

Parte II

**ASTROFISICA DEL MEDIO
INTERESTELAR**

Capítulo 5

La observación del medio interestelar

5.1 Introducción

Uno de los más sorprendentes resultados de la astrofísica moderna lo constituye el descubrimiento de que el espacio entre las estrellas, que parece enteramente vacío, está lleno de una diluidísima sustancia heterogénea que recibe el nombre de Medio Interestelar.

Esta sustancia que todo lo llena está diversamente compuesta y es el origen de todos los demás objetos astrofísicos de nuestro interés: de ella se forman las estrellas y los planetas que las orbitan, que a su vez constituyen las galaxias, los bloques de los que está hecho el universo.

Al medio interestelar lo componen todo el gas libre, que no se ha unido para formar estrellas o planetas, y que ha formado la mezcla de un sinnúmero de especies atómicas y moleculares en muy diversos estados ; el polvo, partículas macroscópicas formadas por agregados gigantes de átomos y moléculas en las regiones más densas de este omnipresente medio ; la radiación electromagnética, que todo lo llena y que viene en muy diversas formas desde la energética radiación gamma emitida en procesos violentos, hasta las ondas de radio emitidas por los más tranquilos eventos; Los campos magnéticos, inducidos por particulares procesos y que envuelven la Galaxia entera.

Nos ocuparemos en esta parte del texto del estudio de este ubicuo medio, los métodos para observarlo, las distintas fases o estados en los que se encuentra, su distribución en la Galaxia, la física de los fenómenos que en él acontecen y los procesos que dan lugar a la a veces complicada química que en él se da.

El estudio del medio interestelar se ha constituido en el presente en pieza clave en el descubrimiento de algunos de los más importantes aspectos relacionados con el origen de las estrellas, con nuestro lugar en el universo, con las dimensiones y forma de nuestra galaxia, con la composición química del universo, la estructura y dinámica de nuestra Galaxia y las demás, la muerte de las estrellas entre otros temas que seguramente mencionaremos en los capítulos que forman esta segunda parte del libro. Por esto su inclusión en un plan introductorio de estudio de la astrofísica se hace indispensable.

5.2 Pruebas de la existencia del medio interestelar

Aunque podría considerarsela una afirmación aceptable sin reparos, es también cierto que la existencia del medio interestelar no fue siempre conocida y que sólo después de observaciones detenidas de lo que aparentaba estar vacío fue posible concluir que no lo estaba. Pero, ¿cuáles fueron precisamente esas evidencias que permitieron establecer con certeza la existencia de una a veces indetectable materia entre las estrellas ?.

En la antigüedad todo lo que era posible observar en el cielo parecía encontrarse bien localizado formando cuerpos perfectamente delimitados como la Luna, el Sol, los planetas y las estrellas. En una tal discreta visión del Universo exterior a la Tierra, era muy difícil concebir la existencia de objetos materiales muy extendidos que pudieran llenar el espacio entre los cuerpos conocidos. Aquellos que no parecían exhibir la apariencia localizada de planetas y estrellas eran confundidos con fenómenos atmosféricos o se les asignaba valores religiosos sin profundizar en su naturaleza. Era este el caso por ejemplo de los cometas y la Vía Lactea.

Sólo con el advenimiento de nuevas técnicas e instrumentos de observación fué posible percatarse de que el universo no estaba formado sólo de las estrellas puntuales sino que existían también objetos más extensos que parecían aquí o allá llenar el espacio entre algunas estrellas.

Fueron los observadores del siglo XVIII, los primeros en reconocer la existencia de cuerpos extensos no estelares que emitían su propia luz y que se encontraban entre las estrellas. Uno de los más asiduos cazadores de objetos con estas características fue el astrónomo francés Charles Messier (1732 - 1781). Su principal ocupación como astrónomo era la de descubrir nuevos cometas, y su éxito le mereció el apodo de "El Hurón de los Cometas". El descubrimiento de un cometa nuevo era en aquel entonces, y lo sigue siendo hoy en día una laboriosa tarea que consiste en la observación detenida de una región del cielo en busca de algo con apariencia difusa que regularmente no se encuentra allí y que cambia su posición noche a noche. A Messier y sus colegas se les dificultaba sobremanera su tarea, por la existencia de objetos difusos que estaban fijos entre las estrellas y que podrían pasar como cometas nuevos. Por tal razón se puso en la tarea de elaborar una completa lista de tales objetos, su posición, brillo y características particulares, para evitar que otros los confundieran con su verdadero objeto de estudio. Fue de esta manera como nació el que los astrónomos conocen como el Catálogo de Messier. En él se encuentran referenciados los 110 objetos no estelares más brillantes que Messier y otros observadores pudieron descubrir en todo el cielo. La denominación de los objetos de la lista, que está en vigencia aún se hace utilizando como inicial una "M" que va seguida del número que al objeto le es asignado en el catálogo. Así M42 es el objeto número 42 del catálogo de Messier.

Observaciones más finas mostraron más tarde la verdadera naturaleza de los objetos incluidos en este catálogo. En unos casos no se trataba de otra cosa que enjambres de estrellas (grandes o pequeños), conocidos como cúmulos estelares, que en los telescopios menos potentes exhibían apariencias difusas. Pero en otros los objetos aún con los mejores



Figura 5.1: La nebulosa de la Trífida o *M20*, uno de los típicos objetos difusos observados por Messier.

instrumentos conservaban su naturaleza difusa, razón por la cual recibieron el nombre de Nebulosas ("parecido a una nube"). En el interior de algunas de esas nebulosas era inclusive distinguir estrellas que parecían estar asociadas a ellas (ver figura 5.1).

Estas observaciones podrían constituirse quizá en la primera evidencia de la existencia de materia diluida entre las estrellas. Esta materia, observada por los medios descritos, a pesar de estar mucho más dispersa que la que forma una estrella individual, poseía una localización bien definida y de ella solo podría decirse que llenaba los vacíos entre las estrellas con las que aparecía asociada. ¿Qué pasaba pues con el espacio entre las demás estrellas en el cielo, lejanas de las nebulosas observadas por Messier y sus colegas?, ¿Se encontraban ellas vacías?

Más recientemente (principios del siglo XX), otra pionera observación, proveería de las pruebas necesarias para suponer la existencia de materia entre las estrellas incluso en regiones donde no existen nebulosas.

Cuando se dirige la mirada en dirección a la Vía Láctea, esa "nube" blanquecina que atraviesa el cielo de extremo a extremo y que está formada, como lo descubriera Galileo, por la reunión de una miríada incontable de estrellas que hoy sabemos forman un sistema discoidal al que pertenece el Sol y que llamamos nuestra Galaxia, se descubren en ella grandes vacíos en el casi continuo fluido de estrellas. Estos vacíos se encuentran agrupados principalmente en el plano central de la Vía Láctea (ver figura 5.2). Cuando se hace una observación minuciosa de algunas regiones en esta estructura se descubren en ella parches individuales de ausencia de estrellas. Alrededor del año 1900, E.E. Barnard y M.

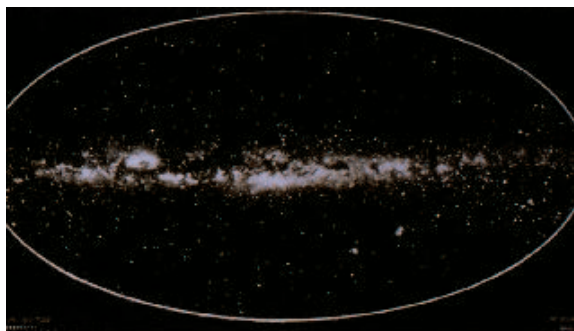


Figura 5.2: Imagen de la Vía Láctea en la que resaltan características regiones oscuras.

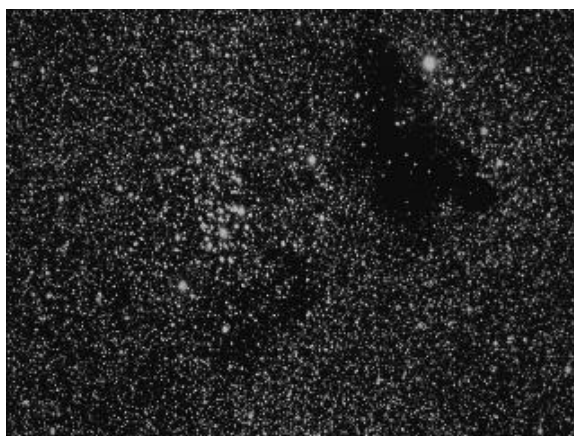


Figura 5.3: Un *Saco de Carbón*, regiones de la Vía Láctea en las que parecen hacer falta estrellas.

Wolf, demostraron, mediante precisos conteos de las estrellas en las vecindades de estos objetos (ver figura 5.3), la imposibilidad de que en efecto se tratara de simples baches en la distribución de estrellas. Como ya tempranamente había interpretado el astrónomo italiano Angelo Secchi, estas particulares regiones, debían coincidir con la posición de nubes de material opaco que impediría la llegada hasta nosotros de la luz procedente de las estrellas de fondo.

Esta observación, la de la existencia de nubes de materia ya no emisoras sino terriblemente opacas se constituye en la segunda prueba de la existencia de materia llenando el espacio entre las estrellas, materia que podemos decir está fuertemente concentrada en el plano de simetría de nuestra Galaxia, llenando ingentes volúmenes de espacio vacío.

Las anteriores observaciones demuestran la existencia de material entre las estrellas que se concentra para formar estructuras que aunque más extensas que las estrellas mismas

siguen siendo claramente delimitadas. La mejor prueba de la existencia de materia que llena considerables volúmenes del espacio entre las estrellas lo constituye la observación de tres fenómenos nuevos : El enrojecimiento y la extinción de la luz estelar, la presencia de líneas de absorción en el espectro de las estrellas y la detección de radiación producida por la materia misma que constituye el medio.

En las siguientes secciones discutiremos algunos de los más importantes aspectos relacionados con estas observaciones.

5.3 Enrojecimiento y extinción interestelar

Uno de los más evidentes métodos para determinar la existencia de materia interestelar es registrar el efecto que produce sobre la luz que la atraviesa, procedente de las estrellas sumidas en ella o por detrás suyo.

El medio interestelar, si existe, tiene la capacidad de absorber parte de la energía de la luz que la atraviesa. Dicha absorción puede producir finalmente 3 efectos distintos: Reducir la intensidad total del rayo de luz (extinción), cambiar la intensidad del rayo de luz en ciertas regiones del espectro electromagnético de manera distinta a como lo hace en otras (enrojecimiento) y absorber con particular intensidad radiación correspondiente a ciertas longitudes de onda (líneas espectrales).

La extinción de la luz estelar por la presencia de un medio absorbente puede ser registrada directamente cuando se comparan la distancia a una estrella vecina determinada por el método geométrico (paralaje trigonométrico) y utilizando información contenida en su espectro (paralaje espectroscópico).

El primero de los métodos, una vez eliminada las posibles causas de error, provee la verdadera distancia a la estrella considerada, d , dado que no está afectado por las alteraciones que sufra la luz de la estrella en su camino a la Tierra y sólo se ocupa del cambio de su posición en el cielo. El segundo método consistente en deducir de información espectral la magnitud absoluta visual de la estrella, M_V que luego comparada con su magnitud aparente observada, m_{Vo} permite establecer una distancia aparente, d' , implícitamente dada por,

$$M_V = m_{Vo} - 5 \log_{10}(d'/10pc)$$

Si escribimos la misma relación pero con la distancia a la estrella determinada por el primer método, encontramos,

$$M_V = m_V - 5 \log_{10}(d/10pc)$$

donde m_V es la magnitud aparente que tendría la estrella si no existiera el medio interestelar. Comparando resulta,

$$m_{Vo} = m_V - 5 \log_{10}(d/d')$$

Como era de esperarse, si existe extinción, $m_{V_o} > m_V$ de donde se sigue entonces que $d' > d$: la distancia determinada por el método espectroscópico es mayor que la real a la estrella. Este efecto ampliamente observado y cuantificado es entonces una señal clara de la extinción de la luz estelar y por tanto de la existencia de un medio que provoca dicha extinción.

Como es de esperarse, la presencia de una mayor o menor cantidad de materia absorbente produce un mayor o menor efecto de reducción en la intensidad de la luz estelar. En el medio interestelar apareciera así pues una dependencia de la magnitud de la extinción con la distancia a la fuente. Regularmente el fenómeno se modela así ,

$$m_{V_o} = m_V + A_V d$$

donde A_V es un parámetro a determinar, que en el caso del medio interestelar en el plano medio de la Galaxia puede oscilar entre 1 a 2 magnitudes por kpc.

La extinción interestelar depende además de la longitud de onda. Es un hecho ampliamente observado que la magnitud de dicha extinción es mayor en tanto menor es la longitud de onda considerada.

El fenómeno de enrojecimiento de la luz estelar se hace evidente cuando se compara el "color" de la estrella observado con el "color" deducido de información contenida en su espectro. Para tal fin se introduce un nuevo parámetro conocido como el exceso de color, E y definido como la diferencia entre el índice de color observado, $(B - V)_o$ y el real, deducido por medios espectroscópicos $(B - V)$, de tal modo que,

$$E_{B-V} = (B - V)_o - (B - V)$$

El enrojecimiento de la luz estelar implica que $E_{B-V} > 0$. Reorganizando los términos en la anterior relación se puede escribir,

$$E_{B-V} = (B_o - B) - (V_o - V)$$

por la definición del parámetro A , E se puede expresar en la forma,

$$E_{B-V} = (A_B - A_V)d$$

E depende pues de la distancia a la que se encuentra la fuente. Para objetos situados a 1Kpc sobre el plano de la Galaxia E varía entre 0,3 y 0,6 magnitudes.

El enrojecimiento de la luz estelar se debe a la presencia en el medio interestelar de granos de polvo que dispersan de modo selectivo la luz que sobre ellos incide. Sobre la relación entre el fenómeno de enrojecimiento y el contenido de polvo en el medio interestelar y sus características, volveremos más adelante en la sección dedicada a las nubes interestelares.

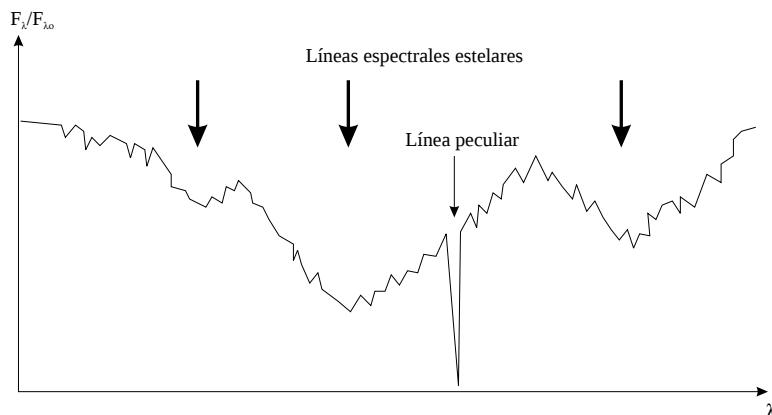


Figura 5.4: Efecto de la presencia del medio interestelar en el espectro de una estrella.

5.4 Líneas de absorción interestelar

Otro de los fenómenos que permiten establecer la presencia de materia en el espacio que separa las estrellas lo constituyen la presencia en el espectro de las mismas de ciertas líneas de absorción producidas en un medio enteramente distinto a aquel en el que se forman las líneas propias de la estrella.

El fenómeno fue descubierto por primera vez en 1904 por J. Hartman, quien se encontraba estudiando el miembro menor del sistema binario $\delta - orionis$. Mientras estudiaba el espectro de esta estrella con el fin de determinar el desplazamiento Doppler de sus líneas espectrales, para finalmente obtener información acerca de su velocidad orbital, notó la presencia de una estrecha línea espectral que parecía mantenerse inmóvil respecto a las desplazadas líneas propias de la estrella (ver figura 5.4). Su inmovilidad demostraba que la materia que la producía no se encontraba ligada en forma alguna al sistema binario. Su pequeño ancho, implicaba además, que la temperatura de la materia que la producía era muy reducida (100 K según las medidas de Hartman), comparada con la temperatura mínima registrada en las atmósferas estelares. Todo esto junto no le dejó ninguna duda de que lo que estaba observando era la primera evidencia espectral de la existencia del medio interestelar.

La observación de las líneas de absorción de la materia en el medio interestelar ha permitido deducir valiosa información sobre aspectos como su dinámica, estado y composición química.

La más valiosa información en este sentido la constituye la observación de estas líneas en la región ultravioleta del espectro electromagnético. Dado las bajísimas temperaturas y densidades registradas en el medio interestelar casi todas las especies atómicas que lo constituyen se encuentran en su estado base. La transición desde un tal estado a estados superiores involucra energías que están en la mayoría de los casos en el rango de

energías de los fotones ultravioleta. De particular interés ha sido el estudio en esta región del espectro electromagnético, de las líneas de la serie Lyman del Hidrógeno, lo que ha permitido por ejemplo establecer con precisión el contenido de este fundamental elemento en el medio interestelar.

Una de los más sorprendentes resultados que se siguen del estudio de las líneas de absorción producidas por el medio interestelar, ha sido el descubrimiento de líneas correspondientes a átomos en altísimos estados de ionización. Es así como se han descubierto líneas de OVI, Si IV y CIV. Estas líneas que además están muy ensanchadas revelan la existencia de una componente muy tenue y caliente ($T \sim 10^6 K$!) que llena todo el disco de la Galaxia. Sobre esta particular fase del medio interestelar hablaremos en el siguiente capítulo.

5.5 Emisión de radiación por el medio interestelar

En el rango del visible y regiones vecinas del espectro electromagnético (el infrarrojo y el ultravioleta), sólo regiones localizadas del medio interestelar (nebulosas y nubes oscuras) parecen emitir una cantidad detectable de radiación.

La radiación emitida por las nebulosas en el visible, proviene fundamentalmente del fenómeno de recombinación. Como veremos más adelante la materia en estas nebulosas es ionizada por efecto de un poderoso flujo de radiación ultravioleta procedente de estrellas calientes sumidas en su interior. Al mismo tiempo en que se produce el fenómeno de ionización el fenómeno contrario tiene lugar en la nube : los electrones que vagan libremente se recombinan con los iones que más tarde son nuevamente ionizados. Durante la recombinación los electrones descienden a los más bajos niveles energéticos, emitiendo en el proceso fotones de muy diversas longitudes de onda, incluida longitudes de onda en el rango visible. A estos últimos se debe el hecho de que podamos por medios observacionales detectar la presencia de estos objetos.

Radiación visible es emitida también por transiciones electrónicas en ciertas especies atómicas excitadas por la radiación emitida por las estrellas en el seno de las nebulosas. Con el advenimiento de la radioastronomía en la década de 1930, se abrieron nuevas posibilidades de exploración de las propiedades emisivas del medio interestelar. Los resultados no se hicieron esperar.

El primero de ellos fue el descubrimiento, después de su predicción teórica de la radiolínea en los 21 cm (1440 MHz) emitida por el hidrógeno atómico en las especialísimas condiciones del medio interestelar. La observación de esta emisión ha permitido reconstruir la distribución de materia interestelar en nuestra Galaxia, y obtener de este modo la primera prueba de que se trata, como lo sospechábamos de una galaxia del tipo espiral.

Con ella se han percibido otras muchas radiolíneas, fundamentalmente en el rango de las microondas, correspondientes a la emisión por moléculas interestelares. Estas observaciones han permitido deducir información de gran valor relativa a los complicados procesos químicos que tienen lugar en este particular medio que llena los que creíamos

vacíos espacios entre las estrellas. Allí se han descubierto desde extrañas moléculas nunca antes observadas en la Tierra hasta complejísimas estructuras moleculares similares a las que constituyen la base de la vida como la conocemos.

Entre las radiolíneas moleculares detectadas en el medio interestelar, cabe destacar la línea en los 2,6 mm de la molécula de monóxido de Carbono (CO). Al ser esta una de las más estables moléculas en la naturaleza y dada la relativa gran abundancia del Carbono y el Oxígeno frente a otros elementos pesados, esta línea, como la del Hidrógeno en los 21 cm, aparece en casi todas partes en el medio interestelar. A diferencia de la línea en los 21 cm producida en las regiones del medio interestelar ricas en Hidrógeno atómico en estado neutro, la intensa línea del CO permite explorar inobservadas regiones del medio interestelar donde los átomos de Hidrógeno se unen para formar moléculas. Las observaciones con esta línea son pues el complemento perfecto de las realizadas con la línea de los 21 cm.

El medio interestelar emite también un continuo de radioemisión. Dicho continuo se puede separar en una componente térmica, emitida por el gas caliente en nebulosas y una componente no térmica procedente de regiones del medio interestelar como los remanentes de supernova donde intensos campos magnéticos aceleran los electrones libres obligándolos a emitir radiación sincrotrón en casi todas las radiofrecuencias.

5.6 Ejercicios

2.1.1

2.1.2

