

CAPITULO 2

EL MEDIO INTERESTELAR: GENERALIDADES

2.1 Introducción histórica

2.1.1 Descubrimiento del polvo interestelar

El medio interestelar tiene una masa del orden del 1% de la masa de la Galaxia y está formado principalmente por un gas difuso difícil de observar. Una de las primeras constancias históricas sobre la discusión de la existencia o naturaleza del medio interestelar hace referencia al polvo interestelar y sus efectos de extinción de la luz de las estrellas. Herschel se preguntó si las nebulosas oscuras en la Vía Láctea eran, efectivamente, “agujeros en el cielo”, zonas de la bóveda celeste donde no había estrellas o, por el contrario, nebulosas oscuras que tapaban las estrellas. El descubrimiento observacional del polvo interestelar es debido a Trumpler que, en 1930, estudió la relación entre el brillo aparente y el diámetro angular de los cúmulos abiertos. Era de esperar una dependencia lineal entre el brillo y el cuadrado del diámetro angular (proporcional al inverso del cuadrado de la distancia). Sin embargo, Trumpler encontró que los cúmulos más lejanos eran menos brillantes de lo esperado: su luz era absorbida por el polvo interestelar.

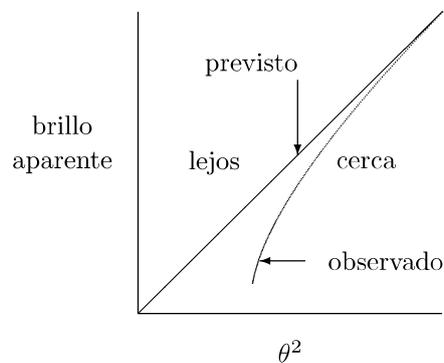


Figura 2.1: Descubrimiento de la extinción de la luz estelar por Trumpler (1930). Brillo aparente de los cúmulos abiertos en función del cuadrado de su tamaño angular θ .

2.1.2 Descubrimiento del gas interestelar

El gas interestelar es de más difícil detección que el polvo interestelar. El primer indicio sobre su posible existencia la obtuvo Hartmann en 1904, cuando observó en una binaria espectroscópica, además de la línea

de cada componente, una línea adicional de CaII estacionaria. La duda era si la línea correspondía a gas circumestelar o interestelar. Posteriormente se encontraron varias estrellas con más de una componente estacionaria, lo cual confirmaba su origen interestelar. El medio interestelar resultó estar lleno de nubes de gas frío en movimiento.

2.1.3 Apariencia óptica de las nebulosas del medio interestelar

Algunas regiones del medio interestelar se conocen de antiguo y tienen una apariencia óptica característica. Las *nebulosas oscuras* (los “agujeros del cielo” de Herschel) se caracterizan por contener polvo interestelar y, como veremos, son las regiones más densas y frías del medio interestelar, donde el gas hidrógeno está en forma molecular. La extinción en el óptico es muy elevada y su estudio sólo se puede realizar en el lejano infrarrojo y en radio. Las *nebulosas de reflexión* reflejan la luz estelar en granos de polvo. Tienen un color azul característico y su luz está polarizada debido a la orientación de los granos de polvo según el campo magnético local. Las *regiones H II*, ionizadas por una estrella joven muy caliente, y las *nebulosas planetarias*, una burbuja de materia ionizada eyectada por una estrella en su fase final de evolución hacia enana blanca, emiten luz visible por fluorescencia de un color rosado característico, debido al proceso de recombinación de los iones hidrógeno. Emiten también radiación en el continuo radio por el mecanismo libre-libre. Finalmente, los *remanentes de supernova*, formados por partículas aceleradas a muy alta energía durante la explosión de la supernova y, en algunos casos, aceleradas de forma continua por el púlsar central formado en la explosión, emiten radiación parcialmente polarizada en todas las longitudes de onda por el mecanismo sincrotrón y efecto Compton inverso.

2.1.4 Estudio moderno del medio interestelar

El estudio moderno del medio interestelar no empieza hasta que las técnicas observacionales permiten observar a longitudes de onda largas, donde la extinción del polvo interestelar no es importante y se puede estudiar de manera natural el tipo de procesos característicos de regiones muy frías. La radioastronomía y, posteriormente, la astronomía en el lejano infrarrojo son las herramientas naturales para abordar dicho estudio. Por ejemplo, las “nebulosas oscuras” en el visible, que se consideraban obstáculos que impedían la observación de todo lo que hay detrás, se han revelado como objetos de inmenso interés en sí mismas: las nubes moleculares, que son los objetos de mayor masa de toda la Galaxia, donde tiene lugar el proceso, aún inobservado en sus fases más esenciales, de la formación de una estrella a partir de gas interestelar.

Después de la detección en 1951 del hidrógeno atómico en el medio interestelar mediante la línea de 21 cm (cuya existencia había sido predicha en 1945), no se tenía muy claro si la composición del gas interestelar era homogénea químicamente o podía ser más compleja. Ya en 1950, Bates & Spitzer, y Hezberg propusieron la existencia de moléculas en las partes densas de las nubes interestelares, donde podrían estar protegidas de la radiación ultravioleta. Shklovskii propuso la detección en el dominio radio de las líneas de estas moléculas, pero la propuesta no encontró eco y no prosperó.

En los años 60 se detectaron las primeras moléculas del medio interestelar. En 1963, Weinreb, Barrett, Meeks & Henry detectaron la molécula de OH a 18 cm. Sin embargo, midieron temperaturas de brillo del orden de 10^{12} K, que fueron interpretadas por Rabino, Gold & Salpeter como emisión máser. La existencia de moléculas simples como el OH, formadas por hidrógeno y otro elemento abundante como el oxígeno, no sorprendió a nadie. Pero en 1968, Cheung, Rank, Townes, Thorton & Welch detectaron NH_3 y H_2O , moléculas complejas de 4 y 3 átomos. La complejidad del medio interestelar empezaba a emerger.

A principios de los años 70, con la entrada en servicio de los primeros radiotelescopios para ondas milimétricas, se empezó a detectar toda una amplia gama de moléculas en las nubes densas y frías del medio interestelar. De especial importancia resultó la detección por Wilson, Jefferts & Penzias en 1970 de la molécula de CO, la herramienta más poderosa para el estudio de las nubes de hidrógeno molecular.

En la década de los años 80 se realizó un cartografiado del gas molecular en toda la Galaxia, poniéndose

de relieve la existencia de las **nubes moleculares gigantes**, las mayores estructuras de la Galaxia. Por otra parte, se puso en evidencia la importancia de los fenómenos de eyección de materia en los objetos estelares jóvenes, en forma de flujos **supersónicos** de material molecular. Además, se realizó por primera vez una observación sistemática de todo el cielo en el lejano infrarrojo gracias al satélite IRAS. En la década de los 90 se han hecho grandes avances en el estudio de los objetos más jóvenes con resolución angular muy alta y hacia la unificación de fenómenos asociados a las primerísimas etapas de la evolución estelar dentro de un mismo marco: flujos moleculares, “jets” ópticos, objetos Herbig-Haro, y su relación con discos alrededor de objetos estelares muy jóvenes.

2.2 La Galaxia

2.2.1 Parámetros fundamentales de la Galaxia

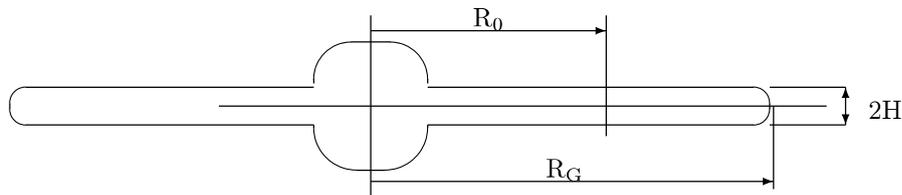


Figura 2.2: Esquema de la Galaxia.

Los parámetros básicos de nuestra Galaxia aparecen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Parámetros de la Galaxia.

Número de estrellas	$N_* \simeq 10^{11}$
Distancia galactocéntrica del Sol	$R_0 \simeq 8.5 \text{ kpc}$
Radio galáctico	$R_G \simeq 15 \text{ kpc}$
Grosor del disco galáctico	$2H \simeq 250 \text{ pc}$

La distancia promedio entre estrellas es $(\pi R_G^2 2H / N_*)^{1/3} \simeq 1 \text{ pc}$. El medio interestelar ocupa el espacio entre las estrellas e interactúa con ellas: intercambiando materia (en el proceso de formación estelar y en los vientos estelares y otros procesos de expulsión de materia por parte de las estrellas) y radiación (absorbiéndola y emitiéndola).

El medio interestelar, cuya masa total es de unas $10^9 M_\odot$, tiene dos componentes principales: una fase sólida (polvo en forma de granos de un tamaño característico de $0.1 \mu\text{m}$) y otra gaseosa. El gas interestelar es casi todo hidrógeno, que se puede encontrar neutro, en su forma atómica (HI) (aproximadamente la mitad de la masa) y molecular (H_2) (aproximadamente la otra mitad de la masa), o ionizado (HII).

2.2.2 Componentes del gas interestelar

Regiones frías atómicas (HI). Las regiones HI difusas están compuestas por hidrógeno neutro atómico (HI), con la presencia de algunos iones de baja excitación (CII, CaII). Su temperatura es $T \simeq 50\text{--}150 \text{ K}$, con un valor típico de 80 K . Se detectan por medio de la línea de 21 cm del HI, aunque también se detectan las líneas en absorción del CaII sobre el fondo estelar.

La morfología de las regiones HI difusas es en forma de nubes, con un tamaño característico $L \simeq 5 \text{ pc}$,

una densidad $n(\text{HI}) \simeq 1\text{--}100 \text{ cm}^{-3}$ y una masa $M \simeq 50\text{--}500 M_{\odot}$. La velocidad interna (turbulenta) de las nubes es de $1\text{--}4 \text{ km s}^{-1}$.

La distribución de las nubes tiene una altura característica sobre el plano galáctico $2H \simeq 250 \text{ pc}$ y ocupan una pequeña fracción, $2\text{--}3\%$, del volumen galáctico. En cambio, su masa es alrededor de la mitad de la masa del medio interestelar.

Regiones frías moleculares (H_2). Las nubes moleculares están compuestas fundamentalmente por hidrógeno molecular (H_2), con trazas de otras moléculas (CO , NH_3 , H_2O , etc.). Su temperatura típica es de $T \simeq 10\text{--}30 \text{ K}$. Se detectan principalmente a partir de la emisión de las transiciones rotacionales del CO , que tienen una energía del orden de la energía térmica de la región ($\Delta E \simeq kT$).

Las nubes moleculares tienen dimensiones típicas $d \simeq 5 \text{ pc}$, densidades $n(\text{H}_2) \simeq 10^3\text{--}10^5 \text{ cm}^{-3}$ (mucho más elevada que las nubes de HI difusas) y masas $M \simeq 1000 M_{\odot}$. La velocidad turbulenta de las nubes moleculares es típicamente $\sim 1\text{--}5 \text{ km s}^{-1}$.

La distribución de las nubes moleculares es bastante cercana al plano galáctico, $2H \simeq 120 \text{ pc}$ y ocupan una pequeña fracción $\sim 2\%$ del volumen galáctico. Su masa es alrededor de la mitad de la masa del medio interestelar.

Las nubes moleculares son los lugares de formación de las estrellas. En las nubes moleculares se encuentran indicadores de formación estelar reciente, como fuentes infrarrojas, máseres de H_2O y regiones HII compactas.

Regiones calientes atómicas (gas internube). El gas internube está compuesto por hidrógeno atómico (HI) caliente, con una fracción de ionización del $10\text{--}20\%$. Su temperatura es $T \simeq 5000\text{--}6000 \text{ K}$ y se detecta mediante la línea de 21 cm del HI .

Su densidad es más o menos uniforme, con un valor bajo de $n(\text{HI}) \simeq 0.1\text{--}1 \text{ cm}^{-3}$. Se distribuye alcanzando una gran altura sobre el plano galáctico, $2H \simeq 400 \text{ pc}$, y ocupa aproximadamente la mitad del volumen galáctico.

Regiones fotoionizadas (HII). Las regiones HII están formadas por hidrógeno fotoionizado alrededor de estrellas jóvenes. Se encuentran dentro de nubes moleculares y son regiones creadas y mantenidas por los fotones ultravioletas estelares. Se detectan a partir de la emisión libre-libre en el radio continuo y de las líneas de recombinación.

Sus densidades típicas son $n \simeq 10^2\text{--}10^4 \text{ cm}^{-3}$ (comparables a las de las nubes moleculares), su tamaño $d \simeq 1 \text{ pc}$ y su temperatura $T \simeq 5000\text{--}10000 \text{ K}$, con un valor típico de 8000 K .

Regiones ionizadas colisionalmente (gas coronal). El gas coronal está formado por hidrógeno ionizado colisionalmente, debido a las temperaturas extremadamente altas ($T \simeq 10^5\text{--}10^6 \text{ K}$) de la región. Se detectan a partir de su emisión de rayos X blandos ($0.1\text{--}2 \text{ keV}$). Su altura característica sobre el plano galáctico es $2H \simeq 700 \text{ pc}$. El gas coronal ocupa aproximadamente un 50% del volumen galáctico.

El gas coronal es producido por las explosiones de supernova. La onda de choque calienta el gas a su paso hasta temperaturas de $10^6\text{--}10^7 \text{ K}$ y el gas tarda mucho tiempo en enfriarse.

2.2.3 Relación entre componentes

Con respecto a la distribución de los distintos componentes del gas interestelar, se observa que la altura característica sobre el plano galáctico aumenta con la temperatura. El gas coronal es el que tiene una altura característica mayor, y las nubes moleculares una altura menor. En el plano galáctico, todos los componentes (HI , H_2 , HII , gas coronal) están concentrados en los brazos espirales, excepto el gas internube.

Si analizamos la presión de los distintos componentes encontramos los valores que aparecen en la Tabla 2.2. Puede observarse a partir de los datos de la Tabla 2.2 que los tres componentes de presión más baja (región HI , gas internube y gas coronal) tienen aproximadamente la misma presión: están en equilibrio. En cambio, las regiones HII tienen una presión más alta y están, por lo tanto, en expansión constante. Las nubes moleculares, por su parte, tienen también una presión más elevada, pero están en equilibrio gracias a su gran masa, que las hace estar en una situación de confinamiento gravitatorio.

Tabla 2.2: Densidad, temperatura y presión típicas de los componentes del gas interestelar.

Región	Densidad (cm^{-3})	Temperatura (K)	Presión (dyn cm^{-2})
Región H II	$\gtrsim 10^2$	8000	$\geq 1.1 \times 10^{-10}$
Nube molecular	$10^3\text{--}10^4$	20	$2.8 \times 10^{-12}\text{--}2.8 \times 10^{-11}$
Región H I	30	80	3.3×10^{-13}
Gas internube	0.3	6000	2.5×10^{-13}
Gas coronal	$< 10^{-2}$	5×10^5	$< 6.9 \times 10^{-13}$

2.2.4 Otros componentes del medio interestelar

Polvo interestelar. El polvo interestelar está formado por granos con un tamaño característico de $0.1\mu\text{m}$, del orden de la longitud de onda de la luz visible. Sus efectos son la *extinción* de la luz estelar, el *enrojecimiento* debido a la extinción diferencial (la luz azul sufre más extinción que la roja) y la *polarización interestelar*. Un valor típico de la extinción en la Galaxia es de aproximadamente una magnitud por cada kpc de distancia. La extinción es aproximadamente proporcional al inverso de la longitud de onda en la región visible del espectro, con un pico en el UV, a 2200 \AA . Para explicar la polarización interestelar es necesario suponer que los granos de polvo son alargados y que están alineados parcialmente. Esto último se explica a partir de la rotación de los granos, que tiende a producirse alrededor de un eje en la dirección del campo magnético local.

Los granos de polvo se forman preferentemente en las envolturas de estrellas frías, desde donde son barridos hacia el medio interestelar por la presión de radiación. La abundancia de gas respecto a polvo es de $\sim 10^{12}$ en número de partículas y de ~ 160 en masa. El polvo interestelar está asociado con el gas molecular y se encuentra por lo tanto en las nubes moleculares. Los granos de polvo juegan un papel importante en la formación de algunas moléculas (entre ellas, la más abundante, H_2) y en su preservación una vez formadas al protegerlas de la radiación ultravioleta. Hay una buena correlación entre la densidad columnar de gas molecular y la extinción en el visible producida por el polvo interestelar, A_v ,

$$\left[\frac{N(\text{H}_2)}{\text{cm}^{-2}} \right] \simeq 10^{21} \left[\frac{A_v}{\text{mag}} \right].$$

Campo magnético. El campo magnético galáctico es del orden de $B \simeq 2\text{--}3 \times 10^{-6}$ G. Su intensidad depende de la densidad del medio interestelar, $B \propto n^\alpha$, con un índice $\alpha = 1/3\text{--}2/3$, aunque hay variaciones locales importantes. Su dirección es en general hacia $l \simeq 90^\circ$, es decir, en dirección de la velocidad de rotación galáctica.

Rayos cósmicos. Toda la Galaxia es atravesada por partículas relativistas, sobre todo electrones y protones de alta energía. La aceleración de los electrones en el campo magnético galáctico produce la radiación sincrotrón galáctica de fondo, concentrada en el plano galáctico, con un máximo en la dirección del centro galáctico.