menor frecuencia) si la nube de gas atómico se aleja de nosotros y desplazada al azul (mayor frecuencia) si se acerca. Es decir, podemos estudiar los movimientos de las nubes de gas atómico en nuestra galaxia mediante el desplazamiento Doppler en la línea de HI en 21 cm. Por ejemplo, de qué forma el material de la Galaxia gira en torno al centro, en función de la distancia a éste (Fig 2.5).

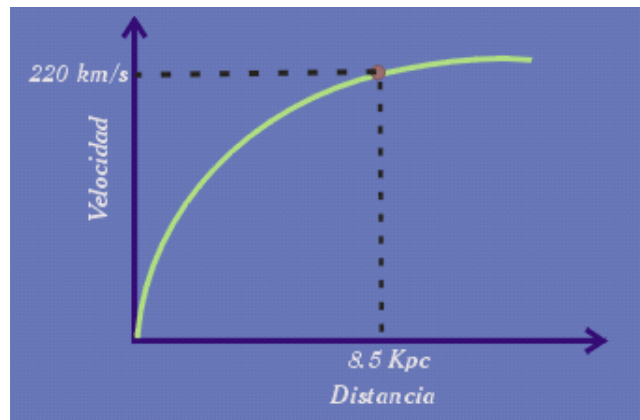


Fig.2.5. Curva de rotación de la Galaxia, en la que se indica el movimiento del Sol en torno al centro de ésta.



2.2. Regiones de gas molecular

En las imágenes ópticas de nuestra galaxia se observan zonas aparentemente más vacías de estrellas que el resto del cielo, como se puede ver en la figura 2.6. Lo que ocurre en realidad es que existen nubes oscuras que nos impiden ver las estrellas que hay detrás. Estas nubes están compuestas por gas molecular y polvo (este último es el responsable del oscurecimiento de la luz visible). Las nubes moleculares son más frías (10-30 K) y densas (10^3 - 10^5 partículas por cm^3) que las de hidrógeno atómico.

Aunque en las condiciones de la Tierra dos átomos de hidrógeno se combinan con rapidez para formar una molécula, en el medio interestelar este proceso no es tan inmediato. Si la densidad de un gas es muy baja, es muy



Fig.2.6. Imagen óptica de la Vía Láctea

improbable que dos átomos de hidrógeno se acerquen lo suficiente como para que se produzca su enlace y se forme una molécula. No es imposible, pero el proceso es demasiado lento como para producir las grandes nubes de gas molecular que observamos. Tengamos en cuenta que, incluso en las nubes de gas denso, la densidad de partículas es mucho menor que la del mayor "vacío" que se puede obtener en la Tierra mediante bombas de vacío. Se piensa que la formación de moléculas de hidrógeno en el espacio utiliza los granos de polvo como catalizador de la reacción: si los átomos de hidrógeno se adhieren al grano de polvo y permanecen cierto tiempo, es más fácil que dos de ellos se enlacen.

Las nubes moleculares constituyen el 50% de la cantidad total de masa del medio interestelar de la Galaxia, aunque ocupan menos del 1% del volumen. Estas nubes son muy importantes, porque en su seno se forman las estrellas (como veremos en el capítulo 3). Y es precisamente con observaciones radioastronómicas como mejor podemos estudiar la formación estelar, por la absorción que el polvo produce sobre la luz visible.

Ya hemos visto lo útil que resulta estudiar el hidrógeno atómico mediante su emisión de línea en 21 cm. Desafortunadamente, no existe una línea equivalente que nos permita observar el hidrógeno molecular. Las líneas moleculares que se pueden observar en radio suelen ser transiciones entre distintos estados de rotación. Pero sólo las moléculas con un momento dipolar significativo pueden emitir estas líneas rotacionales. No es el caso del hidrógeno que, al ser una molécula formada por dos átomos idénticos, no tiene momento dipolar neto. Esta molécula sí puede emitir líneas vibracionales (transiciones entre diferentes estados de vibración) en el infrarrojo. Sin embargo, se requiere mucha energía para excitar estas transiciones, por lo que sólo se producen en las zonas más cercanas a las estrellas en formación.

Para poder estudiar adecuadamente el gas de las nubes moleculares hay que recurrir a otras moléculas, mucho menos abundantes que el hidrógeno, pero que sí tengan momento dipolar. La molécula más abundante después del H_2 es el monóxido de carbono (CO). Su abundancia relativa es de una molécula de CO por cada diez mil de H_2 . Las transiciones rotacionales de CO se observan en longitudes de onda milimétricas.

En la fig 2.7 se puede ver un mapa de nuestra galaxia en CO. En este mapa estamos viendo las nubes moleculares de la Galaxia, es decir, las zonas en las que pueden estar formándose nuevas estrellas. Vemos que, como en el caso del gas atómico, el gas molecular se concentra en el plano galáctico.

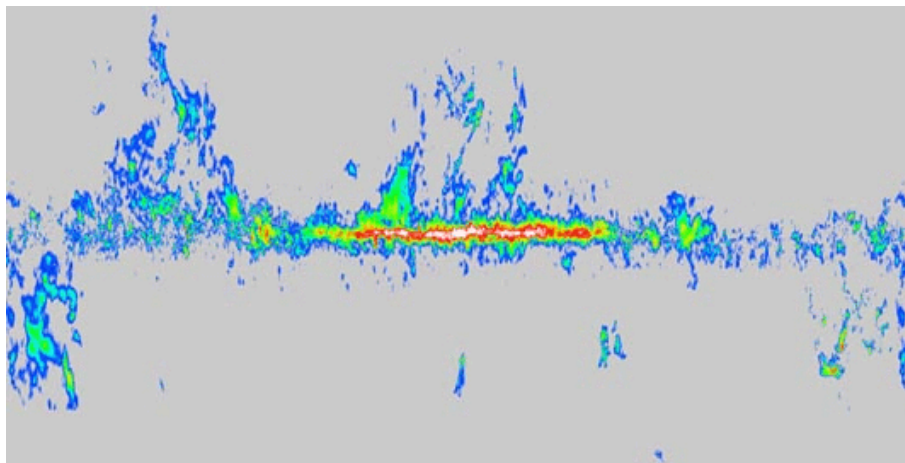


Fig.2.7. Emisión de nuestra galaxia en CO.
Cortesía de T. Dame (CfA, Harvard) et al., Columbia 1.2-m Radio Telescopes

El utilizar moléculas diferentes del hidrógeno, tiene sus ventajas, porque cada una de ellas nos puede proporcionar distintas informaciones (Fig. 2.8). Algunas, como el NH_3 o el CS, trazan regiones de gas denso (más de 10^4

moléculas de hidrógeno por cm^3). De esta forma, se pueden conocer las regiones de mayor densidad dentro de una nube, que pueden ser el foco de formación de nuevas estrellas. El CO puede emitir en zonas de menor densidad y además, suele ser una buena herramienta para determinar la temperatura y sus variaciones dentro de la nube.

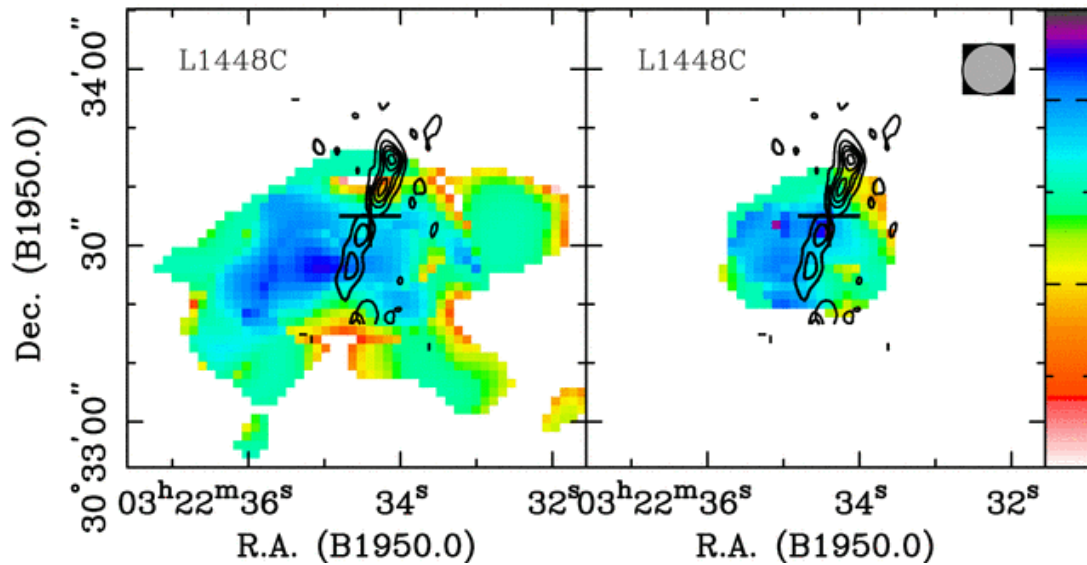


Fig.2.8. Mapas de emisión de diferentes moléculas y transiciones en la región de L1448. En color, emisión de NH_3 (amoníaco) en dos niveles de energía (el mapa de la derecha corresponde a una energía superior). En contornos, emisión de SiO (monóxido de silicio). La cruz en el centro muestra la posición de una estrella en formación. Cortesía de Salvador Curiel, UNAM, México



2.3. Regiones de gas ionizado

Podemos encontrar hidrógeno ionizado (HII) en dos tipos de regiones del medio interestelar: el gas coronal (situado entre las regiones de HI) y las regiones HII (situadas dentro de nubes moleculares).

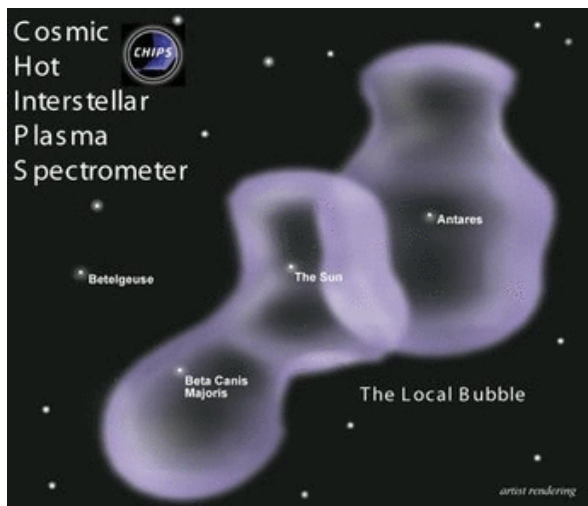


Fig.2.9. Representación de la Burbuja Local (Tomado del proyecto CHIPS, UC Berkeley).

- Gas coronal:

Está compuesto por gas ionizado de baja densidad (menor de 0.01 partículas por cm^3) y muy alta temperatura (10^5 - 10^6 K). Se le da el nombre de "coronal" por analogía con la corona del Sol, que es también gas ionizado, poco denso y muy caliente. El gas coronal es ionizado y calentado por la explosión de supernovas y ocupa un 50% del volumen total de la Galaxia.

Sin ir más lejos, nuestro sistema solar parece estar encerrado en una burbuja de gas muy tenue (0.01 partículas/ cm^3) a un millón de K. Esta *burbuja local* (figura 2.9) tiene un radio de unos 100 pc y podría haberse formado por la explosión de una supernova, no muy lejos del Sol, hace unos 100 000 años. El gas ionizado de la burbuja local no es observable en radio, sino en rayos X, aunque su contorno puede delimitarse por la emisión de 21 cm del gas atómico que la rodea.

-Regiones HII

Las regiones HII se encuentran en el interior de nubes moleculares. Para que el hidrógeno molecular de estas nubes se ionice, tiene que haber cerca de ellas una fuente intensa de radiación ultravioleta, con una energía ($h\nu$) superior al potencial de ionización de hidrógeno (13.6 eV ó $2.2 \cdot 10^{-8}$ julios), es decir fotones ultravioleta con frecuencias

superiores a los 3 287 GHz (o longitudes de onda inferiores a 912\AA).

Los fotones ultravioleta causantes de esta ionización proceden de estrellas jóvenes y muy calientes. El Sol produce una cierta cantidad de fotones ionizantes, pero no podría formar una región HII a su alrededor si estuviese en el seno de una nube molecular. Para que una región HII pueda formarse, el número de átomos de hidrógeno que se ionizan (dejando un protón y un electrón libres) por segundo, debe ser igual o mayor al de electrones que se recombinan con un protón para volver a formar un átomo neutro. Esto sólo pueden conseguirlo estrellas de tipos espectrales O y de B0 a B4, que son las de mayor temperatura.

Cuanto mayor sea la tasa de fotones ionizantes emitidos, mayor será el tamaño de la región HII que se forma. Este tamaño "inicial" viene definido por el radio de Strömgren que, por ejemplo, para una estrella B0 es de unos 23 parsec. El radio de Strömgren no tiene en cuenta cómo evoluciona posteriormente el tamaño de la región HII.

Las regiones HII pueden estudiarse mediante la radiación de frenado (ver **capítulo 3, sección 1.2**, del curso de Fundamentos Físicos) o por la emisión de líneas de recombinación (ver **capítulo 3, sección 2.1** del curso de Fundamentos Físicos).

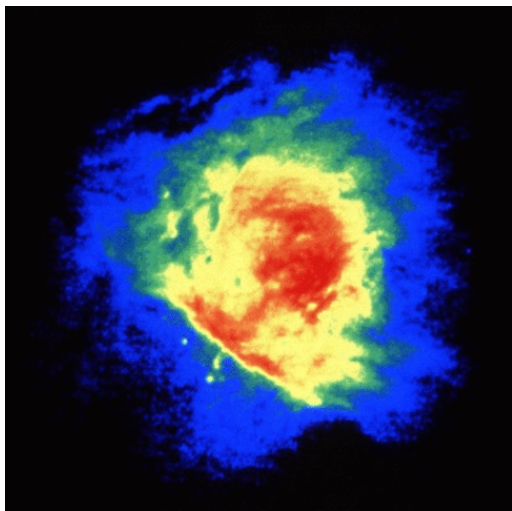


Fig.2.10. Imagen de la Nebulosa de Orión en radio, obtenida con el VLA (cortesía de NRAO-AUI)

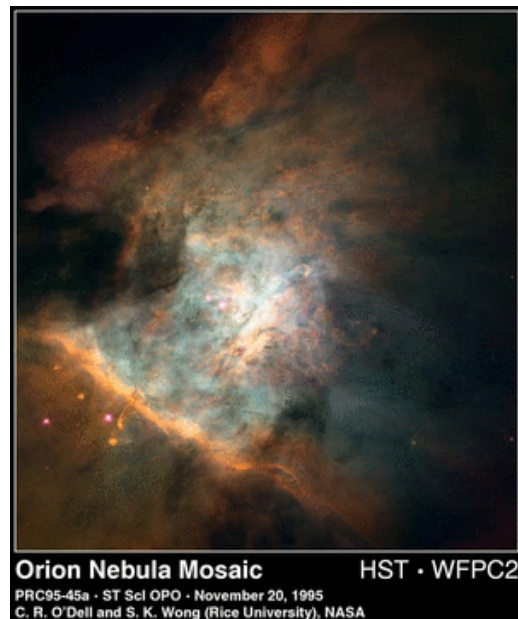


Fig.2.11. Imagen óptica de la misma región, tomada por el HST

La Nebulosa de Orión es una región de formación estelar activa, que contiene regiones HII fotoionizadas. En la figura 2.10 podemos ver una imagen en radio de su radiación de frenado. En la figura 2.11 podemos ver el aspecto en óptico de la misma región, en una imagen tomada por el Hubble Space Telescope.



2.4. El equilibrio entre las fases del medio interestelar

En la siguiente tabla se muestran las densidades y temperaturas de las distintas fases del medio interestelar:

Fase	Densidad (partículas/cm ³)	Temp (K)
nubes frías de HI	50	80
gas internubes	0.5	5 000
nubes		

moleculares	1 000	20
regiones HII	100	10 000
gas coronal	0.01	10^6

Si hacemos un pequeño cálculo de la presión utilizando la ley de gas ideal: $P=nkT$, (donde P es la presión, n la densidad, k la constante de Boltzman y T es la temperatura del gas), veremos que el gas coronal y el atómico tienen aproximadamente la misma presión. Estas fases, que son las que ocupan la mayor parte del volumen del medio interstelar parecen estar en equilibrio de presiones.

Sin embargo, las nubes moleculares tienen una presión superior. Por lo tanto, en principio puede parecer que una nube molecular debería expandirse hacia el medio que la rodea, con lo que tendríamos finalmente una nube más fría y menos densa, a la misma presión del gas coronal y de las nubes de HI. Sin embargo, esto no ocurre. Aunque la presión externa sea insuficiente para contenerlas, las nubes moleculares son autogravitantes. Esto quiere decir que son tan densas que su propia gravedad evita su expansión.

Las regiones HII poseen, a su vez, una presión superior a la de las nubes moleculares que las contienen. En este caso, las regiones HII no son autogravitantes. Cuando una de estas regiones se forma, comienza su expansión en la nube molecular y puede llegar a romper el borde de la nube y salir al exterior (Fig 2.12). El efecto sería algo parecido a lo que ocurre al abrir una botella de champán que ha sido agitada previamente. La nebulosa de Orión (Fig. 2.11) es un ejemplo de una de estas regiones HII que ha salido al exterior de la nube molecular. Esta expansión de regiones HII puede terminar por deshacer completamente las nubes moleculares.

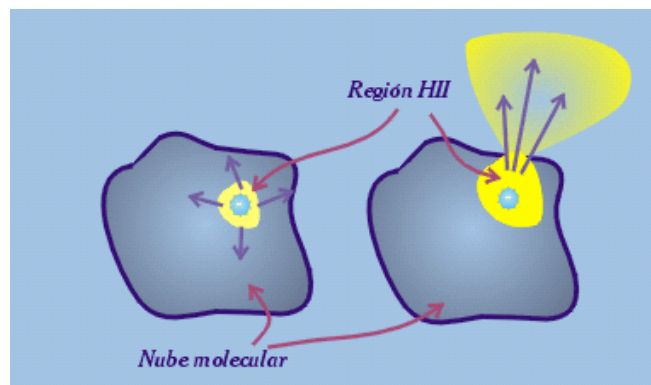


Fig.2.12. Una estrella masiva forma una región HII a su alrededor, que empieza a expandirse (izquierda). Al llegar al borde de la nube molecular, el gas ionizado sale al exterior en un "flujo de champán" (derecha).

