

EL MEDIO MOLECULAR EN GALAXIAS CON BROTES DE FORMACIÓN ESTELAR Y EN GALAXIAS ACTIVAS

Antonio Usero

*Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*

Abstract

Massive star formation and nuclear activity in galaxies result from the interplay between the energy sources (stars and active galactic nuclei) and their gas reservoirs (the interstellar medium) through feeding and feedback mechanisms. These processes trigger energy and mass flows that significantly impact on galaxy evolution. We review some current attempts to characterize the interstellar medium in starburst and active galaxies by means of multispecies molecular line observations. The potential of molecular gas chemistry as a diagnostic tool for star formation and nuclear activity is emphasized.

Introducción

De acuerdo con los modelos cosmológicos de mayor aceptación la evolución del Universo está gobernada por la fuerza gravitatoria de una energía ubicua y desconocida (*energía oscura*) y la de una materia sin identificar que no emite radiación electromagnética (*materia oscura*). La materia y la radiación electromagnética como las que componen nuestro mundo más inmediato, al sumar apenas un $\sim 4\%$ de la energía total del Universo, quedan a merced de los dos componentes mayoritarios. Como resultado de esto, buena parte de la materia y de la energía ordinarias se acumula en los núcleos de grandes masas de materia oscura en forma de galaxias. Estas

son grandes concentraciones de estrellas inmersas en un medio interestelar de gas y de polvo. Gracias a la radiación electromagnética que recibimos de ellas, las galaxias actúan como faros cuyas características (tamaño, luminosidad, población estelar, etc.) y distribución en el Universo tratan de reproducir los modelos cosmológicos.

Durante los últimos años se ha acumulado indicios de que, en su evolución, las galaxias no han sido meros elementos pasivos, sino que han regulado en parte su propio crecimiento. En concreto, no es fácil explicar de otro modo por qué la proporción de galaxias de gran y de pequeño tamaño que se observa es menor de lo que se preveía; tampoco por qué en las galaxias menores han seguido naciendo estrellas durante más tiempo que en las mayores aun cuando estas se formaron con posterioridad a aquellas. Los mecanismos más prometedores para explicar la autorregulación son dos de los fenómenos más violentos que pueden acontecer en una galaxia: los brotes de formación estelar masiva y los núcleos activos.

Tanto las galaxias *con brotes de formación estelar masiva* (*galaxias BFE* de aquí en adelante) como las que albergan *núcleos activos* (*galaxias activas* en adelante) se cuentan entre los objetos más espectaculares del Universo. En las primeras se alcanzan tasas de formación estelar hasta mil veces mayores que en las galaxias que forman estrellas a un ritmo *normal*; en las segundas, la energía radiada desde un volumen menor que un parsec¹ cúbico llega a ser más de mil veces superior a la emitida por nuestra galaxia, La Vía Láctea. Los grandes flujos de materia y energía que tienen lugar en estos objetos no sólo afectan a las galaxias donde se originan, sino que pueden alterar el medio intergaláctico cercano.

La marcha de los brotes de formación estelar y de los episodios de actividad nuclear está regulada por la interacción entre las fuentes de energía (estrellas y núcleos activos) y el medio interestelar mediante *mecanismos de alimentación y de realimentación*: por aquellos, la materia interestelar fluye y se acumula en las regiones donde las estrellas y los núcleos activos producen energía a su costa; por estos, las estrellas y los núcleos activos depositan energía en su entorno mediante campos de radiación y flujos de materia. Los efectos de la realimentación pudieron ser de relevancia cósmica en el Universo pasado, cuando estos fenómenos eran más violentos y frecuentes.

A pesar de la importancia que se atribuye a los efectos de la formación estelar masiva y de los núcleos activos escasean las medidas precisas de hasta qué punto influyen estos en la evolución galáctica. Es muy razonable esperar que parte de la respuesta se halle en la evolución del medio molecular. El *medio molecular* es la fase del medio interestelar que

¹El parsec (pc) es una unidad de longitud empleada en Astronomía que equivale a 3,26 años-luz.

predomina en los kiloparsecs centrales de las galaxias, donde surgen los brotes de formación estelar masiva y se forman los núcleos activos. De hecho, el gas molecular es la materia prima de ambos, pues las estrellas nacen en nubes moleculares densas, mientras que los núcleos activos se alimentan de los discos circunucleares de gas molecular. Por ello, es de interés evaluar cómo la radiación de alta energía y los flujos de materia que se producen en los episodios de formación estelar y en los de actividad nuclear alteran el medio molecular. Este artículo pretende ofrecer una perspectiva general de cómo el estudio de la composición del medio molecular puede ayudarnos a comprender unos fenómenos que, en última instancia, han influido en la evolución de las galaxias.

Galaxias con brotes de formación estelar masiva (BFE) y galaxias con núcleos activos (activas)

Galaxias BFE

La fuente principal de la radiación de la mayoría de las galaxias² son sus estrellas. Estas se crean a partir de densas acumulaciones de gas molecular interestelar, de cuya energía gravitatoria obtienen energía electromagnética mediante reacciones termonucleares. En galaxias *estándar*, como la Vía Láctea, la formación de nuevas estrellas es tan pausada que, de proceder a un ritmo invariable, requeriría un lapso mayor que la edad actual del Universo (unos 13 700 millones de años) para agotar todo el gas interestelar. Por contra, en las galaxias BFE las tasas de formación estelar son tan altas que todo el medio gaseoso se consumiría en unos 10 ó 100 millones de años, apenas un instante en escalas cósmicas.

Actualmente se cree que las galaxias BFE no son intrínsecamente distintas del resto, sino que se encuentran en una etapa particular de su evolución a consecuencia del nacimiento súbito de un gran número de estrellas. Durante un lapso menor de cien millones de años tras el comienzo del brote de formación estelar las estrellas de mayor masa³ ($\gtrsim 8 M_{\odot}$), cuya vida es mucho más breve que la de sus compañeras más ligeras, son más abundantes de lo habitual. Las consecuencias para el medio interestelar circundante son importantes a causa de la celeridad con la que las estrellas masivas expelen grandes cantidades de energía. Inicialmente el medio recibe grandes dosis de radiación estelar particularmente intensa en el rango del ultravioleta. Más adelante el medio se ve expuesto a los vientos estelares con los que las estrellas masivas se deshacen de parte de su masa y, finalmente, a las explosiones supernova en las que estas se destruyen.

²Ignorando por un momento el procesamiento de esa radiación por el gas y el polvo interestelares.

³Los símbolos M_{\odot} y L_{\odot} corresponden a la masa y la luminosidad del Sol respectivamente.

Un ejemplo de galaxia BFE es M 82, de la cual se muestra una imagen en la figura 1.

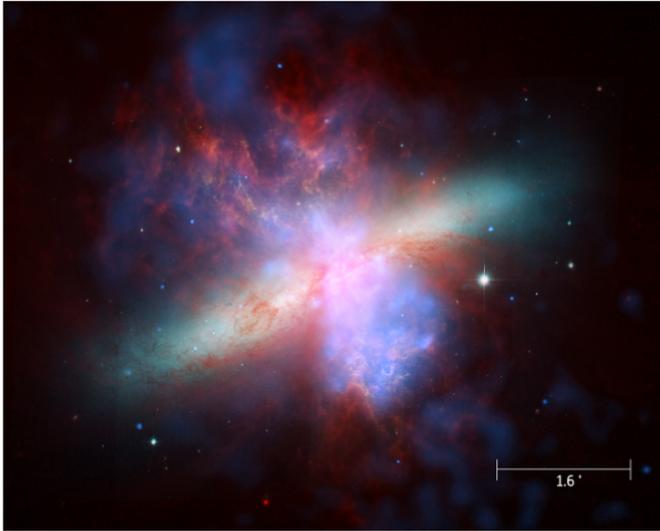


Figura 1: Mosaico multicolor de la emisión de la galaxia BFE M 82 compuesto por imágenes obtenidas con los telescopios espaciales Spitzer (continuo en el infrarrojo medio, en rojo), Hubble (continuo en la banda B del visible, en verde, y línea $H\alpha$, en naranja) y Chandra (continuo de rayos X, en azul). La figura está rotada respecto al plano del cielo para minimizar su tamaño. El mosaico muestra cómo el gas caliente del viento galáctico (rojo-azul) creado por la concurrencia de explosiones supernova se expande perpendicularmente al disco estelar de la galaxia (verde). Cortesía de NASA/CXC/JHU/D.Strickland (rayos X), NASA/ESA/STScI/AURA/Hubble Heritage Team (visible y $H\alpha$) y NASA/JPL-Caltech/Univ. of AZ/C.Engelbracht (infrarrojo).

Las galaxias BFE generan el $\sim 10\%$ de la radiación y forman el $\sim 25\%$ de las estrellas masivas del Universo en el presente. Los brotes de formación estelar masiva constituyeron la principal fuente de energía del $\sim 70 - 80\%$ de las galaxias *Luminosas en el Infrarrojo* (LIR), *Ultra-Luminosas en el Infrarrojo* (ULIR) e *Hiper-Luminosas en el Infrarrojo* (HLIR), que fueron relativamente abundantes en el pasado. La intensa luminosidad en el infrarrojo, L_{IR} , de estos objetos ($L_{IR} \gtrsim 10^{11} L_{\odot}$, $10^{12} L_{\odot}$ y $10^{13} L_{\odot}$ respectivamente) se debe a la emisión del polvo interestelar calentado por la radiación estelar. Es muy probable que el mismo mecanismo explique la intensa emisión ($\gtrsim 10^{13} L_{\odot}$) en el submilimétrico ($0,3 < \lambda < 1$ mm)

de las galaxias *submilimétricas*, las cuales abundaron cuando la edad del Universo era de dos o tres mil millones de años. Todos estos objetos se observan hoy día tal como eran en el pasado debido a que, al estar muy alejados de nosotros, su luz ha invertido miles de millones de años en viajar hasta La Tierra.

Galaxias activas

Una galaxia alberga un núcleo activo cuando en su región central se da una intensa producción de energía que no puede atribuirse a procesos de formación estelar. Un ejemplo de galaxia activa es NGC 1068, la cual está representada en la figura 2.

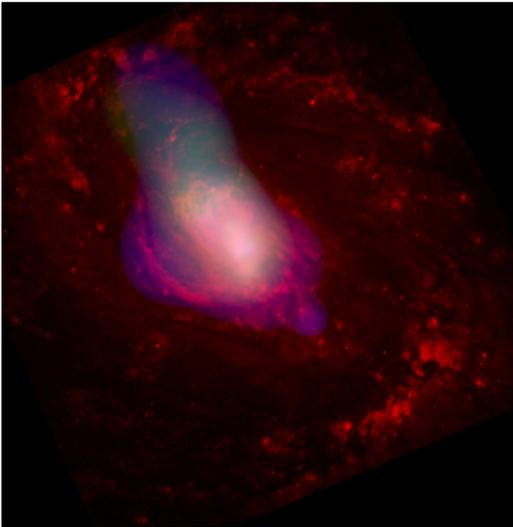


Figura 2: Mosaico multicolor de la emisión de la galaxia BFE+activa NGC 1068 compuesto por imágenes obtenidas con los telescopios espaciales Hubble (línea $H\alpha$, en rojo) y Chandra (continuo de rayos X en los rangos 0,4-1,3 keV y 1,3-8,0 keV, en azul y verde respectivamente). Los ejes horizontal y vertical corresponden a los de Ascensión Recta y Declinación, respectivamente. La figura cubre una región de 30 segundos de arco de lado. El mosaico muestra el gas ionizado del disco galáctico (rojo) y el cono de radiación que surge del núcleo activo de la galaxia (azul-verde). El gas ionizado que bordea la imagen está situado a lo largo de un anillo de intensa formación estelar. Cortesía de NASA/CXC/MIT/UCSB/P.Ogle et al. (rayos X) y NASA/STScI/A.Capetti et al. ($H\alpha$).

De acuerdo con el modelo más aceptado la energía surge de un núcleo activo por la caída de materia interestelar en un agujero negro de entre $10^6 M_{\odot}$ y $10^{10} M_{\odot}$ de masa situado en el centro galáctico. Por medio de este mecanismo la materia proporciona energía con más eficiencia que en las estrellas, lo cual explica cómo desde un volumen $\lesssim 1 \text{ pc}^3$ se llega a radiar tanta o más energía que desde una galaxia entera sin consumir una cantidad exorbitante de gas interestelar. El crecimiento de los agujeros negros se produce probablemente a través de un disco de gas ionizado muy caliente de pequeño tamaño ($< 1 \text{ pc}$) ceñido por un denso *toro* de gas molecular y de polvo. La materia del toro entra en el disco de crecimiento y, a medida que su energía se disipa en forma de calor y de radiación y que su movimiento se ralentiza, cae irremediamente en el pozo gravitatorio del agujero negro. A la radiación que esto genera le acompaña en ocasiones un potente chorro bidireccional de plasma que puede alejarse hasta cientos de miles de parsecs.

En el Universo local hay núcleos activos en el $\sim 43\%$ de las galaxias. La luminosidad total de todos los núcleos activos fue máxima cuando el Universo contaba con dos o tres mil millones de años de vida y ha decrecido desde entonces.

Alimentación

En general un brote de formación estelar está confinado en una región circunuclear de entre cien y mil parsecs de radio dentro de la galaxia que lo alberga. Para sostener la elevada tasa de formación estelar una buena parte del medio interestelar galáctico se ha de acumular en la región donde nacen las estrellas en el breve tiempo que dura el brote. Por su parte, los núcleos activos requieren una menor cantidad de materia para alimentarse pero, por su diminuto tamaño ($< 1 \text{ pc}$), no es fácil que el movimiento del gas interestelar se ralentice lo suficiente como para que este caiga sobre ellos. Las galaxias activas/BFE y las “estándar” se diferencian, por tanto, en la eficacia con la que ciertos *mecanismos de alimentación* conducen parte del gas interestelar hacia su interior.

En galaxias de disco con poca o nula interacción con su entorno la alimentación comienza con la aparición de irregularidades en su potencial gravitatorio. Dichas irregularidades dan lugar a la acumulación de un buen número de estrellas en forma de brazos espirales y barras de gran tamaño (varios kiloparsecs), tal como se observa en muchos objetos (véase un ejemplo en la figura 3). La fuerza gravitatoria combinada de esas estrellas induce un flujo de gas desde el disco galáctico hacia el interior de la galaxia. Por el camino algunos cúmulos de gas que siguen trayectorias secantes pueden disipar una fracción de su energía al chocar entre sí, lo cual contribuye secundariamente a su caída hacia el centro. En último extremo el gas se amontona en un anillo de unos $\sim 100 - 500 \text{ pc}$ de

radio, donde, si la densidad y la cinemática son adecuadas, surge un brote de formación estelar. El proceso de alimentación es mucho más eficaz en galaxias que colisionan o se fusionan entre sí, a causa de los violentos procesos disipativos que experimenta el medio interestelar. Son estas colisiones galácticas las que dan lugar a los brotes de formación estelar más luminosos.



Figura 3: Mosaico multicolor de la emisión de la galaxia barrada NGC 1300 compuesto por imágenes obtenidas con el telescopio espacial Hubble (bandas B y V del visible e infrarrojo). La figura está rotada respecto al plano del cielo para minimizar su tamaño. La galaxia cuenta con una barra estelar de gran tamaño (de izquierda a derecha en la figura) en cuyos extremos nacen dos brazos espirales. Cortesía de NASA, ESA y The Hubble Heritage Team.

Hacia el interior del anillo circunnuclear los brazos y las barras estelares pierden su eficacia y el transporte del material del que el núcleo activo se alimenta se detiene a menos que lo retomen otros mecanismos alternativos. En primera instancia, bien por la fuerza de la gravedad de barras secundarias y pequeños brazos espirales internos, bien por la disipación de energía del gas por su propia viscosidad, el gas podría llegar a unos diez parsecs del centro. Por fin, las fuerzas de gravedad del agujero negro podrían atraer parte de esa materia hasta el disco de acrecimiento.

Realimentación

Dos vías principales por las que los brotes de formación estelar y los núcleos activos inyectan grandes cantidades de energía en el medio circundante son la *emisión de radiación* y los flujos de materia denominados *vientos galácticos*.

Radiación. Debido a sus altísimas temperaturas las estrellas masivas liberan una gran cantidad de fotones⁴ del rango del ultravioleta, cuyas energías ($h\nu \gtrsim 1$ eV) les permiten arrancar electrones (ionizar) y romper los enlaces químicos (disociar) de muchos de los átomos y de las moléculas del medio interestelar. Dado que la radiación ultravioleta interacciona muy fácilmente con el gas y el polvo, la transferencia de energía a la materia resulta muy eficiente. En torno a las zonas de formación estelar surgen regiones de gas ionizado en las que los fotones capaces de ionizar el hidrógeno atómico ($h\nu > 13,6$ eV) son absorbidos. Más allá, la radiación del *ultravioleta lejano* (UVL: $6,2 \text{ eV} < h\nu < 13,6 \text{ eV}$, $91 < \lambda < 200$ nm) restante es aún capaz de inducir la disociación de las moléculas de hidrógeno y da lugar a *regiones de fotodisociación*, también llamadas PDR (acrónimo de su nombre en inglés: *Photo-Dissociation Region*). En la figura 4 se muestra una PDR de nuestra galaxia.



Figura 4: Imagen de la nebulosa de la Cabeza de Caballo obtenida con el telescopio espacial Hubble (bandas B, V e I del continuo y línea $H\alpha$). La imagen cubre una región de 0,7 pc de tamaño a lo largo del eje horizontal y está rotada respecto al plano celeste. La nebulosa de la Cabeza de Caballo es una acumulación de gas molecular y de polvo situada a 490 pc dentro de nuestra galaxia. En su parte superior, la radiación de las estrellas cercanas ha procesado la materia interestelar hasta crear una región de fotodisociación (PDR). Cortesía de NASA, NOAO, ESA y The Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

⁴Los fotones son las partículas cuánticas que constituyen la radiación electromagnética (es decir, la luz). La energía de un fotón es $h\nu$, donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la radiación.

A diferencia de las estrellas, las cuales radian principalmente en el visible y el ultravioleta, la radiación de alta energía de los núcleos activos abarca hasta los rayos gamma e incluye una importante componente de rayos X *duros* ($h\nu > 1$ keV). Estos son entre cien y mil veces más energéticos y penetrantes que la radiación ultravioleta, por lo cual pueden extender sus efectos a mayores distancias y afectar a mayores cantidades de materia. La radiación de un núcleo activo escapa con facilidad perpendicularmente al toro molecular que lo circunda y origina así un *cono de gas ionizado* en su camino. Por contra, en dirección al toro la gran cantidad de gas y de polvo que este contiene extingue completamente la radiación del visible al ultravioleta; cuando la cantidad de materia interpuesta es suficiente, incluso los rayos X son absorbidos por completo. No obstante, tanto si el cono de radiación llega a intersectar con el disco galáctico⁵, como si el toro no es completamente opaco, cabe que los rayos X extiendan su radio de acción más allá del entorno circunnuclear inmediato y que creen así lo que se conoce como *Regiones Dominadas por rayos X*, o XDR (acrónimo de su nombre en inglés: *X-ray Dominated Region*).

Vientos galácticos. Los *vientos galácticos* nacen en cavidades de gas caliente y sobrepresurizado que se forman en el medio interestelar cuando hay una rápida inyección de energía que el enfriamiento por radiación no llega a contrarrestar. En galaxias BFE esto ocurre por la concurrencia súbita de vientos estelares o de explosiones supernova. Otro tanto puede suceder en galaxias activas por efecto de la radiación o del chorro de plasma que brotan de los núcleos activos. La cavidad de gas sobrepresurizado da paso a una “superburbuja” expansiva que en ocasiones alcanza los límites verticales del disco galáctico y arrastra hacia el halo parte del gas y del polvo interestelar que ha barrido en su camino. La materia eyectada sólo retorna a la galaxia si su velocidad no es suficiente para superar la atracción gravitatoria del sistema.

El medio molecular

Características generales de las nubes moleculares

En las galaxias el medio molecular acumula típicamente entre el 20% y el 80% de la masa del medio interestelar neutro y constituye la más fría, densa y neutra de sus fases. Son esas condiciones las que posibilitan que algunas condensaciones de gas interestelar lleguen a colapsar por su propia gravedad y den así lugar a las estrellas. El medio molecular ocupa preferentemente los kiloparsecs centrales de las galaxias en forma de acumulaciones denominadas *nubes moleculares*. Estas son objetos muy inhomogéneos de un tamaño de entre 10 pc y 100 pc y una masa de

⁵Nótese que el toro y el disco galáctico no son necesariamente coplanarios.

entre $10^2 M_{\odot}$ y $10^7 M_{\odot}$ típicamente. El $\sim 99\%$ de la masa de una nube molecular lo forma un gas heterogéneo, predominantemente neutro, cuya densidad (n) es de entre 10^2 y 10^6 partículas por centímetro cúbico y cuya temperatura cinética (T_K) está entre los 10 y los 100 K. Los componentes mayoritarios son el hidrógeno molecular (H_2), que suma hasta el 75% de la masa, y el helio atómico (He), que aporta prácticamente el 25%. El gas contiene además proporciones mínimas de especies atómicas y moleculares en las que se combinan el hidrógeno y los elementos minoritarios del medio interestelar (oxígeno, carbono, nitrógeno, azufre, silicio, etc.). La relevancia de estos compuestos para el estudio de las galaxias se verá más adelante.

El 1% restante de la masa del medio molecular lo aporta un conjunto de *granos* sólidos de entre unas décimas de micra y algunos angstroms de diámetro denominado *polvo interestelar*. La composición del polvo está dominada por silicatos y por diversos compuestos de carbono, a lo que hay que añadir un manto helado de agua y de otros compuestos minoritarios que se adhiere a los granos en las regiones moleculares más densas y frías. Por último, los *Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos* (HAP) son largas cadenas de anillo de carbono e hidrógeno que, por sus propiedades, están a caballo entre el gas y el polvo.

Composición química del gas molecular

Hasta la fecha se han detectado más de 150 moléculas (entendiendo como tales cualesquiera compuestos químicos de dos o más átomos) en el medio circunestelar e interestelar. Las particulares condiciones ambientales del espacio permiten la existencia de compuestos que, por su gran inestabilidad o reactividad, son de difícil síntesis en La Tierra.

La referencia de los estudios de la química del medio molecular son las *nubes oscuras*. Estas son nubes moleculares relativamente densas ($n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) y frías ($T_K \simeq 10 - 30 \text{ K}$) que están aisladas de la radiación ultravioleta estelar y en las que sólo penetran los rayos cósmicos⁶. Gracias a su gran energía intrínseca (entre 100 MeV y 10 GeV por partícula, típicamente) los rayos cósmicos logran ionizar una pequeña cantidad de moléculas y átomos, lo cual resulta capital para la química del gas molecular. En particular, las reacciones entre iones y moléculas neutras, al ser relativamente rápidas, determinan en gran medida la composición química del medio. De gran importancia son también las reacciones químicas que ocurren en los mantos de los granos de polvo interestelar, pues modifican indirectamente la composición del gas cuando los productos de las reacciones son liberados. Es precisamente sobre la superficie de los granos donde se forma el hidrógeno molecular que predomina en las nubes.

⁶Partículas (protones, electrones,...) que viajan por el medio interestelar a gran velocidad.

En general la composición química de una nube molecular es muy sensible a las vías por las cuales la energía se inyecta en el medio. Si bien los compuestos químicos minoritarios son escasísimos en cualquier circunstancia, sus abundancias⁷ pueden diferir de los valores medidos en nubes oscuras en varios órdenes de magnitud. Las observaciones de la emisión molecular en otras galaxias, interpretadas a la luz de los modelos teóricos químicos y comparadas con lo que se observa en regiones de La Vía Láctea bien caracterizadas, permiten comprender cuáles son los mecanismos que rigen el estado del medio molecular.

Observaciones del medio molecular en galaxias

Las líneas moleculares como trazadoras del medio interestelar

Una molécula de un compuesto cualquiera de los presentes en el medio interestelar tiene una energía interna que depende de su rotación y de la de los átomos que la componen⁸, de la vibración de dichos átomos en torno a sus posiciones de equilibrio y de la disposición de sus electrones. A esas escalas microscópicas, en las que leyes de la mecánica cuántica son patentes, cada término que contribuye a la energía puede tomar únicamente ciertos valores predeterminados que dependen de la estructura de la molécula. Se denomina niveles de energía a las posibles combinaciones de todos los términos.

El nivel de energía de una molécula aumenta (lo que se conoce como *excitación*) cuando esta absorbe un fotón de una energía determinada (igual a la diferencia de energía entre los dos niveles involucrados) y disminuye cuando lo emite (*desexcitación*). De este intercambio de fotones surgen las líneas espectrales moleculares que se suelen detectar en observaciones desde el rango de onda de radio hasta el infrarrojo. La cantidad de radiación que se recibe por medio de las líneas de cada compuesto depende del número de moléculas de dicho compuesto que se encuentran en cada uno de los niveles de energía a lo largo de la línea de mirada. A su vez, las proporciones en las que las moléculas ocupan los niveles de energía están regidas por la propia emisión y absorción de radiación y por excitaciones y desexcitaciones inducidas por colisiones con otras partículas (mayoritariamente el hidrógeno molecular). La eficacia de las transiciones por colisiones depende de la temperatura cinética del gas, que mide la agitación térmica de las partículas, y de su densidad.

⁷En adelante, se denomina *abundancia de una especie* a la abundancia relativa de esta respecto al hidrógeno molecular, es decir, al cociente entre la cantidad de moléculas de la especie en cuestión y el número de moléculas de hidrógeno molecular.

⁸La rotación se entiende aquí en un sentido general y puede incluir términos de espín además del término de momento angular orbital.

En definitiva, la intensidad de las líneas de una determinada especie depende del número de moléculas dispuestas a lo largo de la línea de mirada y de la densidad y la temperatura a las que estas se encuentran. La intensidad de las líneas depende también de cuál es la especie en cuestión, puesto que la disposición de los niveles y la rapidez con la que la radiación y las colisiones inducen transiciones entre ellos está determinada por la estructura interna de las moléculas. Es por todo ello por lo que las distintas líneas moleculares proporcionan una valiosa información acerca de la composición química y las condiciones físicas del medio interestelar.

Observaciones radioastronómicas

En general, en las condiciones de densidad y temperatura típicas de las nubes moleculares sólo se detectan líneas de emisión que corresponden a transiciones entre los niveles rotacionales más bajos. Estas líneas se hallan en el rango de ondas de radio de longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, lo que corresponde a frecuencias de entre decenas y centenas de gigahertzios.

Fórmula química							
2 átomos:	OH	CO	H ₂	CH	CS	CH ⁺	CN
	SO	SiO	CO ⁺	NO	NS		
3 átomos:	H ₂ O	HCN	HCO ⁺	C ₂ H	HNC	N ₂ H ⁺	OCS
	HCO	H ₂ S	SO ₂	HOC ⁺	C ₂ S		
4 átomos:	H ₂ CO	NH ₃	HNCO	H ₂ CS	HOCO ⁺	C ₃ H	H ₃ O ⁺
5 átomos:	c-C ₃ H ₂	HC ₃ N	CH ₂ NH	NH ₂ CN			
6 átomos:	CH ₃ OH	CH ₃ CN					
7 átomos:	CH ₃ CCH						

Cuadro 1: Lista de las moléculas detectadas fuera de La Vía Láctea a enero de 2008 (Cologne Database for Molecular Spectroscopy; <http://www.astro.uni-koeln.de/site/vorhersagen/>)

Durante las últimas décadas el número de especies moleculares detectadas fuera de La Vía Láctea ha crecido de forma notable hasta alcanzar la cuarentena en la actualidad (el cuadro 1 muestra una lista de las mismas). A su vez ha aumentado el número de objetos en los se ha encontrado esas especies. Este progreso ha sido posible gracias a la puesta en marcha de diversos radiotelescopios que operan en el rango de ondas centimétricas, milimétricas y submilimétricas. En el cuadro 2 se mencionan algunos de los más relevantes de entre los que están en servicio. Dos de los instrumentos que más han contribuido en este campo por su gran sensibilidad

y resolución angular son el telescopio de Pico de Veleta (España) y el radiointerferómetro de Plateau de Bure (Francia), ambos⁹ pertenecientes al *Instituto de Radio Astronomía Milimétrica* (IRAM). El IRAM es una organización científico-técnica europea cuyos miembros actuales son el *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS) francés, el *Max Planck Gesellschaft* (MPG) alemán y el *Instituto Geográfico Nacional* (IGN) español, del cual depende el Observatorio Astronómico Nacional. Mediante observaciones con los instrumentos del IRAM y con otros de los mencionados en el cuadro 2 los astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional han contribuido al estudio del medio molecular en otras galaxias.

Telescopio	Emplazamiento	Antenas	Tamaño m	Frecuencias GHz
APEX	Chile	1	12	211 – 1384
ASTE	Chile	1	10	324 – 372
CARMA	Estados Unidos	16	6-10	85 – 270
CSO	Estados Unidos	1	10	180 – 950
Effelsberg	Alemania	1	100	<96
FCRAO	Estados Unidos	1	14	85 – 116
GBT	Estados Unidos	1	110	<50
HHSMT	Estados Unidos	1	10	210 – 720
IRAM Pico de Veleta (PdV)	España	1	30	72 – 281
IRAM Plateau de Bure (PdB)	Francia	6	15	80 – 267
JCMT	Estados Unidos	1	15	211 – 710
KP12m	Estados Unidos	1	12	68 – 180
NMA	Japón	6	10	85 – 237
Nobeyama	Japón	1	45	20 – 116
SEST	Chile	1	15	78 – 363
SMA	Estados Unidos	8	6	180 – 702
VLA	Estados Unidos	27	25	<50

Cuadro 2: Algunos de los mayores radiotelescopios que operan en longitudes de onda milimétricas o submilimétricas. Se indica el país en el que se encuentran, el número de las antenas de los que constan, el diámetro de las mismas y el rango de frecuencias en el que operan.

Entre los instrumentos empleados en radioastronomía se distinguen dos familias: los telescopios de una única antena y las agrupaciones de varias antenas que operan coordinadamente, denominadas radiointerferómetros. Mientras que el poder de resolución angular de los primeros está limitado por el diámetro de la antena, el de los segundos está determinado por la separación entre antenas, por lo cual pueden distinguir detalles de menor tamaño. No obstante, la mayor diferencia cualitativa entre los dos tipos

⁹En lo que sigue, *telescopio PdV* e *interferómetro PdB*, respectivamente.

de instrumentos es que las técnicas de interferometría permiten obtener radioimágenes de amplias regiones del cielo sin necesidad de apuntar el telescopio en diferentes direcciones.

El medio molecular en las galaxias

A pesar de ser el compuesto más abundante, el hidrógeno molecular es un pésimo trazador de las nubes moleculares. Al estar formado por dos átomos idénticos las transiciones radiativas entre niveles rotacionales resultan tan lentas que difícilmente se pueden detectar en el medio interestelar.

El segundo compuesto más abundante en el medio interestelar es el monóxido de carbono, CO, el cual suele aportar cerca del 0,01% de las moléculas del medio. La estructura de la molécula de CO permite que la línea $J = 1 - 0$ (115 GHz), que corresponde a la transición entre sus dos niveles rotacionales más bajos, sea detectable cuando la densidad del gas es de varios centenares de partículas por centímetro cúbico, cosa que ocurre en prácticamente todas las nubes moleculares. La detección de transiciones entre niveles más altos, cuyas frecuencias son progresivamente mayores, es tanto más sencilla cuanto mayor es la densidad del gas. El monóxido de carbono es el trazador por excelencia del medio molecular, tanto en La Vía Láctea como en otras galaxias de nuestro entorno y del Universo primitivo. Se ha llegado a detectar en un cuásar¹⁰ lejanísimo emisión de CO que se originó cuando el Universo apenas contaba con 870 millones de años de vida.

En condiciones muy generales la masa total de medio molecular (incluyendo la contribución del helio), M_{mol} , se puede calcular con bastante precisión a partir de la luminosidad de la línea de CO ($J = 1 - 0$), $L_{\text{CO}(1-0)}$, mediante la relación¹¹

$$M_{\text{mol}}/L_{\text{CO}(1-0)} \simeq 5 M_{\odot}/(\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2)$$

La masa total de gas molecular que se determina de esta manera es del orden de $10^9 M_{\odot}$ en galaxias estándar como La Vía Láctea. En algunas galaxias HLIR muy distantes la masa molecular que se infiere¹² es del orden de $10^{11} M_{\odot}$.

¹⁰Un cuásar es un tipo de galaxia activa que se caracteriza por su gran luminosidad.

¹¹Se discute si el cociente $M_{\text{mol}}/L_{\text{CO}(1-0)}$ podría ser sensiblemente distinto en galaxias de poca metalicidad, donde el CO es escasísimo, o en los núcleos galácticos y en galaxias de tipo ULIR, donde el grueso del gas molecular tal vez no esté en forma de nubes moleculares como las de nuestra galaxia.

¹²La frecuencia de la radiación que recibimos de las galaxias más distantes es menor de lo que era en origen a consecuencia de la expansión del Universo. En algunos casos esto impide que la emisión de la línea de CO ($J = 1 - 0$) se pueda detectar con la instrumentación actual. Cuando esto ocurre la masa de gas molecular se calcula a partir de observaciones de otras líneas de CO.

El gas molecular y los mecanismos de alimentación y de realimentación

Eficiencia de formación estelar

Un aspecto fundamental de las galaxias BFE es hasta qué punto el proceso de formación de estrellas en su seno difiere del que se da en galaxias estándar. Para responder a esta cuestión se ha invertido un gran esfuerzo en determinar la eficiencia con la que las estrellas nacen en el gas molecular de estos objetos. La *eficiencia de formación estelar del gas molecular*, EFE_{mol} , se define como

$$EFE_{\text{mol}} \equiv \frac{\dot{M}_*}{M_{\text{mol}}}$$

donde \dot{M}_* es la *tasa de formación estelar*, definida como la masa de estrellas que se forma por unidad de tiempo, y M_{mol} es la masa de gas molecular calculada a partir de $L_{\text{CO}(1-0)}$. Existen diversos métodos para determinar \dot{M}_* en una galaxia a partir de la radiación recibida en determinadas frecuencias. Uno de los más fiables para regiones con una alta tasa de formación estelar se basa en la luminosidad de la radiación en el infrarrojo, L_{IR} , la cual se debe a la emisión del polvo calentado por las estrellas. Así, la tasa de formación estelar, \dot{M}_* (medida en masas solares por año), se calcula como

$$\dot{M}_*/L_{\text{IR}} \simeq 2 \times 10^{-10} M_{\odot} \text{ año}^{-1}/L_{\odot}$$

Las observaciones de CO y del infrarrojo han revelado una estrecha relación entre el medio molecular y la formación estelar en galaxias. En particular, la luminosidad de la línea CO(1–0), proporcional, según lo dicho, a *toda* la masa de gas molecular, y la del continuo del *infrarrojo*, proporcional a la tasa de formación estelar, se atienen a la relación

$$L_{\text{CO}(1-0)} \propto L_{\text{IR}}^{0,6}$$

De acuerdo con esta expresión, EFE_{mol} es proporcional a $L_{\text{IR}}^{0,4}$, por lo que resulta mayor cuanto mayor es la tasa de formación estelar. Podría concluirse de esta correlación que los mecanismos de la formación estelar operan de forma especial en las galaxias con mayor tasa de formación estelar, de modo que logran convertir en estrellas una fracción mayor del gas disponible. Sin embargo las observaciones de otros trazadores moleculares distintos de CO ha ofrecido un perspectiva diferente.

Eficiencia de formación estelar del gas molecular denso

Precisamente porque traza fielmente *toda* la masa molecular, independientemente de las condiciones en las que esta se encuentra, la emisión de CO(1-0) por sí sola no permite discernir las condiciones físicas del medio molecular. Por ello es difícil cuantificar a partir de la emisión de CO la fracción de gas molecular suficientemente denso como para poder colapsar y formar estrellas.

Diversos grupos de investigación han intentado determinar con fiabilidad la cantidad de gas molecular denso que alimentan los brotes de formación estelar en galaxias. Para ello se observa la emisión de especies que, por su estructura molecular, radian preferentemente desde regiones con condiciones físicas específicas. Los compuestos trazadores de gas denso que se observan con más frecuencia, tanto en La Vía Láctea como fuera de ella, son el HCN y el HCO⁺. Las abundancias de HCN y HCO⁺ son típicamente de 10⁻⁸ - 10⁻⁷, por lo que se encuentran entre las especies más profusas y de emisión más intensa después del CO. A diferencia de lo que ocurre con CO, la emisión de la transición $J = 1 - 0$ de estas dos especies (89 GHz en ambos casos) sólo es detectable cuando la densidad del gas es $\gtrsim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ (lo que consideraremos *gas denso* de aquí en adelante). La emisión de HCN y de HCO⁺, así como de otras trazadores del gas denso, se ha estudiado en galaxias cercanas y en objetos del Universo más distante. En particular, las líneas de HCN y de HCO⁺ se han detectado en un quásar cuya emisión se originó cuando la edad del Universo era de 1 600 millones de años.

En condiciones muy generales es posible calcular con bastante precisión la cantidad de gas molecular *denso*, M_{den} , a partir de la luminosidad de la línea HCN($J = 1 - 0$) (otro tanto puede hacerse a partir de la luminosidad de la línea HCO⁺($J = 1 - 0$)), $L_{\text{HCN}(1-0)}$, mediante la relación

$$M_{\text{den}}/L_{\text{HCN}(1-0)} \simeq 10 M_{\odot}/(\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2)$$

Los cocientes $L_{\text{HCN}(1-0)}/L_{\text{CO}(1-0)}$ en galaxias del Universo cercano difieren hasta en un factor 25, lo cual sugiere importantes diferencias en la fracción de gas molecular denso que albergan ($M_{\text{den}}/M_{\text{mol}}$). Por otra parte, al comparar las observaciones de HCN y las de infrarrojo se ha observado que $L_{\text{HCN}(1-0)}$ y L_{IR} se atienen a una estrecha relación *lineal* que abarca desde las galaxias extremadamente luminosas de tipo LIR y ULIR hasta las pequeñas condensaciones moleculares de la Vía Láctea. De dicha relación se deduce que, a diferencia de lo que ocurre con EFE_{mol} , la eficiencia de la formación estelar respecto al gas denso trazado por HCN(1-0), EFE_{den} , es independiente de la tasa de formación estelar. En concreto, se encuentra que

$$EFE_{\text{den}} \equiv \frac{\dot{M}_{\star}}{M_{\text{den}}} \simeq 2 \times 10^{-8} \text{ año}^{-1}$$

A la luz de estos resultados, que, en general, \dot{M}_*/M_{mol} sea mayor cuanto más luminosas son las galaxias se puede atribuir a un aumento de la proporción de gas molecular denso. La correlación HCN–IR sugiere además que la formación de estrellas está regulada por la cantidad de materia prima disponible y que, por tanto, procede de forma independiente de las características de la galaxia en la que tiene lugar.

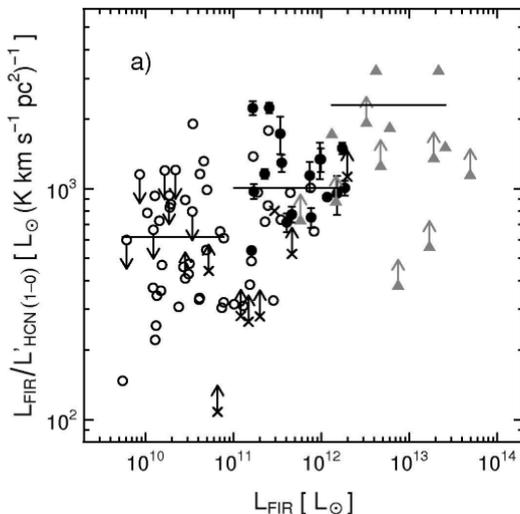


Figura 5: Cociente $L_{\text{IR}}/L_{\text{HCN}(1-0)}$ en función de L_{IR} en una muestra de galaxias LIR, ULIR y HLIR. Las flechas indican que el valor real del cociente es menor que el representado, si apuntan hacia abajo, o mayor, si apuntan hacia arriba. Se aprecia cómo el cociente tiende a ser significativamente mayor en las galaxias de mayor luminosidad infrarroja. Cortesía de J. Graciá-Carpio (adaptado de Graciá-Carpio et al. 2008, *Astronomy & Astrophysics*, 479, 703).

A pesar de que su sencillez la hace muy atractiva, la interpretación habitual de la correlación HCN–IR no está libre de incertidumbres. Una de ellas es hasta qué punto la línea HCN(1 – 0) (en general cualquier otra línea) traza *sin sesgos* la masa de gas molecular denso en condiciones tan anómalas como las que se dan en regiones de intensa formación estelar. Recientemente distintos estudios han concluido que, de hecho, tales sesgos existen. Por un lado, las observaciones de galaxias HLIR, aun escasas por encontrarse estas a grandes distancias, sugieren que el valor del cociente $L_{\text{IR}}/L_{\text{HCN}(1-0)}$ en estos objetos es sistemáticamente mayor de lo que la correlación HCN–IR predice (véase la figura 5). Ello sugiere que, bien la eficiencia de formación estelar real (EFE_{den}) no es proporcional al

cociente $L_{\text{IR}}/L_{\text{HCN}(1-0)}$ (este sería el caso, por ejemplo, si $L_{\text{HCN}(1-0)}$ no trazara correctamente la masa de gas denso en estas galaxias), bien las estrellas se forman más eficientemente de lo esperado. Por otra parte, al observar simultáneamente la línea $J = 1 - 0$ de HCN y HCO^+ en una amplia muestra de galaxias LIR y ULIR los astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional han advertido que, inesperadamente, el cociente $L_{\text{HCN}(1-0)}/L_{\text{HCO}^+(1-0)}$ aumenta con la luminosidad L_{IR} . Dado que se espera que la emisión de HCN y de HCO^+ provenga de regiones con condiciones físicas similares, tal relación sugiere que la luminosidad de las líneas moleculares pudiera no reflejar fielmente la cantidad de gas denso en las galaxias más luminosas.

Las observaciones complementarias de algunas transiciones más altas ($\text{HCN}(J = 3 - 2)$, $\text{HCO}^+(J = 3 - 2)$) han aportado indicios de que, por diferencias en la composición química y en las condiciones físicas del gas, el cociente $M_{\text{den}}/L_{\text{HCN}(1-0)}$ real en galaxias ULIR es menor que el valor canónico aceptado. En tal caso la masa de gas denso de dichas galaxias sería menor de lo esperado, lo cual confirmaría que la eficiencia de formación de estrellas con respecto al gas denso aumenta en las galaxias más luminosas. Si esto es consecuencia de los efectos de la realimentación que la formación estelar ejerce en el medio, no se ha podido determinar hasta el momento. Estos recientes resultados han generado un intenso debate entre los expertos.

Diagnósticos moleculares de la formación estelar y de la actividad nuclear

Diversos estudios de la emisión molecular en galaxias han buscado el modo de diagnosticar la presencia de brotes formación estelar masiva y de núcleos activos. Subyace la idea de que la energía que las estrellas y los núcleos activos inyectan en el medio circundante podría modificar de forma apreciable la composición y las condiciones físicas del medio molecular. A diferencia de los diagnósticos más tradicionales, basados en observaciones a frecuencias altas (del infrarrojo a los rayos X), unos criterios basados en líneas moleculares no estarían limitados por la extinción de la radiación que causa el polvo interestelar, pues esta es insignificante en longitudes de onda (sub)milimétricas. De ahí que las observaciones moleculares pudieran ayudar a clarificar la naturaleza de las galaxias luminosas y ricas en gas y polvo que dominaron la formación estelar en el pasado.

Hasta la fecha varios estudios independientes han comparado la luminosidad de algunas líneas moleculares (principalmente de CO, HCN y HCO^+ , por ser las más intensas) en muestras de galaxias BFE o activas. En general se concluye que los cocientes $L_{\text{HCN}(1-0)}/L_{\text{CO}(1-0)}$ y $L_{\text{HCN}(1-0)}/L_{\text{HCO}^+(1-0)}$ son mayores en torno a los núcleos activos que en regiones con brotes de formación estelar. Las observaciones complemen-

tarias de transiciones más altas ($J = 2 - 1$, $J = 3 - 2$) sugieren además que tras esas diferencias subyacen unas condiciones físicas del gas y unas abundancias químicas distintas.

Estudios de la química del gas molecular en galaxias BFE y activas

Por qué estudiar la química del gas molecular

Las observaciones de líneas moleculares constituyen una vía muy prometedora para tasar los mecanismos de alimentación y realimentación en las galaxias BFE y activas. Sin embargo, tal como se ha visto previamente, tanto para precisar la cantidad de materia que abastece las regiones de formación estelar como para comprender los efectos de las estrellas y los núcleos activos sobre el medio es necesario determinar las abundancias químicas de las especies observadas.

Durante los últimos años, las observaciones de líneas moleculares milimétricas han demostrado que existen ciertas diferencias en la composición del medio molecular de las galaxias. No obstante, aún escasean las observaciones de moléculas cuya química sean tan particular como para revelar sin ambigüedades las causas de la composición del gas molecular en las galaxias BFE y activas. En particular, se requieren observaciones de compuestos cuyas abundancias cambien de forma sustancial en función del mecanismo que gobierne la composición del medio (choques, radiación UV, rayos X,...), lo cual no es el caso de las especies más observadas (CO, HCN, HCO⁺).

A continuación, se describen algunos trabajos cuyo propósito ha sido evaluar los efectos en la química del medio molecular de los mecanismos de alimentación y de realimentación en las galaxias BFE y activas mediante observaciones de trazadores químicos específicos. Los estudios que se detallan, muchos de ellos dirigidos por astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional, se han ocupado de determinadas galaxias BFE y activas cercanas, a fin de aprovechar la resolución angular y la sensibilidad con las que cuentan los radiotelescopios actuales.

Choques en galaxias BFE

Química dominada por choques

El medio interestelar es objeto de frecuentes perturbaciones en las que se originan *frentes de choque* que se propagan supersónicamente. Al paso de estos frentes de choque el medio interestelar es comprimido y calentado a la vez que su velocidad varía súbitamente. Estos cambios intensifican aquellas reacciones químicas que necesitan de un aporte previo de energía.

Por otra parte, a consecuencia de las colisiones de los granos con otras partículas del medio parte del material del polvo puede revertir en el gas y acrecentar durante un tiempo las abundancias de determinadas especies.

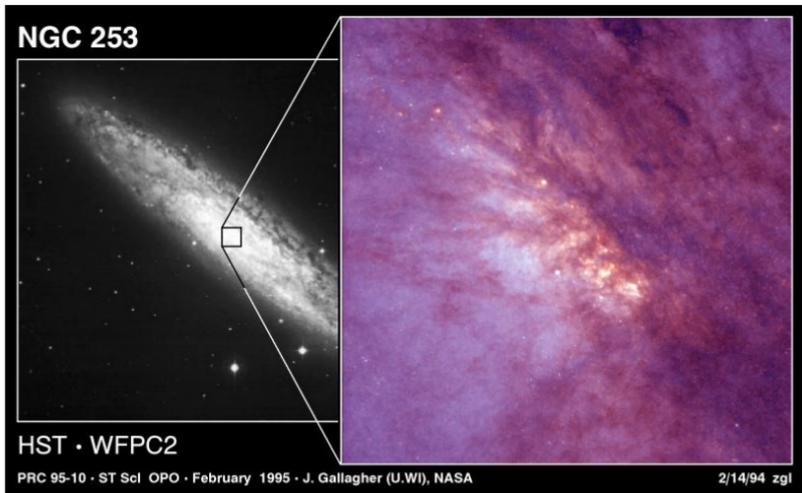


Figura 6: A la izquierda, una imagen de la emisión en el visible de la galaxia BFE NGC 253 obtenida con un telescopio terrestre; a la derecha, una imagen de los 300 pc centrales de NGC 253 obtenida por el telescopio espacial Hubble. Las observaciones de gran resolución del Hubble dan idea de cuán intensa es la formación estelar en el centro de esta galaxia. Cortesía de Jay Gallagher (University of Wisconsin-Madison), Alan Watson (Lowell Observatory, Flagstaff, AZ) y NASA (izquierda) y del Carnegie Institution of Washington (derecha).

Uno de los trazadores más versátiles y fiables de la química dominada por choques es el monóxido de silicio (SiO), cuya abundancia en fase gaseosa crece sobremanera cuando los granos (principalmente sus núcleos) son erosionados y parte del silicio es liberado. Durante el choque también pueden crecer las abundancias en fase gaseosa de ciertos compuesto sulfúreos (SO , H_2S) u orgánicos (CH_3OH , HNC) por la destrucción parcial de los mantos de hielo de los granos. La erosión de los mantos requiere un menor aporte energético que la de los núcleos de los granos. Por ello, a diferencia de lo que ocurre con el material silíceo de los granos, los compuestos depositados en los mantos pueden ser liberados en cantidades significativas por mecanismos distintos de los choques que son relativamente habituales (sublimación, irradiación con fotones

ultravioleta). De ahí que la interpretación de la emisión del monóxido de silicio esté sujeta a menos incertidumbres¹³ que la de los otros trazadores.

Observaciones y resultados

A medida que un brote de formación estelar masiva evoluciona el medio interestelar está expuesto a diferentes perturbaciones mecánicas que pueden generar choques a lo largo de centenares de parsecs: en las fases preliminares, las barras y brazos espirales estelares que conducen el gas de la galaxia hacia el núcleo pueden inducir colisiones entre las nubes moleculares; con la evolución y la muerte de las estrellas masivas, se desencadenan superburbujas y vientos galácticos que barren la galaxia a su paso y llegan a expandirse por el halo.

Mediante observaciones con el radiointerferómetro PdB los astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional han obtenido las primeras imágenes de la emisión de la línea SiO($J = 2 - 1$) en tres galaxias cercanas que albergan brotes de formación estelar de cierta intensidad: NGC 253, M 82 e IC 342. La resolución espacial de las observaciones (~ 80 pc) es similar al tamaño de las nubes moleculares gigantes. Las abundancias de SiO que se infieren en las tres galaxias a lo largo de centenares de parsecs son entre diez y mil veces mayores que las que se miden en las nubes oscuras de nuestra galaxia; ello demuestra que la química del gas molecular está condicionada por los efectos de los choques a gran escala. Los mecanismos que inducen estos choques pueden ser, sin embargo, muy dispares.

NGC 253 (figura 6) es una de las galaxias con formación estelar masiva prototípicas del Universo más próximo. Esta galaxia barrada contiene en los 300 pc centrales una región de formación estelar intensísima que probablemente se alimenta de un gran depósito de gas molecular con el que coexiste. Se cree que la concentración de gas molecular fue inducida por las fuerzas gravitatorias de la barra estelar. Las observaciones de SiO muestran que los choques ocurren en dos pseudo-anillos alineados con la barra estelar en los que aumenta la probabilidad de que las nubes moleculares, dirigidas por la gravedad de las estrellas de la barra, colisionen entre sí (véase la figura 7). Se concluye por ello que en esta galaxia la química dominada por choques acompaña al proceso de alimentación de la formación estelar.

Cabe notar que otros estudios han llegado a idénticas conclusiones a partir de observaciones con telescopios de antena única, en las cuales la mayor facilidad para observar un gran número de líneas simultáneamente suple en parte la menor resolución espacial. En particular, se ha sabido por estos estudios que abundan en el gas de NGC 253 las moléculas relacionadas con procesos químicos sobre los mantos de los granos (NH_3 , CH_3OH , CH_3CN , HNCO , SO , H_2S), lo cual da a entender que dichos mantos han sido erosionados de alguna manera.

¹³Excepto en el entorno de los núcleos activos, como se verá más adelante.

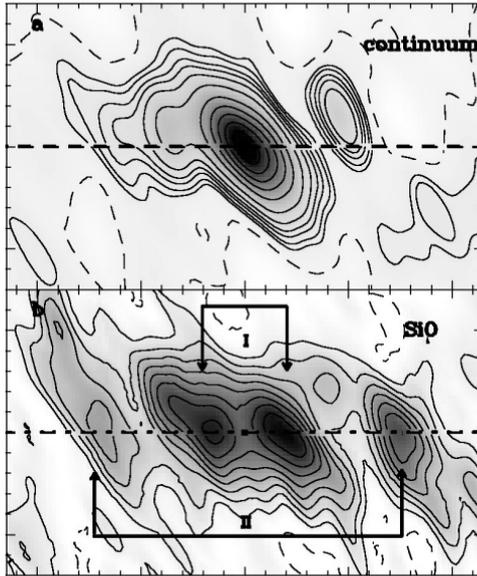


Figura 7: De arriba a abajo, mapas de la emisión del radiocontinuo a 87 GHz (caja *a*, en contornos) y de de la línea SiO($J = 2 - 1$) (caja *b*, en contornos) en la galaxia NGC 253, ambos obtenidos con el interferómetro PdB. Los ejes horizontal y vertical corresponden a los ejes mayor y menor de la barra estelar de la galaxia. Las dimensiones de cada caja son (46 segundos de arco) \times (28 segundos de arco). De acuerdo con la emisión de SiO, los choques moleculares son particularmente intensos en dos pseudo-anillos (I y II). El grueso de la formación estelar, trazada por el radiocontinuo, está confinado en la región I. Cortesía de S. García-Burillo (adaptado de García-Burillo et al. 2000, *Astronomy & Astrophysics*, 355, 499).

IC 342 es una galaxia espiral barrada que alberga un brote de formación estelar de baja intensidad en un anillo de ~ 160 pc de diámetro. En IC 342 el gas molecular se acumula en dos brazos espirales que en su extremo interior se enroscan en torno al anillo de formación estelar. SiO es particularmente abundante en los brazos espirales, en los cuales crece la probabilidad de colisiones entre nubes moleculares inducidas por las fuerzas gravitatorias de la barra estelar (véase la figura 8). Al igual que NGC 253, IC 342 es un ejemplo de la relación entre la alimentación de la formación estelar y la química de choques a gran escala. Cabe notar que otras observaciones paralelas de la emisión de varias especies moleculares sugieren que en el anillo de formación estelar la composición del gas molecular no está tanto regulada por los choques (menos efectivos que

en el brazo espiral, según se infiere de la emisión de SiO) como por la radiación ultravioleta de las estrellas masivas. De este tipo de química se habla más adelante, a propósito del caso paradigmático de la galaxia M 82.

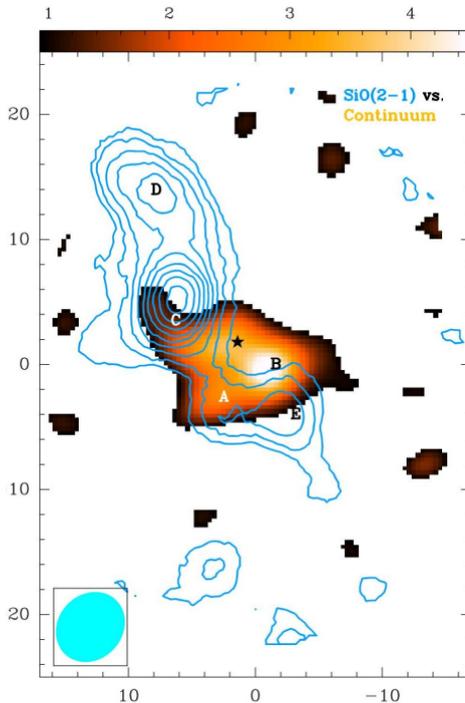


Figura 8: Mapas de la emisión de la línea SiO($J = 2 - 1$) (contornos azules) y del radiocontinuo a 87 GHz (color) en la galaxia IC 342, ambos obtenidos con el interferómetro PdB por el autor. Los ejes horizontal y vertical corresponden a los de Ascensión Recta y Declinación respectivamente y su escala está en segundos de arco. El grosor de la formación estelar, trazada por el radiocontinuo, está confinada en la región circunuclear (adaptado de Usero et al. 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 448, 457).

M 82 es, junto a NGC 253, uno de los prototipos de las galaxias cercanas que albergan un brote de formación estelar masiva. En comparación con NGC 253, M 82 representa una fase más avanzada de un episodio de formación estelar. En el kiloparsec central del disco de esta galaxia irregular la alta tasa de explosiones supernova, los intensos campos UV y la producción de rayos cósmicos han alterado notablemente el medio

interestelar. La concurrencia de numerosas explosiones supernova ha originado un flujo “bicónico” de gas caliente que se expande más allá del disco (véase la figura 1). Este flujo arrastra con él grandes cantidades de gas frío y de polvo. A diferencia de lo que ocurre en NGC 253 e IC 342, en M 82 la mayor parte de la emisión de SiO no se encuentra en el disco galáctico sino en la interfaz entre este y el halo (véase la figura 9). Las dos principales estructuras que se observan son una superburbuja que se expande en torno a un cúmulo de estrella masivas y una chimenea que nace en el disco galáctico y penetra en el bulbo que rodea a este. Estas dos estructuras probablemente corresponden a dos etapas distintas del proceso por el que las explosiones supernova eyectan materia del disco galáctico al halo.

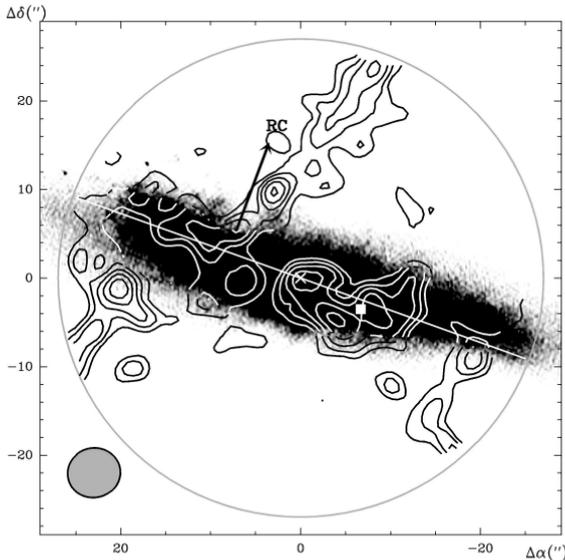


Figura 9: Mapas de la emisión en la galaxia M 82 de la línea SiO($J = 2 - 1$) (contornos), obtenido con el interferómetro PdB, y del radiocontinuo a 4,8 GHz (escala de grises saturada). Los ejes horizontal y vertical de la figura corresponden a los de Ascensión Recta y Declinación respectivamente y su escala está en segundos de arco. En la figura se observa que los choques moleculares, trazados por la emisión de SiO, se encuentran a lo largo de una chimenea perpendicular al disco galáctico y en una superburbuja que comienza a romper los límites del mismo. Cortesía de S. García-Burillo (adaptado de García-Burillo et al. 2001, *Astrophysical Journal*, 563, L27).

Radiación ultravioleta en galaxias BFE

Química dominada por rayos UV

Se conocen como *regiones de fotodisociación*, o PDR, aquellas zonas del medio interestelar cuyos balances térmico, iónico y químico están gobernados por la radiación del *ultravioleta lejano*. A lo largo de una PDR la energía de los fotones se deposita en la materia, con lo que el medio se calienta a la par que se excitan, disocian o ionizan determinadas especies. El flujo de la radiación UV se debilita principalmente por la absorción y dispersión en los granos de polvo y HAP. Los fotones UV son absorbidos también por las moléculas de hidrógeno, que resultan disociadas. El hidrógeno queda en estado atómico hasta un punto más allá del cual la cantidad de gas interpuesto protege las moléculas de hidrógeno de la disociación.

La inyección de energía en forma de radiación UV favorece las reacciones de fotodisociación. Resultan también más frecuentes las reacciones con electrones e iones a causa del mayor grado de ionización, mientras que el calentamiento y excitación de las moléculas permite que se lleven a cabo ciertas reacciones que necesitan de un aporte inicial de energía. Los fotones UV pueden procesar los mantos de hielo de los granos y favorecer así la liberación de materia de estos al gas.

Observaciones y resultados

Los astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional han combinado observaciones con diversos radiotelescopios y radiointerferómetros (en particular los del IRAM) para caracterizar con gran detalle la composición del gas molecular en M 82. De sus estudios se concluye que, a lo largo de casi un kiloparsec, el disco de M 82 semeja una *PDR gigante* producto de la intensa radiación de las estrellas masivas en el ultravioleta. Los indicios son varios:

Alto grado de ionización. El trazador de gas denso HCO^+ cuenta con un isómero¹⁴, HOC^+ , muy reactivo e inusual. En nubes oscuras HCO^+ es unas mil veces más abundante que su isómero, pues las moléculas de HOC^+ se transforman rápidamente en HCO^+ al reaccionar con el hidrógeno molecular. En regiones moleculares con grados de ionización altos, sin embargo, esta reacción pierde importancia ya que las moléculas de ambas especies se destruyen principalmente al recombinarse con electrones. Al mismo tiempo, en estas regiones ambas especies se producen mayoritariamente mediante reacciones que generan HOC^+ en tanta o mayor proporción que HCO^+ . Como resultado de esto, aumenta la abundancia de HOC^+ , de modo que, por ejemplo, el cociente de abundancias $\text{HCO}^+/\text{HOC}^+$ llega a ser de apenas unas decenas en algunas PDR de nuestra galaxia. Uno de los resultados más destacables de las observaciones de M 82 es que el

¹⁴Especie compuesta por los mismos átomos pero con una estructura distinta.

cociente $\text{HCO}^+/\text{HOC}^+$ de abundancias en el disco galáctico (40, en promedio) es similar al que se mide en PDR aun cuando aquel es centenares de veces mayor que estas. Mediante el interferómetro PdB se ha obtenido un mapa de la distribución de HOC^+ en M 82 (el primero tanto dentro como fuera de nuestra galaxia; véase la figura 10) que ayuda a comprender de qué manera la propagación del brote de formación estelar ha alterado el estado del medio molecular.

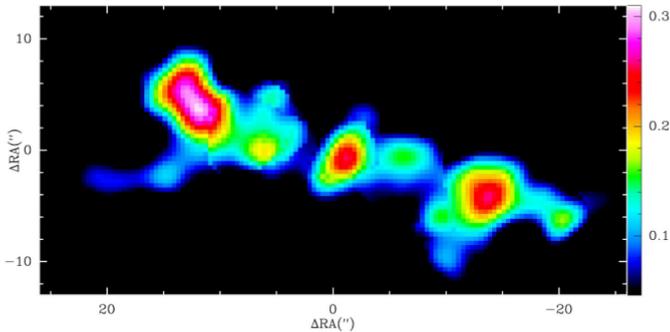


Figura 10: Mapa de la emisión de la línea $\text{HOC}^+(J = 1 - 0)$ (color) en M 82 obtenido con el interferómetro PdB. Los ejes horizontal y vertical de la figura corresponden a los de Ascensión Recta y Declinación respectivamente y su escala está en segundos de arco. A diferencia de la emisión de SiO (véase la figura 9), el grueso de la emisión de HOC^+ , la cual se origina en las PDR inducidas por la radiación ultravioleta, está distribuida a lo largo del disco de la galaxia. Cortesía de A. Fuente.

Alto grado de disociación. El trazador de gas denso HCN libera un átomo de hidrógeno (H) con relativa facilidad al ser irradiado con fotones ultravioleta. Este y otros procesos inducidos por la radiación favorecen que el radical CN sea relativamente abundante en las PDR. Así, el cociente de abundancias CN/HCN crece al aumentar la intensidad de los rayos UV. En el disco de M 82 el cociente de abundancias CN/HCN es ~ 5 en promedio. Valores tan grandes sólo se encuentran en capas de las PDR muy expuestas a la radiación. Al igual que las grandes abundancias de HOC^+ , el cociente CN/HCN medido en M 82 da una idea de hasta qué punto los efectos del brote de formación estelar han modificado las características del medio molecular.

Destrucción de los mantos de los granos. El radical HCO es una especie relativamente infrecuente en el medio interestelar cuya abundancia en PDR llega a ser entre cien y mil veces mayor que en nubes oscuras. Esto se ha atribuido a la liberación y fotodisociación de material orgánico de los

mantos de los granos por los fotones del ultravioleta. Dentro de cada PDR la abundancia de HCO es máxima en las capas intermedias, donde el balance entre su destrucción por fotodisociación y su producción por fotoerosión de los mantos es el más favorable. En las imágenes de alta resolución espacial obtenidas con el interferómetro PdB la emisión de HCO en M 82 se extiende por el kiloparsec central de la galaxia. La abundancia media de HCO estimada en toda esa región es similar a la medida en PDR galácticas.

Fotodisociación de HAP. La facilidad con la que algunos hidrocarburos pequeños son fotodisociados no impide que las abundancias de estos en PDR puedan ser similares a las que se miden en nubes oscuras. Esto sugiere que la radiación abre también una vía adicional para su formación que probablemente sea la fotodisociación de cadenas carbónicas más largas (en particular HAP). En M 82 las abundancias de especies como $c\text{-C}_3\text{H}_2$ y $\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$ son altas en todo el disco central, como cabe esperar si, en efecto, los fotones UV intensifican la destrucción de parte de los HAP.

Rayos X en galaxias activas

Química dominada por rayos X

Se denomina *regiones dominadas por rayos X*, o XDR, a aquellas zonas del medio interestelar en las que la estructura química y el balance térmico están gobernados por rayos X. Su gran energía intrínseca (típicamente en el rango $1 \text{ keV} < h\nu < 100 \text{ keV}$) permite a los rayos X arrancar de la materia una primera generación de electrones muy energéticos que calientan, excitan, ionizan y disocian el gas al interactuar con otras partículas.

La química molecular en las XDR se caracteriza por un incremento de las tasas de ionización, de disociación y de reacciones con electrones. El calentamiento del gas y la excitación de algunas moléculas favorecen a su vez las reacciones que requieren un aporte inicial de energía. Los rayos X pueden además sublimar con gran eficacia los granos silíceos de pequeño tamaño y disociar los HAP más largos. Muchos de los efectos de los rayos X sobre la química del medio molecular se asemejan a los que inducen los rayos ultravioleta en PDR. No obstante, de aspectos fundamentales, como que los rayos X son más destructivos que los rayos UV o que la inyección de energía en las XDR está dominada por los electrones de primera generación y no por los fotones directamente, resultan notables diferencias químicas entre las XDR y las PDR.

Observaciones y resultados

Los núcleos activos son capaces de inyectar ingentes cantidades de energía en las galaxias que los albergan mediante intensos campos de radiación de alta frecuencia. Las regiones dominadas por rayos X (XDR) podrían predominar en las grandes concentraciones de gas molecular que se encuentran en torno a los núcleos activos en forma de *discos circunnucleares* (en

adelante, DcN). Hasta la fecha la mayoría de los esfuerzos por encontrar tales regiones XDR fuera de La Vía Láctea se han centrado en la galaxia NGC 1068.

NGC 1068 es una de las galaxias activas mejor estudiadas y un ejemplo paradigmático del funcionamiento de los núcleos activos. NGC 1068 es además una galaxia óptima para cuantificar los efectos de los núcleos activos sobre el medio circundante, pues cuenta con un DcN de gas molecular de ~ 200 pc de radio en el que no hay indicios de formación estelar reciente (el grueso de la formación estelar tiene lugar en un anillo alejado del centro que coincide con el anillo de gas ionizado de la figura 2). Las primeras observaciones de la emisión de líneas moleculares en el DcN de NGC 1068 indicaron que el cociente de abundancias HCN/CO era inusualmente alto. Para explicar esta anomalía se propusieron dos hipótesis que asociaban la peculiar química del DcN con los efectos del núcleo activo. La primera, una escasez inusual de oxígeno en la fase gaseosa y el consiguiente decremento de la abundancia de CO y del resto de especies oxigenadas. La segunda, el aumento relativo de la abundancia de HCN a consecuencia de la iluminación de las nubes moleculares por los rayos X del núcleo activo.

Para poder decidir cuál de los dos escenarios era el más verosímil los astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional emprendieron un programa de observaciones del DcN de NGC 1068 con el telescopio PdV. Estas, en combinación con datos obtenidos con el interferómetro PdB, proporcionaron la primera caracterización detallada de la química del gas molecular en torno a un núcleo activo. En suma, se determinaron las abundancias de siete especies moleculares en el DcN : SiO, HCO^+ , HO^+ , CN, CO, HCN y CS. Las altas abundancias de algunos de los compuestos oxigenados detectados demuestran que el oxígeno no puede ser tan escaso en el DcN como se había predicho. Por contra, los resultados encajan razonablemente con lo predicho por los modelos de química dominada por rayos X. De particular relevancia es la detección de las moléculas oxigenadas HO^+ y SiO. El cociente de abundancias HCO^+/HO^+ en el DcN es uno de los menores medidos en el medio interestelar y sólo es igualado por el encontrado en M 82 y algunas PDR de La Vía Láctea. Un cociente semejante es señal de un alto grado de ionización que en este caso se ha de deber a la radiación del núcleo activo. Por otra parte, la gran abundancia de SiO es señal de destrucción de granos de polvo en la región. Aun cuando la existencia de choques a gran escala no se puede descartar, cabe que los rayos X, al sublimar con gran eficiencia los granos silíceos menores ($\lesssim 10 \text{ \AA}$), hayan incrementado la cantidad de material silíceo en la fase gaseosa. En definitiva, la caracterización de la química molecular en NGC 1068 aporta los primeros indicios firmes de la formación de XDR circunucleares “gigantes” por efecto de la radiación del núcleo activo.

Con el propósito de mejorar la caracterización de la química inducida

por un núcleo activo en su entorno, se ha observado con el interferómetro PdB la emisión de un conjunto de líneas moleculares en el DcN de NGC 1068. Algunas de las imágenes obtenidas se representan en la figura 11. El mapa de HCN muestra cómo el gas molecular denso se distribuye en torno al núcleo activo de la galaxia. Por otra parte, de que los cocientes de líneas dentro del DcN no sean uniformes se deduce que la emisión de las distintas especies no está distribuida de igual modo, lo cual podría ser consecuencia de una composición química inhomogénea. El análisis de la relación entre los cocientes de líneas y la iluminación de los rayos X ayudará a delimitar hasta qué punto regulan estos la composición química en el DcN.

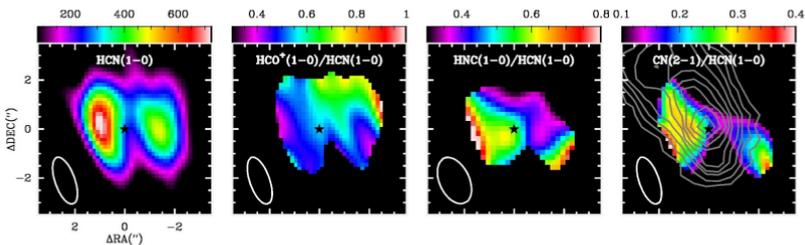


Figura 11: Mapas de la emisión de diversas líneas moleculares en el DcN de NGC 1068 obtenidos por el autor con el interferómetro PdB. En la caja de la izquierda se representa la intensidad total de la línea HCN($J = 1 - 0$) y en las restantes, de izquierda a derecha, el cociente entre la intensidad total de las líneas HCO⁺($J = 1 - 0$), HNC($J = 1 - 0$) y CN($N = 2 - 1$) y la intensidad total de HCN($J = 1 - 0$). Los contornos grises en la caja de la derecha indican la emisión de rayos X (imagen obtenida con el telescopio espacial Chandra de la NASA por A. S. Wilson). Una estrella señala la posición de núcleo activo. Los ejes horizontal y vertical de la figura corresponden a los de Ascensión Recta y Declinación, respectivamente, y su escala está en segundos de arco.

Balance del estudio de la química del gas molecular

El análisis de las observaciones indica que la composición química del medio molecular de estas galaxias BFE y activas es notablemente dispar a lo largo de centenares de parsecs. En ninguna de las fuentes se asemeja la composición química a la de las nubes moleculares estándar (nubes oscuras) de nuestra galaxia. De acuerdo con las abundancias moleculares estimadas las peculiaridades químicas se atribuyen al procesamiento del gas molecular por choques a gran escala, en el caso de IC 342 y de NGC 253, por intensos campos ultravioleta, en el de M 82 (también en

del del pequeño anillo circunnuclear de IC 342), y por rayos X, en el de la galaxia activa NGC 1068.

Las observaciones de IC 342, NGC 253 y M 82 aportan indicios convincentes de que, en una galaxia BFE, la composición química del medio molecular y el brote de formación estelar evolucionan a la par. Durante la fase de alimentación de las regiones de formación estelar prevalecen en el disco los choques asociados a los flujos que inducen las barras estelares. Al inicio del brote, la radiación de las estrellas masivas sucede a las barras como agente regulador de la química del medio molecular. Con el envejecimiento progresivo de la población estelar del brote surge una diferencia entre la composición química del disco galáctico, dominada por la radiación estelar, y la del halo, más afectada por los choques asociados a los vientos que inducen las explosiones supernova. La gran resolución angular de las observaciones radiointerferométricas es capital para apreciar la distribución espacial de la emisión molecular e identificar correctamente el estado evolutivo de los brotes de formación estelar.

A la vista de estos resultados se concluye que los principales mecanismos de alimentación y de realimentación que actúan en las galaxias BFE y activas dejan una impronta específica en la constitución del medio molecular a lo largo de centenares de parsecs. Como se muestra en los casos aquí analizados, mediante observaciones combinadas de la emisión de ciertas especies moleculares se puede reconocer dicha impronta.

Conclusión

La caracterización de la química del medio molecular se revela como un prometedor método para el examen y la diagnosis de la formación estelar masiva y de la actividad nuclear en galaxias. En particular, parece posible discernir y valorar los efectos de los brotes de formación estelar y de los núcleos activos mediante observaciones de líneas moleculares. Estudios como los que se han descrito pueden contribuir a la elaboración de diagnósticos certeros de la presencia de núcleos activos en galaxias. Dado que en longitudes de onda milimétricas la radiación no está afectada por la extinción del polvo, tales diagnósticos prometen ser utilísimos para averiguar qué ocultan las grandes concentraciones de materia propias de las galaxias que dominan la formación estelar en el pasado. Tras la inminente puesta en marcha de los nuevos telescopios internacionales que han de operar en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, como el interferómetro Gran Conjunto de Telescopios de Atacama, ALMA¹⁵, o el telescopio espacial Herschel, en cuya construcción participa el OAN, el estudio de la química molecular puede devenir en una técnica usual y versátil de la astronomía extragaláctica.

¹⁵ Acrónimo del nombre en inglés: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array.

Referencias

A. Fuente, S. García-Burillo, M. Gerin, D. Teyssier, A. Usero et al, *Photon-dominated Chemistry in the Nucleus of M 82: Widespread HOC⁺ Emission in the Inner 650 Parsec Disk*. *Astrophysical Journal* 2005, 619, L155.

<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0412361>

S. García-Burillo, J. Graciá-Carpio, M. Guelin, R. Neri, P. Cox et al, *A New Probe of Dense Gas at High Redshift: Detection of HCO⁺ (5-4) Line Emission in APM 08279+5255*. *Astrophysical Journal*, 2006, 645, L17.

<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0605656>

J. Graciá-Carpio, S. García-Burillo, P. Planesas, A. Fuente, & A. Usero, *Evidence of enhanced star formation efficiency in luminous and ultraluminous infrared galaxies*. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 479, 703.

<http://arxiv.org/abs/0712.0582>

S. Jogee, *The Fueling and Evolution of AGN: Internal and External Triggers*. *Physics of Active Galactic Nuclei at all Scales*, editado por Danielle Alloin, Rachel Johnson y Paulina Lira, *Lecture Notes in Physics*, 2006, 693, 143.

<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0408383>

J. H. Krolik, *Active galactic nuclei: from the central black hole to the galactic environment*. Princeton University Press, 1999.

S. Martín, R. Mauersberger, J. Martín-Pintado, C. Henkel & S. García-Burillo, *A 2 Millimeter Spectral Line Survey of the Starburst Galaxy NGC 253*. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2006, 164, 450.

A. Usero, S. García-Burillo, J. Martín-Pintado, A. Fuente, & R. Neri, *Large-scale molecular shocks in galaxies: the SiO interferometer map of IC 342*. *Astronomy & Astrophysics*, 2006, 448, 457.

<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0510290>

A. Usero, S. García-Burillo, A. Fuente, J. Martín-Pintado, & N. J. Rodríguez-Fernández, *Molecular gas chemistry in AGN. I. The IRAM 30 m survey of NGC 1068*. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 419, 897.

<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0402556>