

Capítulo 4

Formación estelar y medio interestelar en la Vía Láctea

4.1. Introducción

La materia y energía entre las estrellas, el medio interestelar, es de vital importancia para la evolución galáctica, ya que en este medio se forman las estrellas, y es a este medio al que las estrellas devuelven materia enriquecida en elementos pesados, que son esenciales tanto para la formación de los planetas como para el desarrollo y evolución de la vida.

4.2. Procesos de la formación estelar

Las estrellas se forman en regiones densas localizadas en las nubes moleculares gigantes de las galaxias. Si bien los mapas trazados con ondas milimétricas son capaces de localizar las nubes moleculares en galaxias externas, se ne-

cesitan observaciones de mayor resolución angular para describir la dinámica interna de las nubes y derivar las condiciones iniciales de la evolución protoestelar. Esta resolución sólo se puede alcanzar en las regiones de formación estelar de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. El GTM posee un amplio abanico de instrumentos para investigar la gama de escalas y procesos relacionados con la formación estelar en las nubes moleculares de la Vía Láctea. La capacidad del GTM de cartografiar rápidamente la emisión de las líneas moleculares y del continuo térmico del polvo, permite investigar la dinámica global de las nubes, el desarrollo de nódulos masivos y concentraciones preprotoestelares desde un substrato de baja densidad, el colapso gravitatorio del material en discos circunestelares, y el desarrollo de vientos estelares. La baja latitud geográfica del sitio del GTM representa una gran ventaja para este tipo de proyectos, puesto que permitirá observar las regiones centrales de la Vía Láctea, para caracterizar condiciones del gas interestelar más extremas que las de la vecindad solar. Con el GTM será posible observar tanto las regiones de formación estelar más distantes del anillo molecular, como la región del Centro Galáctico.

Para comprender con precisión los procesos que llevan a la formación de las estrellas se requiere una descripción de la dinámica de las nubes moleculares. Tal descripción fija la escala de tiempo con la que la nube puede producir una generación de estrellas, y también el modo de formación, ya sea agrupado o distribuido. Las imágenes de alta resolución de nubes moleculares cercanas revelan una red de filamentos, cascarones y nódulos de gran densidad, que reflejan la complejidad de la dinámica que caracteriza a las nubes. Dicha complejidad es producto de los movimientos expansivos de las regio-



Figura 4.1: Imagen en color compuesto de la emisión en rayos-X del centro de la Vía Láctea, elaborada con datos del satélite Chandra. La gama de colores corresponde a la energía de los rayos-X: desde el rojo (baja) al azul (alta). Esta región de la Galaxia es rica en gas molecular, habiéndose detectado en ella casi todas las moléculas interestelares conocidas. [Créditos: D. Wang, UMass Amherst].

nes H II y los vientos estelares, así como de la interacción entre las presiones magneto-turbulentas y la gravitación propia de la nube. La determinación de la importancia relativa entre los campos magnéticos, la turbulencia y los choques producidos por los vientos, es uno de los objetivos centrales de los estudios contemporáneos de nubes moleculares, y el tema de un agitado debate entre los astrónomos teóricos.

El GTM resolverá este debate mediante observaciones que impondrán condiciones de contorno a los modelos teóricos del medio interestelar y de la formación estelar. Los mapas de gran campo trazados con el GTM darán una gran cantidad de información dinámica, mucho más rica que la ofrecida por los telescopios milimétricos y los interferómetros con los que contamos hoy en

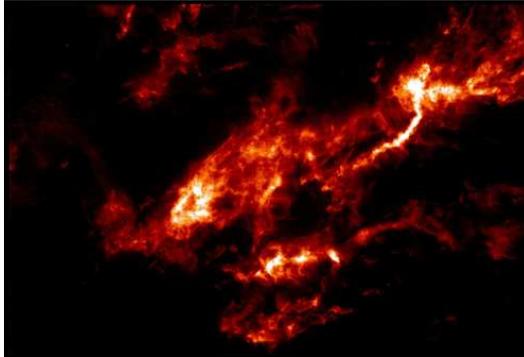


Figura 4.2: Imagen de la emisión $^{13}\text{CO } J = 1 - 0$ de la nube molecular de Tauro, una región de formación estelar observada por el telescopio de 14m del FCRAO con el receptor SEQUOIA. El GTM podrá cartografiar sistemas de formación estelar mucho más lejanos, y explorar un abanico mucho más amplio de medios interestelares. [Créditos: M. Heyer, UMass Amherst/FCRAO].

día, ya que se recobrarán tanto las escalas espaciales pequeñas como las grandes. Asimismo, la doble polarización de los sistemas heterodinos del GTM permite detectar y cartografiar el efecto Zeeman en las nubes moleculares y determinar las variaciones espaciales del campo magnético.

Se han identificado dos modos de formación estelar en las nubes moleculares: distribuido y agrupado. La formación estelar distribuida ocurre en nódulos pequeños (0.1 pc), aislados, de baja masa $\sim 1-10 M_{\odot}$ y alta densidad, de alrededor de diez mil moléculas por cm^3 , que generan típicamente una sola estrella de baja o moderada masa. La nube molecular de Tauro es un ejemplo prototípico de dicho modo de formación estelar. La mayor parte de los esfuerzos teóricos y observacionales para entender la formación estelar se han centrado en este modo básico y fundamental. Sin embargo, la mayoría

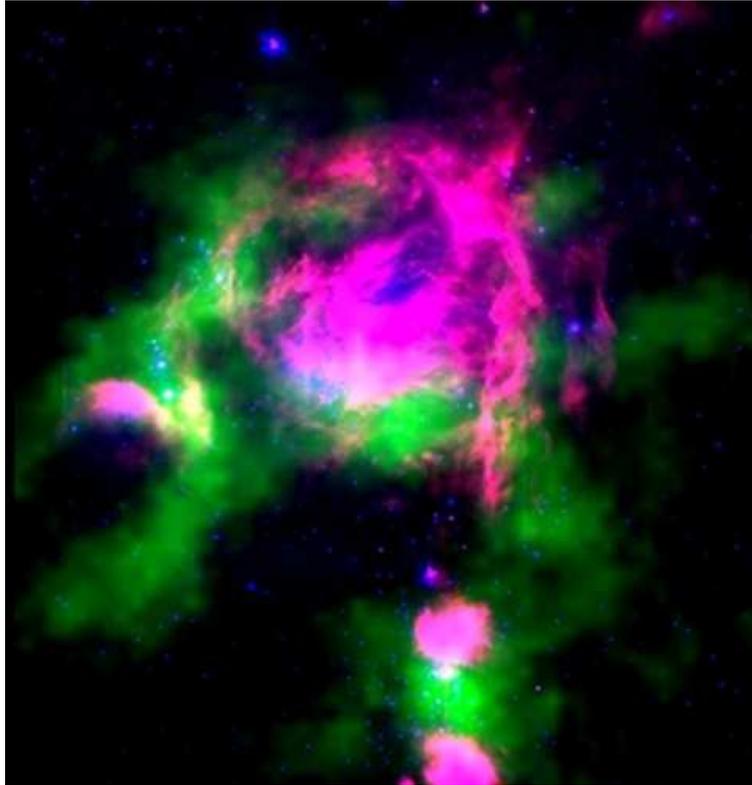


Figura 4.3: Imagen en color compuesto de la región de formación estelar Sharpless 235, cartografiada por el Telescopio Espacial Spitzer. En azul se muestran las estrellas embebidas en la nube y las estrellas de fondo. En rosa se representa la emisión de los hidrocarburos policíclicos aromáticos que están excitados por la radiación ultravioleta de las estrellas masivas. En verde se muestra la distribución de $^{13}\text{CO } J = 1 - 0$. [Crédito: J. L. Hora et al. ©AAS^[1]].

de las estrellas de la Galaxia emergen de sitios con formación estelar agrupada, que no está tan bien caracterizada. Las regiones densas en las que se forman los cúmulos de estrellas son más extensas, de 0.5–1 pc, más masivas, de 1000 a 10000 M_{\odot} , y densas, 1 millón de moléculas por cm^3 , y más inhomogéneas que los nódulos asociados con la formación estelar distribuida. Las regiones en las que se forman cúmulos estelares pueden llegar a generar entre 100 y 1000 estrellas, y son casi exclusivamente sitios de formación estelar masiva. Los nódulos masivos son brillantes tanto en líneas moleculares como en emisión térmica del polvo, y se suelen asociar con regiones H II compactas o evolucionadas. No obstante, hay pocas regiones cercanas de este tipo que puedan ofrecer datos sobre sus orígenes en las nubes moleculares, y sobre las interacciones complejas que deben de ocurrir entre las protoestrellas ahí embebidas.

El GTM producirá una descripción definitiva de los nódulos masivos del medio interestelar de la Vía Láctea. Los instrumentos AzTEC y SPEED cartografiarán la emisión del polvo que permitirá identificar los objetos protoestelares dentro de los nódulos masivos, complementando las medidas tomadas por el Telescopio Espacial Spitzer. La dinámica local y la química de los nódulos masivos se determinará mediante los mapas de las líneas de emisión moleculares, que trazan directamente la distribución del gas. Las medidas complementarias definirán el acoplamiento entre la dinámica y las condensaciones protoestelares.

La formación de una estrella es el resultado del colapso gravitatorio de una parcela de gas denso en una nube molecular. El estudio de las protoes-

trellas permite conocer las condiciones iniciales requeridas para propiciar la formación estelar, la evolución protoestelar, y la formación de sistemas solares como el nuestro. En las etapas más tempranas de la formación estelar, las protoestrellas están embebidas en un caparazón de gas y polvo, y, por lo tanto, no son observables con telescopios ópticos e infrarrojos. En cambio, las ondas milimétricas sí pueden penetrar el polvo y darnos evidencia espectral de los movimientos de caída del gas hacia las regiones protoestelares. Las medidas milimétricas han impuesto restricciones sobre la velocidad de caída, el momento angular, y el perfil de densidad de los nódulos protoestelares. Sin embargo, la sensibilidad de los telescopios con los que contamos hoy en día imposibilita observar una de las etapas del colapso de las protoestrellas, cuando el radio de caída es grande y las velocidades son pequeñas. La gran apertura del GTM nos permitirá estudiar el colapso de estos objetos protoestelares en sus etapas más tempranas. Aunado a lo anterior, la resolución ofrecida por el GTM puede distinguir los movimientos asociados con caídas de los movimientos de rotación o de eyección, que también pueden estar presentes en el colapso gravitatorio.

4.3. Astroquímica

Las nubes moleculares son las estructuras más grandes del Universo cuya composición está gobernada por ligaduras químicas. La química interestelar es científicamente importante por sí misma, y también por sus aplicaciones a problemas astrofísicos tales como la formación estelar, donde el acoplamiento de los campos magnéticos a los iones moleculares y el enfriamiento

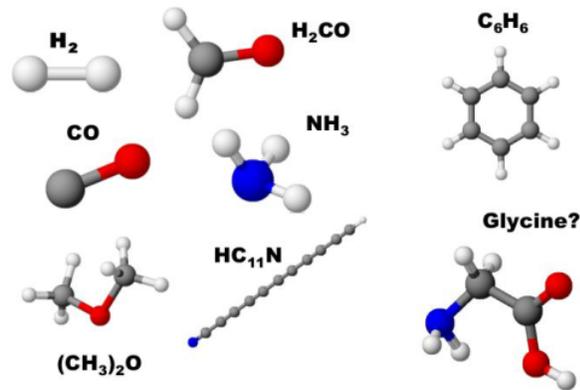


Figura 4.4: Galería de moléculas, de entre las aproximadamente 130 moléculas conocidas en el medio interestelar y circunestelar. La detección del aminoácido más simple, la glicina, es controvertida, y será uno de los temas que el GTM investigará. En blanco se representa el hidrógeno, en gris el carbono, en rojo el oxígeno, y en azul el nitrógeno. [Créditos: P. Ehrenfreund, Univ. Leiden].

de las nubes a través de transiciones moleculares son procesos críticos. Las temperaturas extremadamente bajas ($\lesssim 10$ K) y densidades de las nubes, las convierte en laboratorios únicos para el estudio de ciertas moléculas, cuyas características no se han podido estudiar antes en laboratorios terrestres^[2]. Por último, puesto que algunas moléculas orgánicas pueden estar presentes en cometas, y es plausible que éstos las hayan traído a la Tierra en etapas primitivas, es concebible que el material exógeno haya sido un elemento fundamental en el origen de la vida terrestre^[3].

Aunque conocemos muchos aspectos de la química de las nubes interestelares densas, también desconocemos aspectos tales como las reacciones de la fase gaseosa, los procesos experimentados por los granos de polvo, y el efecto

que los campos de radiación y los rayos cósmicos tienen sobre el gas y el polvo. Los problemas son numerosos: *(i)* las abundancias químicas absolutas son difíciles de determinar, su cálculo depende de las condiciones físicas del medio, y estas condiciones varían significativamente dentro de las nubes, y entre nube y nube; *(ii)* las tasas de reacción y los cocientes de desglose de la fase gaseosa probablemente no se conocen lo suficientemente bien para las temperaturas extremas que reinan en las nubes moleculares; *(iii)* la naturaleza de la superficie de los granos de polvo se desconoce y, por lo tanto, los procesos que sufren los granos no están bien constreñidos; y *(iv)* no sabemos cuál es la tasa de intercambio de materia entre la fase sólida y gaseosa de las nubes.

Para refinar los modelos químicos se requieren medidas de la abundancia en condiciones físicas diversas, y además se deben identificar nuevas especies moleculares. La urgencia por obtener estas medidas en especies no-polares y en agregaciones sólidas de la materia, en conjunción con la mayor sensibilidad de los detectores infrarrojos con los que se cuenta hoy en día, está empujando la explotación de las transiciones vibracionales en el infrarrojo. No obstante, la mayor parte de la información química obtenida hasta el momento proviene de transiciones rotacionales emitidas en ondas milimétricas y submilimétricas observadas con equipos heterodinos. La alta sensibilidad del GTM permitirá observar detalladamente tales transiciones, y de ahí derivar la química de las nubes interestelares, los discos protoplanetarios y los cometas.

El alto poder cartográfico del GTM posibilitará la comparación exhaus-

tiva del contenido químico de una gran variedad de nubes moleculares en distintos estados de evolución, entornos y condiciones físicas. De igual manera, el GTM evaluará las fracciones isotópicas y su dependencia con los parámetros físicos y evolutivos de las nubes. Los resultados se interpretarán en el contexto de las preguntas fundamentales sobre la importancia relativa de la fase puramente gaseosa frente a la síntesis superficial de moléculas complejas en los granos del medio interestelar, y la relación entre las moléculas interestelares, la química de objetos del Sistema Solar primitivo, como los cometas, la inyección de moléculas orgánicas provenientes del espacio en la Tierra primitiva, y la importancia de dichas moléculas en el origen de la vida.

4.4. Pérdida de masa estelar

Cuando las estrellas se expanden y ascienden por la rama de las gigantes rojas, su gravedad superficial se desploma, y se generan vientos estelares que retornan grandes cantidades de materia al medio interestelar. El gas reciclado es rico en elementos pesados, básicos para la generación de la vida y para la creación de trazadores moleculares de la densidad, temperatura y abundancias químicas del medio interestelar. Las estimaciones de la pérdida de masa y las condiciones físicas de las envolturas de estrellas evolucionadas dan información fundamental sobre la evolución estelar y el efecto de la formación estelar en las estructuras galácticas.

Los máseres compactos y brillantes de varias especies y transiciones moleculares pueden utilizarse en regiones ricas en moléculas para trazar la dinámica del gas y sus condiciones físicas hasta escalas mucho más pequeñas que las

de las fotosferas estelares. Ya se han elaborado películas, con observaciones del VLBI a 43 GHz de la emisión máser de SiO ($J = 1 - 0$) que rodea la variable Mira TXCam^[4], mostrando que las pulsaciones estelares inyectan y eyectan gas en configuraciones claramente asimétricas. Los resultados del VLBI son importantes para entender los procesos de pérdida de masa, pero, en realidad, se necesitan transiciones múltiples del máser para determinar las condiciones físicas del gas en toda la envoltura circunestelar. El GTM puede expandir el intervalo de frecuencias observables del VLBI y caracterizar en un intervalo de frecuencias amplio máseres como éste. Cuando se acople con el VLBA, el GTM creará un VLBI con base espectral ultrasensible a 86 GHz que cubrirá la transición máser SiO $J = 2 - 1$. El GTM, además, se acoplará a otras antenas milimétricas para cartografiar transiciones que se encuentran a mayores frecuencias, como las de las especies moleculares del agua, metanol, HCN y SiO, que se localizan en el intervalo de 86 – 230 GHz. La exploración de estas transiciones con el VLBI permitirá caracterizar de forma más completa la dinámica del gas y las condiciones físicas y abundancias químicas de esta importante clase de estrellas.

Referencias

- [1] Hora, J. L. et al. (2004), “The Role of Photodissociation Regions in Massive Star Formation”, Amer. Ast. Soc. Meeting 204, #41.12.
- [2] Bell, M.B. et al. (1987), “Deuterium Hyperfine Structure in Interstellar C3HD”, Chem. Phys. Lett., 136, 588.
- [3] Ehrenfreund, P. et al., eds. (2004), “Astrobiology: Future Perspectives”, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- [4] Diamond, P. y Kemball, A. (2003), “A Movie of a Star: Multiepoch Very Long Baseline Array Imaging of the SiO Masers toward the Mira Variable TX Cam”, Astrophys. J., 599, 1372.

