

Las estrellas son objetos relativamente pequeños, situados a enormes distancias unos de otros. Para hacer una comparación simple, si pensamos que el Sol fuera del tamaño de la cabeza de un alfiler (de un milímetro de radio), su vecina más próxima estaría a la distancia de 64 kilómetros o lo que es apenas un poco menor a la distancia entre la ciudad de México y Cuernavaca.

Podemos pensar que el espacio entre las estrellas está vacío, pero en realidad no es así, hay pequeñísimas cantidades de gas (mayoritariamente hidrógeno) y algunas partículas sólidas menudas, como pequeños granos de arena. Comparando con los ejemplos que conocemos, el espacio entre las estrellas se encuentra en condiciones más extremas que el más alto vacío que se puede lograr en los laboratorios terrestres. Sin embargo, son tan vastos los volúmenes que hay entre las estrellas que se puede afirmar que existe una cantidad considerable de materia en estos espacios.

El estudio de la materia interestelar se inició mucho después del de las estrellas. Hace relativamente pocos años que se ha entendido que algunos fenómenos observados se deben a este material tenue. Solamente se conocía la materia que se encuentra cerca de las estrellas calientes, las cuales la encienden e iluminan. También se sabía que hay una gran zona oscura en el cielo dividiendo la banda de luz

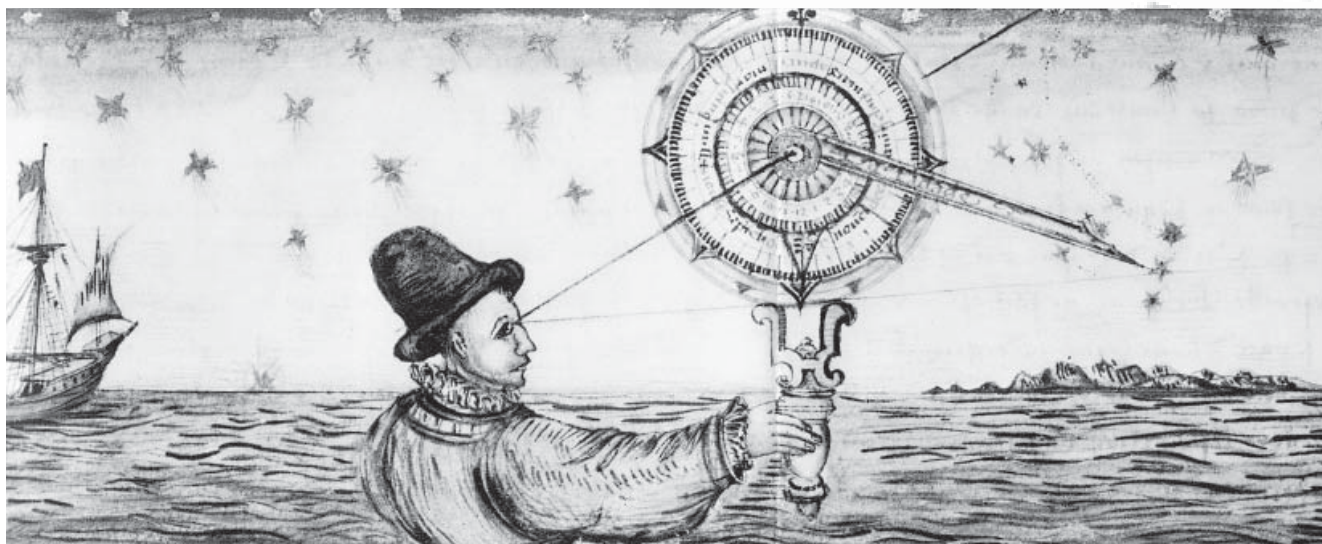
denominada Vía Láctea; sin embargo, fue hasta 1930 cuando se descubrió que esta zona oscura correspondía a nubes densas con partículas de polvo que impiden el paso de la luz de las estrellas que hay detrás. También hay pequeñas zonas oscuras que se pueden apreciar por el contraste con el fondo brillante de las estrellas, las cuales no corresponden a la ausencia de estrellas, sino que se explican por la presencia de nubes densas de gas y polvo que ocultan lo que se encuentra más allá de ellas. Con el desarrollo de los radio-telescopios, de los telescopios infrarrojos y de los telescopios que se han puesto en órbita en satélites artificiales, ahora se observan los gases y el polvo en las distintas condiciones físicas en que se encuentra.

Las primeras nebulosas brillantes fueron observadas desde que se empezó a usar el telescopio. En 1656, Christiaan Huygens dibujó un mapa de la Nebulosa de Orión, una de las más brillantes en el cielo, pero las primeras nebulosas se catalogaron formalmente hasta 1769, cuando Charles Messier, buscando cometas, preparó una lista de objetos difusos en el cielo con el fin de no confundirlos con aquellos. Su lista final contenía 110 objetos difusos en el cielo, y entre ellos se encuentran varios gaseosos: nubes calientes que rodean estrellas jóvenes como la Nebulosa de Orión, que por estar en el lugar 42 de esa lista también se





La materia **entre** las estrellas



llama M42; nebulosas planetarias, que son nubes de gas brillantes ubicadas alrededor de estrellas calientes en sus fases finales de evolución, como M27, llamada la Nebulosa de la Mancuerna; e incluso un remanente de la explosión de supernova, como M1, también denominada la Nebulosa del Cangrejo. A fines del siglo XIX la posibilidad de tomar fotografías de zonas del cielo puso de manifiesto la presencia de nebulosas oscuras que se pueden observar por el contraste con el fondo brillante del cielo.

En 1904, al observar espectroscópicamente la estrella Delta Orionis, por primera vez se conoció la presencia de un gas interestelar generalizado sobre el disco galáctico. Esta estrella es una de las tres que forman el llamado “cinturón de Orión”, que en realidad no es una estrella aislada sino un sistema binario —de dos estrellas. En algunos sistemas binarios cercanos, donde no se distinguen las dos componentes que lo conforman, en sus espectros se pueden observar los acercamientos y alejamientos periódicos de ambas estrellas, por el corrimiento Doppler. Delta Orionis tiene un periodo de 5.7 días que se manifiesta en todas las líneas de absorción, pero al estudiar la línea de absorción de calcio ionizado, que se encuentra a 393.4 nanómetros de longitud de onda —la cual además de presentar el dobleamiento periódico correspondiente a los movimientos orbitales de ambas estrellas, muestra la presencia de una línea de absorción adicional que no sufre ningún desplazamiento con el tiempo—, se



delató la presencia de gas entre las estrellas; fue la primera indicación de que hay material gaseoso (gas de calcio) entre la estrella doble y nosotros. Actualmente sabemos que son muchas las líneas de absorción producidas por los gases interestelares en diferentes direcciones de la galaxia, las cuales revelan la presencia de muchos elementos químicos en estas nubes tenues, como carbono, sodio, silicio, magnesio, zinc, níquel y hierro, entre otros. En realidad el gas está constituido fundamentalmente de hidrógeno y, en menor proporción, de helio, pero fue la traza de los otros elementos que los acompañan lo que mostró la presencia de las nubes interestelares. También sabemos que gran parte de esta materia está en forma de nubes de densidades bajísimas, difíciles de imaginar, de 10 átomos por centímetro cúbico.

Sabemos que hay gas en condiciones extremas de temperatura, a la más alta como a la menor imaginable, que hay partículas de polvo muy frías, pues están muy alejadas de estrellas brillantes, en las zonas más internas de nubes densas, protegidas de la luz de las estrellas, así como también hay partículas de polvo cercanas a estrellas que son calentadas por éstas, y por lo tanto podríamos decir que se trata de “polvo tibio”.

En general encontramos el gas más frío en las nubes densas, predominantemente en forma de moléculas de hidrógeno; en algunos casos se trata de gas a temperaturas de $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$. También en ondas de radio se observan las regiones donde se en-

cuentra el hidrógeno en forma neutra, lo cual corresponde a nubes calientes muy extensas que se encuentran a 350 °C de temperatura, mientras que en zonas cercanas a las estrellas calientes se alcanza temperaturas de hasta 10 000 °C, y mediante telescopios de rayos X se puede observar, en algunas regiones, gas a temperaturas tan altas que superan 10 millones de grados centígrados.

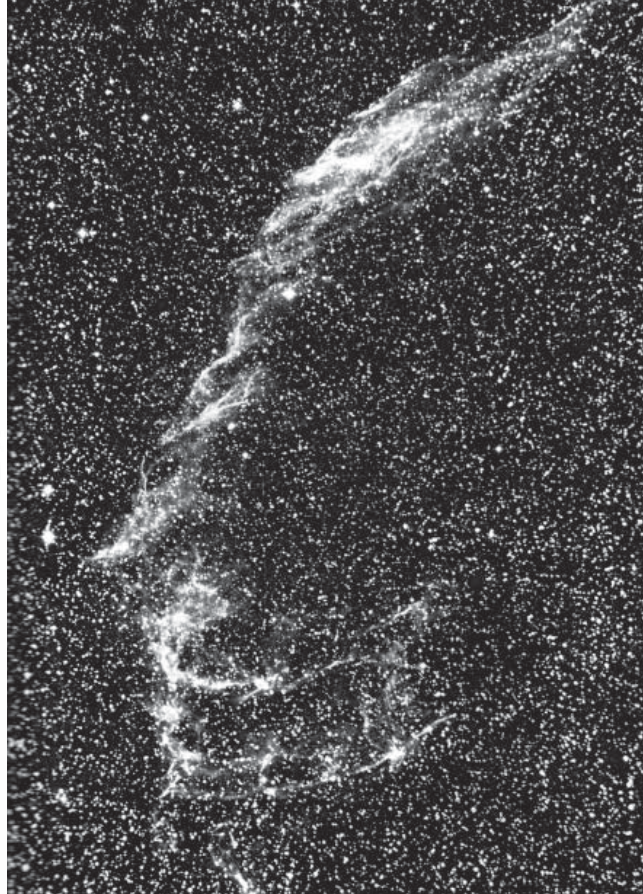
A partir de estas observaciones podemos saber que no solamente existe este material en los distintos ambientes, sino que también podemos medir la temperatura y densidad a que se encuentra, los movimientos del gas, y determinar de qué está constituido; por lo tanto podemos tratar de entender la relación que guarda el gas con las estrellas que rodea.

Las nubes moleculares

En regiones donde la densidad del medio interestelar es muy alta, la mayor parte de los átomos se combina entre sí para formar moléculas y se les llama nubes moleculares. Ópticamente éstos son objetos totalmente opacos y sin luz debido al polvo que contienen, por lo que son difíciles de observar, pero se les puede ver en proyección sobre un fondo de estrellas o de la nebulosa gaseosa a la que en ocasiones están asociados. Hay lugares en donde están iluminados por la luz de una estrella situada a proximidad. Solamente las observaciones en radio, en ondas milimétricas y en luz infrarroja nos permiten conocer las condiciones de las nubes moleculares.

Estas nubes están constituidas principalmente de hidrógeno molecular, es decir bajo la forma de la molécula H_2 . Sin embargo esta molécula es simétrica y a las bajas temperaturas en que se encuentra no posee transiciones permitidas en los dominios de radio e infrarrojo que se puedan observar; es decir que el componente más importante de la nube se oculta a nuestros ojos. Por el contrario, hay moléculas asimétricas como el CO, que aunque están presentes solamente en una pequeñísima proporción en las nubes moleculares tienen una gran variedad de transiciones de rotación y de vibración, lo que nos permite detectar el gas molecular. En realidad la mayor parte de las nubes moleculares se ha descubierto por investigaciones sistemáticas en la línea de la molécula CO a 2.6 milímetros de longitud de onda.

Se desconocen en detalle los procesos de formación de las moléculas interestelares, pues



las condiciones en que se encuentran son muy diferentes a las que existen en los laboratorios terrestres. Se supone que la presencia de partículas cargadas de energía relativamente grande (los rayos cósmicos), ionizan en pequeñas cantidades el hidrógeno molecular y el helio. Los iones así formados sirven de punto de partida para la formación de moléculas mayores. Aunque las reacciones químicas son lentas, las nubes moleculares subsisten suficiente tiempo para que moléculas muy complejas, algunas de ellas compuestas hasta de trece átomos, puedan ser sintetizadas. Como el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno y el oxígeno son los elementos más abundantes en el Universo (además del helio, que es químicamente inerte) es normal que la mayor parte de las moléculas interestelares sean moléculas formadas precisamente por estos elementos. Actualmente se han detectado cerca de 130 moléculas diferentes, sin contar los compuestos isotópicos de éstas.

Las nubes difusas. Con este nombre se denominan las regiones en donde el hidrógeno está en estado neutro. En general allí coexisten otros elementos que se encuentran ionizados, y que son los que requieren menor energía que el hidrógeno para ionizarse. El gas de hidrógeno neutro es poco espectacular en luz visi-



ble, sin embargo, desde 1970 se ha estudiado en gran detalle utilizando principalmente técnicas radioastronómicas y luz ultravioleta.

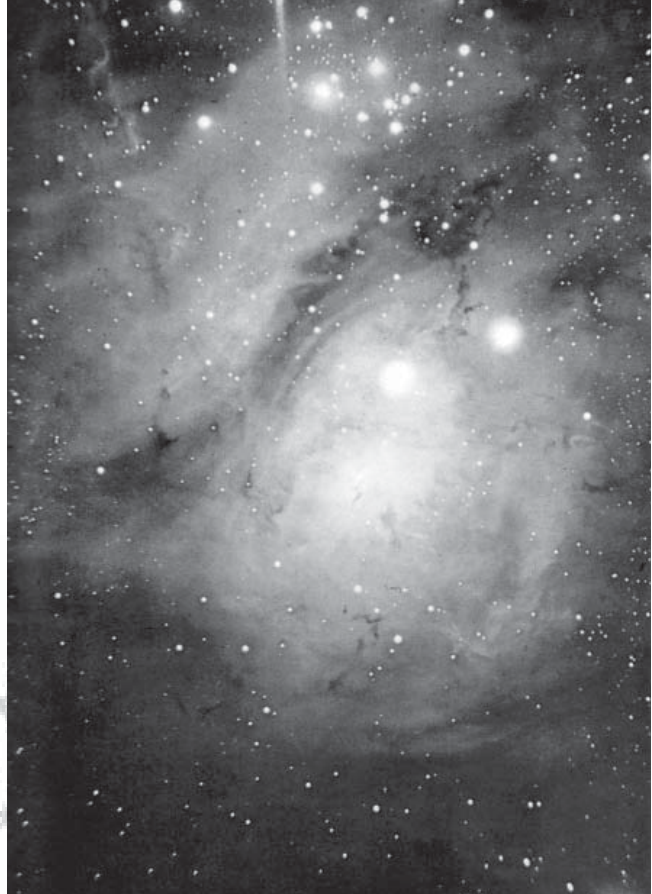
Las nubes difusas son las componentes mejor conocidas del medio interestelar; son relativamente transparentes a la luz y se manifiestan por las líneas de absorción que se observan en los espectros de las estrellas situadas detrás de estas nubes. En la región de luz visible se pueden observar la absorción de Na, Ca, Ti y algunos radicales moleculares simples (CN, CH y CH⁺), mientras en la región del ultravioleta lejano hay un número considerable de líneas que delatan la presencia de estas nubes.

En 1951 el descubrimiento de la línea de 21 centímetros de longitud de onda en el radio que emite el hidrógeno atómico mostró que este elemento es el principal constituyente de las nubes difusas, y ha permitido conocer sus características y distribución en la galaxia, concentradas a lo largo de los brazos espirales.

Como hemos mencionado, en todo el espacio interestelar hay partículas sólidas asociadas al gas. En las nubes difusas estos granos están calentados por la radiación de las estrellas y se han observado en el infrarrojo lejano con telescopios especializados a bordo de satélites. El cielo en el infrarrojo lejano está dominado por esta emisión, la cual es irregular y forma estructuras filamentosas que recuerdan las nubes denominadas *cirrus* en nuestra atmósfera.

Los procesos de calentamiento y enfriamiento de las nubes difusas también son bien conocidos. Desde 1972 se sabe que el polvo juega un papel dominante en el calentamiento del gas. La radiación ultravioleta que incide sobre los granos de polvo les arranca electrones, los cuales transportan la energía que les impartió el fotón incidente y mantienen equilibrio térmico con los electrones libres y presentes en el medio, que también son calentados. Por su parte, las pérdidas de energía que compensan estas ganancias están dominadas por la emisión de una línea de carbono ya ionizado en el infrarrojo lejano, a una longitud de onda de 158 micras.

En los bordes de las nubes moleculares y las de gas ionizado hay regiones de transición, llamadas regiones de fotoionización, las cuales son comunes ya que las estrellas calientes recién formadas a partir de las nubes moleculares ionizan el gas circundante; y aunque pasado un tiempo podrán disipar el gas que las rodea, frecuentemente se encuentran todavía junto a dichas nubes moleculares.

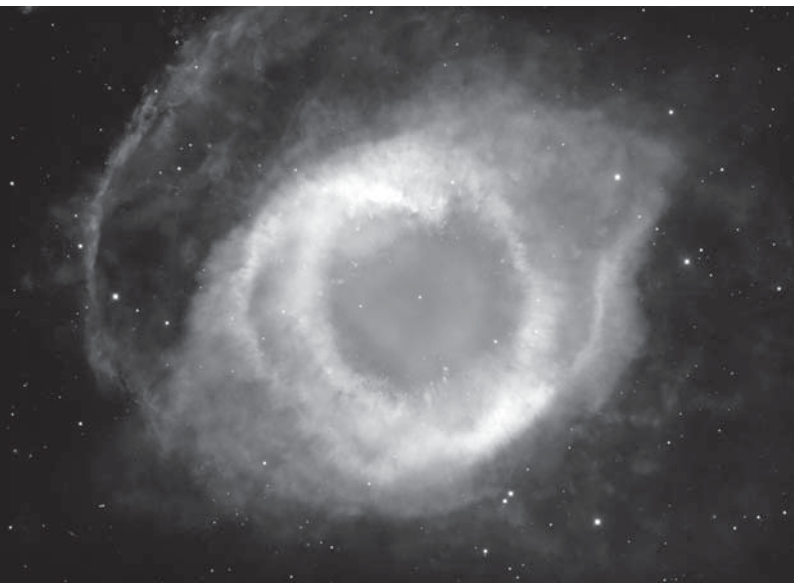


Estas regiones se observan por medio de la radiación infrarroja lejana que emiten el carbono, el oxígeno y el hidrógeno, y de algunas moléculas como el CO. El polvo calentado por la radiación ultravioleta produce una emisión intensa en el infrarrojo.

Las nubes gaseosas

Se trata de las nubes donde el hidrógeno está ionizado por la radiación ultravioleta de estrellas calientes muy cercanas. Estas regiones aparecen en dos tipos de configuraciones: lugares donde las estrellas son de gran masa, jóvenes y están rodeadas todavía por la nube de la cual se formaron (se les llama regiones III), y lugares en donde recientemente se ha desbaratado una estrella de masa intermedia y la estrella central es caliente, rodeada por el gas que ha arrojado al espacio (nebulosas planetarias).

Regiones III. Son nubes de hidrógeno ionizado iluminadas por estrellas jóvenes y calientes, que se encuentran frecuentemente en sus inmediaciones, lo cual no debe de sorprendernos, ya que las estrellas calientes y masivas, productoras de radiación ultravioleta ionizante, se formaron justamente a partir de estas nubes. Son regiones muy bellas y espectaculares en



Burbujas, supernovas y polvo interestelar

Las burbujas interestelares son objetos espectaculares que se presentan bajo la forma de un cascarón ionizado más o menos esférico y regular. A pesar de que se les distingue por la emisión de un gas ionizado, como la de las nebulosas gaseosas, su espectro es muy diferente, ya que el gas de estas últimas está ionizado por la radiación ultravioleta de estrellas muy calientes, mientras que el gas de las burbujas está ionizado a causa de una compresión provocada por una onda de choque de materia que ha sido lanzada a gran velocidad por la estrella al centro de la burbuja. Esto puede ocurrir ya sea por la producción de vientos rápidos y muy calientes expulsados por una o varias estrellas masivas centrales, o por una o varias explosiones de supernovas. En ambos casos la burbuja está sostenida por un gas muy caliente (de un millón de grados o mayor) que ejerce una fuerte presión y crea la onda de choque que se propaga hacia el medio exterior y la comprime fuertemente.

todo el espectro electromagnético, pues emiten radiación desde el ultravioleta hasta las ondas de radio. En luz visible presentan emisión brillante de hidrógeno y helio así como de otros elementos —oxígeno, nitrógeno, argón y neón.

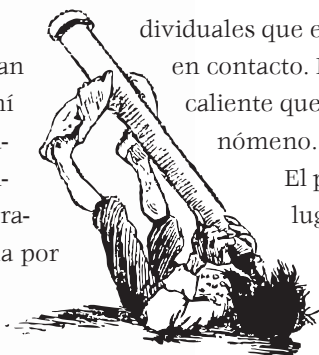
Del estudio de su radiación se puede deducir la temperatura (del orden de 10 000 °K) y la densidad del gas (de 10 a 10 000 partículas por centímetro cúbico). La abundancia de elementos como oxígeno, nitrógeno, carbono, neón, azufre, etcétera, con respecto del hidrógeno, puede ser deducida a partir de la intensidad de las líneas correspondientes. Las nebulosas gaseosas ofrecen prácticamente el único medio de conocer la composición química de las galaxias.

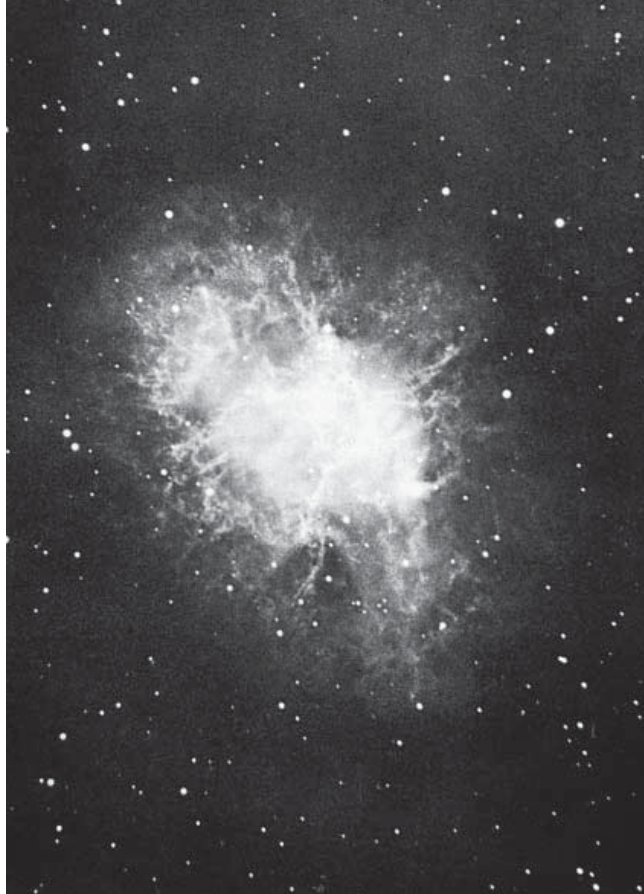
Nebulosas planetarias. Son las pequeñas nebulosas ionizadas, generalmente muy brillantes, que se hallan alrededor de una estrella caliente en las fases finales de su evolución; están formadas por el gas arrojado por la estrella central. Son de formas muy caprichosas y su apariencia es espectacular. A pesar de la diferencia de orígenes, la radiación que proviene de las nebulosas planetarias es muy semejante a aquella de las regiones H II, ya que los procesos microscópicos son muy semejantes. También en este caso se puede determinar con gran precisión la composición química del gas, y de ahí determinar las modificaciones que sufrió dicha materia. Se puede determinar que, en general, formando parte integral de la estrella, esta materia fue ligeramente alterada durante la evolución de la estrella por las reacciones nucleares ocurridas en el interior del astro.

El gas interno, y sobre todo el gas comprimido detrás de la onda de choque, es tan caliente que emite rayos X. La radiofuente más brillante del cielo, Casiopea A, es un resto de supernova. Algunas burbujas presentan también emisión de rayos gamma de muy alta energía.

El medio interestelar puede ser muy caliente, en algunas direcciones donde se observan espectros ultravioleta de algunas estrellas lejanas se ven líneas interestelares en absorción, las cuales se deben a que los elementos del gas están muy ionizados, indicando temperaturas muy elevadas (cercas a 500 000 °K). Las observaciones de rayos X muestran la existencia de temperaturas aún más altas. Algunas de estas nubes de gas calentísimo corresponden a restos de supernovas, pero otras son regiones muy extensas donde el gas está muy caliente y muy diluido. Estas últimas son de tales dimensiones, que en realidad, llenan la mayor parte del volumen del espacio interestelar, y posiblemente sean el resultado de la fusión de burbujas individuales que en el curso de su expansión han entrado en contacto. Nuestra galaxia está rodeada de un halo caliente que parece ser una prolongación de este fenómeno.

El polvo interestelar acompaña en todos los lugares al gas interestelar. Su masa total es apenas del orden de una centésima parte de aquella del gas de la galaxia y sin embargo juega un papel desproporcio-





Pero, ¿cómo se forman las estrellas?

Las estrellas se forman en las nubes moleculares por contracción gravitacional de las partes más densas. El interior de las nubes pequeñas, que son más frías, es el sitio de formación de estrellas de poca masa, las cuales se pueden observar en el infrarrojo. En ocasiones las estrellas recientemente formadas se observan en fases más avanzadas en la periferia de las nubes moleculares, cuando ya han disipado parcialmente las nubes que les dieron origen. Por su parte, las nubes moleculares gigantes son sitios de formación de estrellas que pueden tener masas de todas magnitudes.

Aunque suponemos que esta descripción es válida a grandes rasgos, es importante señalar que falta conocer muchos detalles sobre la teoría de la formación de las estrellas. Las nubes moleculares en general tienen una estructura fragmentada, probablemente fractal, y los fenómenos físicos que intervienen en su condensación son complejos, en particular la turbulencia que debe probablemente existir en ellas.

Podemos describir la formación de las estrellas de manera muy simplificada. Supongamos una nube esférica y no fragmentada que está en el límite de la estabilidad gravitacional; es decir donde la atracción gravitacional está apenas compensada por la presión del gas. Un aumento en la presión —debido, por ejemplo, al paso de una onda de choque que provenga de una supernova vecina— puede iniciar la contracción. Esto no ocurre de manera homogénea; las partes interiores se contraen más rápidamente que las exteriores. El calor que resulta de esta contracción se compensa por la radiación que emite la nube, pero llega un momento en que el espesor de la materia

es tal, que la nube se vuelve opaca aun en el infrarrojo lejano y en ondas de radio y milimétricas, por lo que ya no puede disipar el calor provocado por la contracción. En estas condiciones la materia se calienta continuamente a medida que su densidad aumenta y el núcleo denso de la nube continúa creciendo gracias a la caída del material que lo rodea. Si la masa es de más de 0.08 veces la del Sol, las reacciones nucleares pueden iniciarse y por lo tanto formar una estrella. Si la masa es menor, resulta una estrella abortada, una enana café.

nado. Las dimensiones de este polvo son de unos cuantos nanómetros, y absorben y difunden selectivamente la luz de las estrellas, es decir que actúan más sobre la luz ultravioleta que sobre la roja e infrarroja. Las nubes moleculares son totalmente opacas en luz visible debido al polvo contenido en ellas; son gradualmente más transparentes cuando se trata del infrarrojo cercano y aún más en el infrarrojo lejano; el efecto de la absorción del polvo sobre las ondas de radio es totalmente irrelevante.

Los granos de polvo interestelar están constituidos de silicatos o grafito. En las nubes moleculares se encuentran al abrigo de la radiación ultravioleta y, por tanto, están recubiertos de una capa de hielo de agua y otras moléculas (CO, CO₂, CH₄, NH₃, etcétera) que se puede detectar por las bandas de absorción características en el infrarrojo medio.

Aunque desconocemos en gran medida la naturaleza y propiedades del polvo, lo que se acepta comúnmente es que se forma por aglomeración de moléculas en la atmósfera de las estrellas gigantes frías. Los granos de grafito se forman en las estrellas de carbono y los granos de silicatos en las estrellas ricas en oxígeno y en silicio que son las más numerosas.



En general, cuando la nube es extendida tiene un pequeño giro, y a medida que se contrae gira más rápidamente, pues su momento angular se debe conservar. Es decir, la rotación se hace cada vez más rápida y tiende a oponerse una mayor contracción. El dilema de contraerse y mantener el momento angular se resuelve cuando alrededor de la estrella en contracción se forma un disco en rápida rotación. Así se puede explicar el origen de nuestro Sistema planetario, ya que los planetas se formaron a partir del disco de rotación que rodeaba la estrella central, la cual se convertiría en el Sol.

La evolución de la materia interestelar

La materia interestelar en nuestra galaxia está en perpetua evolución. Continuamente se están formando nuevas

estrellas a partir de las nubes de gas molecular. Las estrellas modifican la composición química de su interior por medio de transformaciones nucleares, y su comportamiento depende de su masa: las de mayor masa arrojan violentamente gran parte de su masa al espacio en relativamente poco tiempo (en unos cuantos millones de años); las de masa intermedia lo hacen más tardíamente (en decenas de miles de millones de años); mientras que las de menor masa no han tenido tiempo de concluir su evolución y no arrojan materia al espacio. Debido a lo anterior, la materia interestelar se ve continuamente modificada en las distintas regiones de la galaxia tanto en densidad y temperatura, como en composición química. El estudio de la materia interestelar en nuestra galaxia y otras galaxias nos permite conocer la historia de la formación de las estrellas.



Silvia Torres

Instituto de Astronomía,
Universidad Nacional Autónoma de México.

IMÁGENES

P. 32: Viñeta, siglo XX. P. 33: Las estrellas, grabado inglés, siglo XVIII. P. 34: El uso del astrolabio, grabado francés, siglo XVI; Viñeta, siglo XX. P. 35: Nebulosa del Velo en la constelación del Cisne; Viñeta, siglo XX. P. 36:

Nebulosa de la Laguna, Monte Palomar. P. 37: Galaxia en espiral NGC 4414; Viñeta, siglo XX. P. 38: Nebulosa del Cangrejo en la constelación de Tauro; Nicolás Bonnat, *L'astrologie*, 1690. P. 39: Viñeta, siglo XX.

THE MATTER BETWEEN THE STARS

Palabras clave: Estrella, gas interestelar, nubes moleculares, regiones de transición, nebulosas gaseosas, burbujas interestelares, polvo interestelar.

Key words: Star, interstellar gas, molecular clouds, transitional regions, gaseous nebulae, interstellar bubbles, interstellar dust.

Resumen: Existe un espacio entre las estrellas que contiene una cantidad considerable de materia nubes densas de gas y polvo que genera algunos de los fenómenos que observamos. Esta materia interestelar da lugar a la formación constante de nuevas estrellas y su estudio nos permite conocer la historia de la formación de las estrellas en nuestra y otras galaxias.

Abstract: There is a space between the stars that contains a considerable quantity of matter dense clouds of gas and dust which produces some of the phenomena we observe. This interstellar matter gives rise to the constant formation of new stars and studying it helps us to unravel the formative history of the stars in our galaxy and in others.

Silvia Torres es investigadora emérita del Instituto de Astronomía de la UNAM, y editora de la *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*. Sus estudios combinan los aspectos de la astrofísica observacional con las teorías físico-matemáticas que le dan profundidad a las observaciones.

Recibido el 12 de mayo de 2009, aceptado el 20 de mayo de 2009.