

# Capítulo 3

## Las galaxias del Universo local

### 3.1. Introducción

El Universo local provee un enlace vital entre la Vía Láctea y el Universo temprano y ofrece, además, una panorámica crucial de nuestra propia galaxia. La estructura espiral de la Vía Láctea es muy difícil de estudiar desde nuestra posición, inmersa en las partes externas del disco galáctico. Sin embargo, las galaxias cercanas se pueden observar con gran detalle, de manera que, a través de éstas, podemos estudiar los procesos que generan la estructura espiral de nuestra propia galaxia. Adicionalmente, el entender el estado de evolución de los sistemas galácticos cercanos, permite definir de forma más precisa los procesos que determinaron la evolución del Universo temprano.

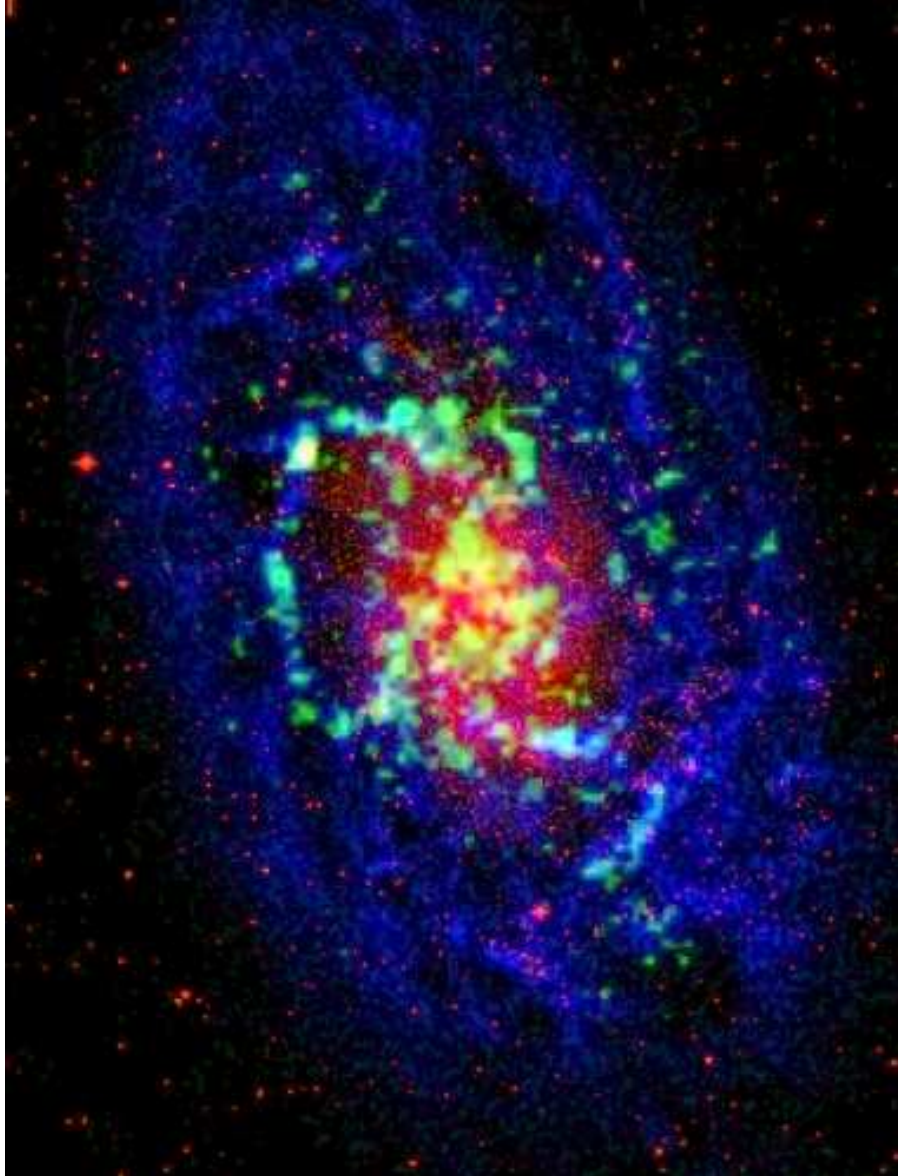


Figura 3.1: Imagen en color compuesto de M33, mostrando la emisión óptica en rojo, el hidrógeno neutro en azul, y el CO en verde. La emisión de CO ha sido trazada con SEQUOIA en el 14 m del FCRAO<sup>[1]</sup>.

## 3.2. Distribución del gas molecular

La distribución y abundancia de la materia interestelar densa contribuye, en gran medida, a determinar la morfología y evolución de las galaxias. Las estrellas se forman predominantemente en nubes moleculares gigantes, de 10–50 parsecs (pc) y masas de diez mil a un millón de veces la masa del Sol. Las estrellas masivas que emergen de estas nubes moleculares emiten la mayor parte de la radiación de las galaxias, y son las responsables del enriquecimiento químico del medio interestelar. Las nubes gigantes están formadas predominantemente por hidrógeno molecular, que no radía eficientemente bajo las condiciones típicas del medio interestelar y, por lo tanto, es difícil de detectar. Ésta es la razón por la que las nubes moleculares se estudian principalmente mediante trazadores de líneas moleculares tales como el monóxido de carbono (CO), o mediante la emisión térmica del continuo emitido por los granos interestelares de polvo. El GTM está optimizado para estudiar el estado físico de la componente fría interestelar de las galaxias, y para evaluar su importancia en los procesos de formación estelar.

La operación del GTM a altas frecuencias permitirá trazar la distribución del gas molecular y del polvo en las galaxias cercanas en las que se están formando estrellas en la actualidad, y también en aquellas en las que la formación estelar empezará en un futuro cercano. Se realizarán, además, censos sin sesgos de las propiedades de los discos de las galaxias. Como un ejemplo ilustrativo, la resolución angular del GTM corresponde a unos 20 pc a la distancia de la Galaxia Andrómeda (M 31) y de la Galaxia del Triángulo (M 33), lo cual es suficiente para resolver el gas contenido en sus nubes

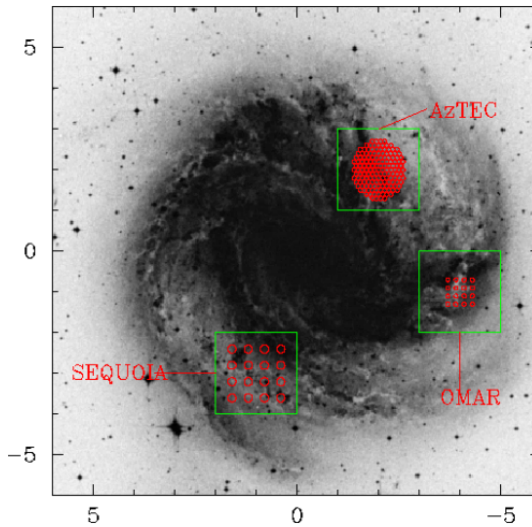


Figura 3.2: Imagen en el visible de M83 en la que se han superpuesto las huellas de los arreglos focales del GTM. El telescopio barrerá el campo para obtener imágenes completas de la galaxia. [Créditos de la imagen en el visible: STScI, AAO, ROE, UK-PPARC].

moleculares. Del mismo modo, el GTM podrá localizar y medir la cinemática de las nubes densas de gas molecular en unas 100 galaxias espirales cercanas, e investigar los mecanismos de la formación de las nubes moleculares y su disipación al pasar por los frentes de choque de los brazos espirales. Casi todos los instrumentos del GTM son cámaras multi-píxel, diseñadas para realizar cartografía rápida, por lo que se podrá estudiar este conjunto extenso de galaxias de una manera eficiente, realizando una caracterización robusta, desde el punto de vista estadístico.

### 3.3. Inestabilidades y formación estelar

La coherencia espacial entre las estrellas calientes (estrellas OB) y las regiones de gas ionizado (regiones H II) en las galaxias es producto del mecanismo a gran escala que regula la formación estelar. Algunos estudios<sup>[2,3]</sup> demuestran que la tasa de formación estelar de las galaxias está limitada, fundamentalmente, por la formación de las nubes moleculares de gas interestelar, desde un material inicialmente difuso. Tal paso evolutivo puede estar afectado por perturbaciones de presión, que llevan el material neutro caliente a una fase molecular fría y densa. Los agentes perturbadores incluyen las ondas espirales de densidad, iniciadas por la coalescencia entre galaxias, las inestabilidades de disco, y los cascarones producidos por explosiones de supernova en escalas intermedias. Con su gran capacidad de imagen, el GTM podrá definir las relaciones espaciales y cinemáticas entre la población de nubes moleculares y la componente de gas atómico trazada por el hidrógeno neutro (H I), que ya se ha estudiado mediante la transición de 21 cm. Estas relaciones pueden discriminar entre los posibles factores responsables del desarrollo de las nubes moleculares y la subsiguiente formación estelar de las galaxias.

Las galaxias con brotes violentos de formación estelar constituyen una clase de objetos en los que la tasa de formación estelar es muchas veces más eficiente que la encontrada en galaxias normales, como la Vía Láctea. Estos sistemas extremos, que se encuentran en el Universo local, son probablemente similares a los objetos hiper-luminosos que se observan en ondas submilimétricas a alto corrimiento al rojo. El fenómeno de brotes violentos de

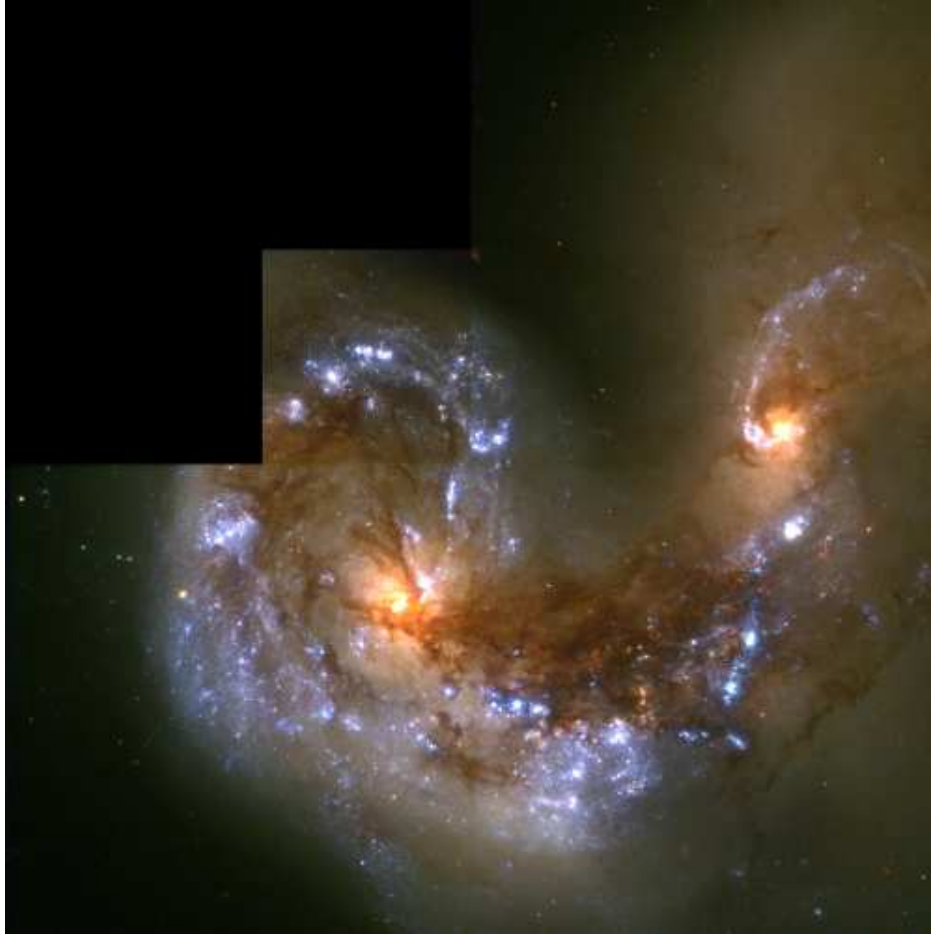


Figura 3.3: Imagen de los núcleos en coalescencia de las galaxias de La Antena, NGC 4038 y NGC 4039, tomada por el Telescopio Espacial Hubble. Este sistema es responsable de crear las condiciones para que se produzca una rápida y eficiente conversión del gas molecular en estrellas. El GTM medirá este proceso mediante el trazado del flujo del gas molecular en las zonas centrales del sistema. [Créditos de la imagen: B. Whitmore, STScI].

formación estelar es el resultado de los cambios abruptos que experimenta el medio interestelar al deshacerse de su momento angular e incentivar su caída a gran escala hacia las regiones centrales de las galaxias. Estas calamidades dinámicas están producidas por fuertes interacciones entre galaxias, incluida la coalescencia entre dos o varias galaxias, y por fuertes potenciales barrados. Los movimientos de caída del gas se pueden medir con gran precisión con los interferómetros milimétricos existentes. Sin embargo, para cuantificar la cantidad de material molecular que se está transportando se debe realizar un conteo sistemático del mismo con un telescopio de apertura simple, como el GTM, que pueda cartografiar toda la galaxia con gran precisión angular, incluyendo las componentes extendidas. Tales medidas nos darán información básica sobre la dinámica a gran escala de estos sistemas extremos de formación estelar.

Una de estas nuevas técnicas que ofrecerá el GTM será el uso de las líneas de recombinación de hidrógeno para localizar las estrellas masivas en formación y la tasa de formación neta. Puesto que todas las estrellas jóvenes masivas nacen rodeadas de un caparazón grueso de gas y polvo, la mayor parte de la radiación que generan se ve absorbida por el polvo y se rerradía en ondas infrarrojas. En consecuencia, normalmente se realiza una inferencia de la tasa de formación estelar a través de la luz infrarroja. Las líneas de recombinación del hidrógeno en ondas milimétricas se originan en el gas que rodea a las estrellas, y que se ioniza debido al fuerte campo de radiación ultravioleta que éstas generan. Los caparazones de gas y polvo son transparentes a las ondas milimétricas, por lo que las líneas de recombinación del hidrógeno no se ven atenuadas, y podremos detectarlas con el GTM e interpretarlas en térmi-

nos de la formación de estrellas masivas. Se podrán detectar, además, varias transiciones de recombinación simultáneamente entre 1 y 3 mm, mejorando la eficiencia observacional, al combinar su señal.

### **3.4. Exploración de las condiciones físicas del medio interestelar**

Las transiciones rotacionales de CO son una herramienta que permite cuantificar las propiedades globales de las nubes moleculares gigantes, pero su utilidad puede verse limitada por las grandes opacidades en línea y la insensibilidad en las zonas de alta densidad ( $> 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ) de las nubes, en las que se condensan las estrellas. La densidad superficial del gas se puede determinar sin utilizar muchas suposiciones, si se emplean trazadores del hidrógeno molecular con menor opacidad, tales como  $^{13}\text{CO}$  o el continuo térmico emitido por el polvo. Además, se pueden medir las condiciones del gas denso a través de transiciones múltiples de una molécula dada, como son HCN,  $\text{HCO}^+$ , o CS. No obstante, dichos diagnósticos son difíciles de obtener, ya que las líneas son intrínsecamente débiles y los factores de relleno son muy pequeños, haciendo que la señal sea todavía más débil. Para superar tales limitaciones, es esencial contar con una gran área colectora. El GTM podrá investigar la variación de las condiciones del gas molecular en función de la posición radial dentro de la galaxia, haciendo uso de su batería de instrumentos cartográficos y su gran apertura. Las condiciones encontradas se podrán comparar directamente con las tasas y eficiencia de formación estelar para evaluar los procesos que las regulan.



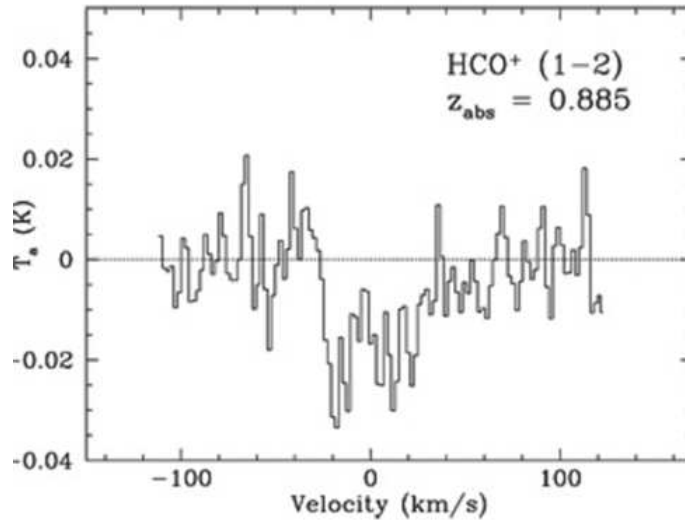


Figura 3.4: Sistema en absorción a  $z=0.885$  detectado en  $\text{HCO}^+(1-2)$  hacia el cuasar de alto corrimiento al rojo PKS 1830–211 con el telescopio de 14 m del FCRAO. [Cortesía de: M. Yun, UMass Amherst/FCRAO].

La sensibilidad y precisión de la superficie del GTM son también esenciales para investigar las condiciones físicas del medio interestelar de galaxias más distantes. Los astrónomos ópticos han explotado por años la luz proveniente de objetos brillantes distantes que, a su paso por nubes de gas más cercanas, es absorbida, desarrollando así métodos para determinar la naturaleza del gas absorbente templado y caliente en y alrededor de las galaxias. En principio, las mismas técnicas se pueden utilizar en ondas milimétricas. De hecho, ya se ha identificado un grupo pequeño de sistemas en absorción a estas frecuencias. Sin embargo, el número de sistemas distantes de fondo tan brillantes como para permitir estos estudios en ondas milimétricas es pequeño para la apertura de los telescopios con los que se cuenta en la actualidad. Además, estos telescopios tienen una cobertura instantánea de

frecuencia extremadamente limitada, de forma que la búsqueda de líneas de absorción es una tarea muy ineficiente.

La alta sensibilidad del GTM incrementará el número de objetos de fondo a explorar en varios miles, y podrá cubrir un gran intervalo de frecuencia y encontrar un gran número de sistemas en absorción, para caracterizar la física de los mismos a través de estudios de seguimiento más detallados. Cuando se compile un conjunto de datos que abarque un abanico de transiciones moleculares en una gran variedad de sistemas en absorción, a diferentes corrimientos al rojo, se podrá concluir qué propiedades del medio interestelar sufren variaciones, tales como la densidad, la temperatura y las abundancias de las especies químicas. Asimismo, a través de las variaciones se podrán explorar aspectos globales del Universo como la temperatura del fondo de radiación cósmica de microondas o el valor de las constantes fundamentales de la física.

### **3.5. Cartografía de galaxias cercanas**

Según los modelos cosmológicos en los que el Universo está dominado por materia oscura fría, las galaxias se forman y evolucionan en regiones densas a través de colapso gravitatorio y un subsiguiente acrecentamiento de materia. En estos modelos, las galaxias se vuelven más grandes y pesadas mediante una serie de coalescencias entre grandes estructuras y el canibalismo de galaxias más pequeñas y nubes de gas de la vecindad. Por lo tanto, el ambiente en el que se desarrollan las galaxias juega un papel crítico en su historia de acrecentamiento de masa y en su historia de formación estelar. En un estudio pionero<sup>[4]</sup>, y todavía no sobrepasado, el telescopio de 14 m del FCRAO obtuvo

medidas de la emisión de CO ( $1 - 0$ ) de unas 300 galaxias para caracterizar el contenido de gas molecular de diferentes tipos morfológicos de galaxias. Debido a limitaciones observacionales, sólo se realizaron barridos a lo largo de los ejes mayores de las galaxias, o sólo se obtuvo la emisión global de las galaxias, de forma que se conocen únicamente las características globales del gas. Una caracterización completa de la distribución y cinemática del gas, la formación estelar y su dependencia con la riqueza del entorno requiere mapas completos.

La importancia crucial del entorno y la necesidad de resolver el contenido gaseoso de las galaxias se demuestra dramáticamente en la imagen del censo de CO de las galaxias del Cúmulo de Virgo realizado por el 14 m del FCRAO. Como se muestra en la figura 3.5, la extensión espacial del gas frío está sustancialmente truncada en las galaxias de disco que se encuentran cerca del centro del cúmulo, tal y como éste se ve señalado por la emisión en rayos X. El truncamiento revela que la presencia del gas intercúmulo y la gran densidad de galaxias cerca del centro, tienen un impacto directo en el contenido de material interestelar de las galaxias y, con el tiempo, en su formación estelar presente y futura. En la actualidad, con el 14 m del FCRAO se está llevando a cabo la cartografía en CO de las galaxias con mayor tamaño angular que conocemos, que son el objetivo del censo Spitzer de galaxias infrarrojas cercanas (SINGS).

Los astrónomos del INAOE y UMass Amherst llevarán a cabo censos del contenido de gas molecular, mediante trazadores como el CO, de una gran muestra de galaxias que representen una gran variedad de entornos. La com-

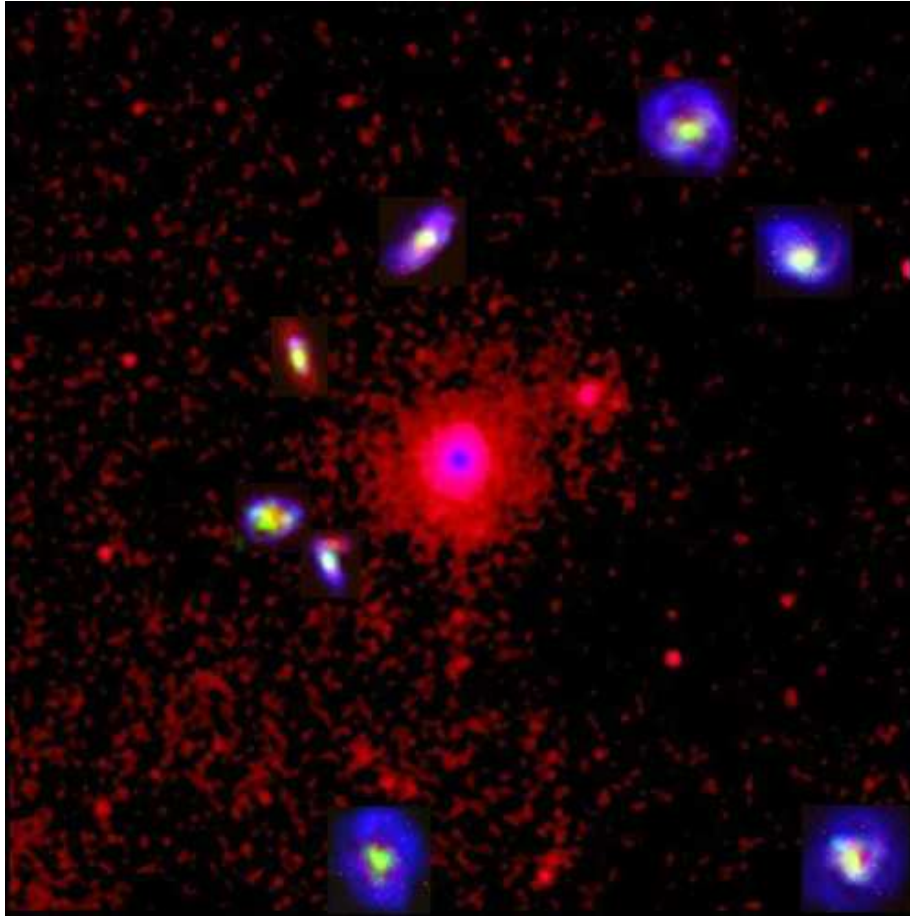


Figura 3.5: Imagen en color compuesto de nueve galaxias del Cúmulo de Virgo: la emisión de CO se representa en verde, la de H I en azul, la emisión-X en magenta, y la emisión óptica (localizada en el interior de las galaxias) en rojo. La emisión de CO proviene de datos adquiridos con el arreglo SEQUOIA en el 14 m del FCRAO<sup>[5]</sup>. Las imágenes de las galaxias se ha magnificado para mostrar sus detalles morfológicos en más detalle.

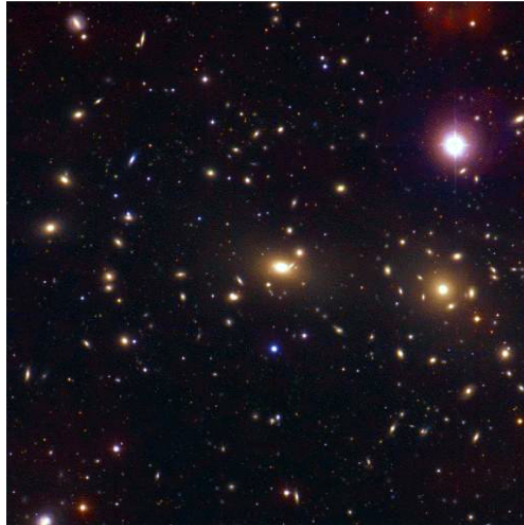


Figura 3.6: Imagen óptica en color compuesto de la región central del Cúmulo de Coma. Centenas de galaxias como éstas se podrán cartografiar simultáneamente con el GTM. [Cortesía de O. López-Cruz, INAOE/NOAO].

paración de la emisión CO con el H I y las imágenes infrarrojas de Spitzer deberán revelar la relación entre la distribución a gran escala del gas frío y las estructuras estelares. En sus primeros años de operación, el GTM cartografiará centenares de galaxias a distancias de hasta 100 Mpc, con resoluciones menores que un kpc, para compilar un banco de datos de distribuciones del gas y polvo, que permitan una caracterización estadísticamente significativa de las galaxias y la influencia de sus entornos.

### 3.6. Exploración de la Galaxia con el VLBI

La inclusión del GTM en varias redes globales de Interferometría de Base muy Larga (VLBI) ofrece la posibilidad de alcanzar resoluciones angulares sin

precedentes y, consecuentemente, atacar problemas astrofísicos fundamentales de forma novedosa.

### **3.6.1. Cartografía del horizonte de sucesos de un hoyo negro**

Quizás el proyecto más prometedor y revolucionario que el GTM puede ofrecer en la red VLBI es establecer la existencia y naturaleza del hoyo negro supermasivo de la Vía Láctea. La mayor parte de la comunidad científica acepta que la fuente de energía que alimenta a los núcleos activos de galaxias es el acrecentamiento de un hoyo negro supermasivo, ya que la producción de energía y los tamaños en los que ésta se produce excluyen casi todos los procesos alternativos. Sin embargo, para ser una teoría tan comúnmente aceptada, tenemos un conocimiento muy impreciso de los procesos y condiciones físicas en escalas de unos pocos radios de Schwarzschild ( $R_{\text{sch}}$ ), cerca del horizonte de sucesos del hoyo negro.

El VLBI puede estudiar las zonas centrales de los núcleos activos de galaxias, cerca de la singularidad central. El mejor caso a estudiar, de hecho, es SgrA\*, la radio-fuente compacta de nuestra Galaxia. La interpretación de que SgrA\* sea la manifestación de un hoyo negro de unos 4 millones de masas solares se debe a una fuerte evidencia observacional. La dispersión de velocidades de las estrellas alrededor del centro de la Galaxia y las órbitas descritas por estas estrellas<sup>[6]</sup> indican que una masa de esta magnitud está encerrada en el centro de la Vía Láctea. Los límites superiores al movimiento propio de SgrA\* también indican que la radio-fuente debe estar asociada con

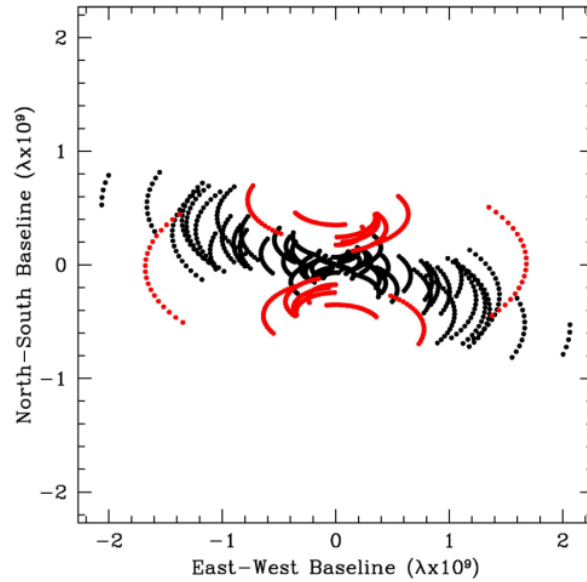


Figura 3.7: Cobertura de las líneas de base del VLBI a 86 GHz utilizando el VLBA y el GTM. Cuanto más cobertura tiene este plano, más precisas se vuelven las imágenes astronómicas, y menos tiempo se invierte en las observaciones. La cobertura del VLBA se muestra en negro, y las líneas de base aportadas por la inclusión del GTM se muestran en rojo. El GTM provee al VLBI de las críticas líneas de base norte-sur, que permitirán búsquedas de estructuras débiles, además de duplicar la sensibilidad del arreglo. [Créditos: S. Doeleman, NEROC, Haystack Obs.]

al menos 400 mil masas solares. Estas medidas de la masa, combinadas con los tamaños intrínsecos medidos con VLBI a 43 y 86 GHz<sup>[7]</sup> implican que la densidad de masa excede los dos millones de trillones de masas solares por pc cúbico ( $2 \times 10^{24} M_{\odot}/\text{pc}^3$ ), lo que equivale a 4 órdenes de magnitud menos que la densidad de un hoyo negro de 4 millones de masas solares. Puesto que cualquier agregación de la materia con estas densidades se convertirá en un hoyo negro en una escala de tiempo menor que la edad de la Galaxia, este resultado se toma como la mejor evidencia de la existencia de hoyos negros supermasivos. Sin embargo, ésta no es una prueba concluyente, ya que para ello se necesitaría presenciar movimientos relativistas en el horizonte de sucesos o algún otro proceso relativista provocado por la singularidad gravitatoria.

El medio interestelar ionizado disipa y agranda las imágenes en radio de SgrA\* con una dependencia cuadrática con la longitud de onda, de forma que las frecuencias más altas del VLBI son las más importantes para establecer límites al tamaño de SgrA\*. En la banda de 86–230 GHz se puede usar el GTM en combinación con el resto de telescopios de la red VLBI para observar las estructuras y los procesos que ocurren a unos pocos radios de Schwarzschild del horizonte de sucesos. A 86 GHz la mayor sensibilidad del GTM, acoplada con las líneas de base norte-sur con las que complementa al VLBA, permitirá probar si existen asimetrías en la estructura interna de SgrA\* a escalas de  $6 - 10R_{\text{sch}}$ . Estas asimetrías están predichas por los modelos de eyección en los que la emisión de SgrA\* estaría producida por un chorro saliente de partículas relativistas, análogo a los chorros observados en radio en núcleos activos extragalácticos. La escala de tiempo de las fulgura-



ciones X e infrarrojas de SgrA\* corresponde a decenas de  $R_{\text{sch}}$ , abriendo la emocionante posibilidad de observar cambios estructurales durante una de las observaciones del VLBI.

La resolución angular a 230 GHz aportada por el GTM mediante las líneas de base conjuntas con las antenas de Hawai y Sudamérica, es suficiente para emprender la búsqueda de los dramáticos efectos relativistas cuya existencia se predice en los alrededores más inmediatos del hoyo negro del centro galáctico. Un hoyo negro embebido en un flujo de acrecentamiento ópticamente delgado, debe de manifestarse como una depresión central en el perfil de brillo, o como una sombra. Esta morfología de sombra requiere la presencia de una singularidad, y los modelos muestran que los arreglos del VLBI operando de 230 GHz a 450 GHz deberían de ser lo suficientemente sensibles como para detectar esta señal<sup>[8]</sup>. SgrA\* se podría convertir en un banco de pruebas para la teoría de la relatividad general, y para la modelización de los flujos de inyección y eyección de un hoyo negro. Observaciones como éstas pondrían fin al paradigma de los hoyos negros supermasivos, para introducirlos en la esfera de realidad que debe incorporarse en los modelos físicos.

### **3.6.2. Aceleradores cósmicos: mecanismos de emisión y colimación de los chorros relativistas**

Una de las cuestiones fundamentales en la física de los núcleos activos de galaxias es la determinación del mecanismo con el que éstos pueden acelerar

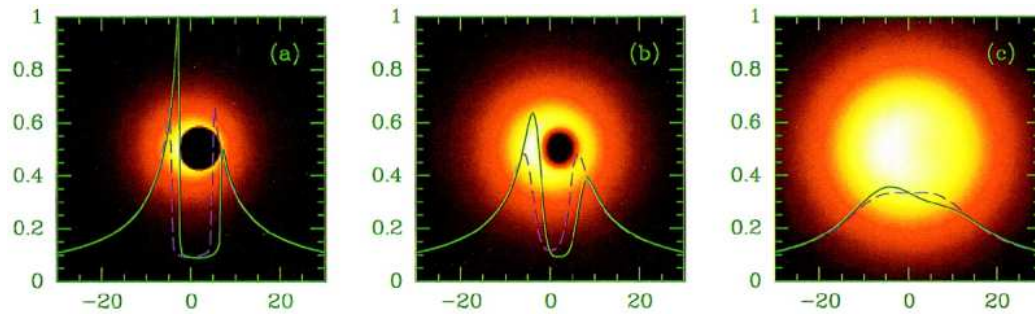


Figura 3.8: Imágenes simuladas de un disco de emisión ópticamente delgado, en caída libre, circundando un hoyo negro supermasivo en rotación. El cuadro (a) muestra el brillo superficial derivado de los cálculos relativistas; el cuadro (b) muestra lo que el VLBI podría observar a 450 GHz, incluyendo los efectos de dispersión y la anchura del haz del arreglo; y el cuadro (c) muestra la emisión a 230 GHz que el VLBI podría observar, bajo las mismas condiciones. Las líneas continuas y discontinuas representan los cortes verticales y horizontales del perfil de brillo, con el eje de ordenadas marcando las intensidades relativas. El eje de abscisas da la distancia radial en unidades de la mitad del radio gravitacional del hoyo negro ( $0.5 \times R_{\text{sch}}$ ). [Cortesía de H. Falcke et al. ©AAS<sup>[8]</sup>].

y colimar los chorros relativistas de partículas. Las observaciones del VLBI de movimientos superlumínicos confirman que en muchos casos la inyección del chorro debe de ser cercano a la velocidad de la luz ( $0.98c$  en el caso de la galaxia Seyfert 3C 120). Sólo el VLBI en su configuración de mayor resolución angular puede seguir el movimiento de estos chorros en su base. Se necesita observar en frecuencias altas para penetrar los nódulos observados en radio, ya que son ópticamente gruesos y se deben evitar los efectos de depolarización Faraday, que enmascaran las estructuras del campo magnético a frecuencias más bajas. Un arreglo VLBI global observando a 43 GHz ya ha mostrado que el chorro de M87 (Virgo A) se abre a  $\sim 100R_{\text{sch}}$  de su hoyo negro, implicando que la colimación del chorro la gobierna el disco de acreción y no los procesos de la vecindad del hoyo negro<sup>[9]</sup>. Estas mismas observaciones también muestran un abrillantamiento del limbo de la base del chorro, lo que refuerza el concepto de que está colimado magnéticamente. Los nuevos arreglos a 86 y 230 GHz con el GTM, que utilizarán los nuevos sistemas de grabación de banda ancha, llegarán a resoluciones lineales de  $10 - 25R_{\text{sch}}$  en M87, permitiendo la realización de experimentos sobre los mecanismos de aceleración magnetohidrodinámicos en escalas comparables al disco de acreción. Las observaciones polarimétricas a altas frecuencias serán igualmente importantes, ya que medirán los campos magnéticos al inicio del proceso de colimación. Otras fuentes, incluyendo 3C 120, se podrán estudiar con una resolución lineal similar.

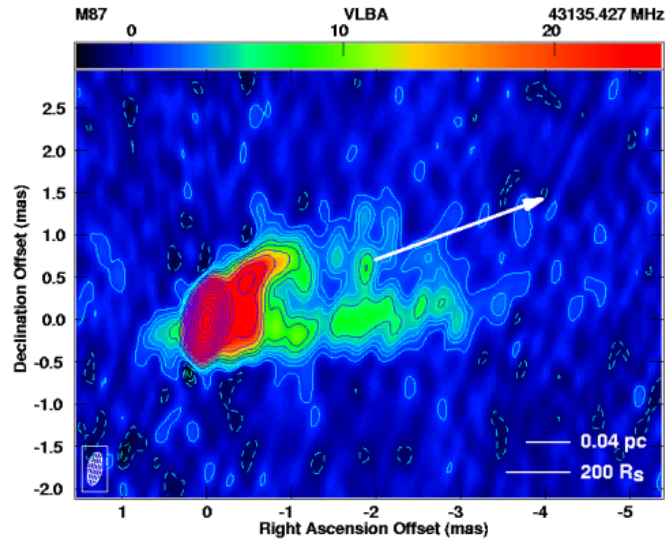


Figura 3.9: Imagen VLBA de M87 a 43 GHz. La emisión del chorro se detecta claramente desde los 0.5 a los 3 milisegundos de arco ( $140 - 820R_{\text{sch}}$  para el hoyo negro de  $3 \times 10^6 M_{\odot}$  de masas solares, que se cree alimenta la actividad de su núcleo galáctico). La dirección de la base del chorro se alinea con la dirección del chorro de gran escala, de más del kpc, que se señala con una flecha. La futura alta sensibilidad del VLBI, incluyendo al GMT, permitirá obtener imágenes como ésta a tan sólo  $10 - 25R_{\text{sch}}$ . [Cortesía de C. Ly et al. ©AAS<sup>[10]</sup>].

# Referencias

- [1] Heyer, M. et al. (2004), *Astrophys. J.*, 602, 723.
- [2] Rownd, B.K. y Young, J.S. (1999), “The Star Formation Efficiency within Galaxies”, *Astron. J.*, 118, 670.
- [3] Wong, T. y Blitz, L. (2002), “The Relationship between Gas Content and Star Formation in Molecule-rich Spiral Galaxies”, *Astrophys. J.*, 569,157.
- [4] Young, J. et al. (1995), “The FCRAO Extragalactic CO Survey. I. The Data”, *Astrophys. J. Suppl.*, 98, 219.
- [5] Kim, H. R. (2003), “CO Imaging Survey of Virgo Cluster Spirals”, Tesis Doctoral, Busan National University, Corea.
- [6] Schoedel, R. et al (2002), “A star in a 15.2-year orbit around the super-massive black hole at the centre of the Milky Way”, *Nature*, 419, 694.
- [7] Bower, G.C. et al. (2004), “Detection of the Intrinsic Size of Sagittarius A\* Through Closure Amplitude Imaging”, *Science*, 304, 704.
- [8] Falcke, H., Melia, F. y Agol, E. (2000), “Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center”, *Astrophys. J.*, 528, L13.

- [9] Junor, W., Biretta, J. y Livio, M. (1999), “Formation of the radio jet in M87 at 100 Schwarzschild radii from the central black hole”, *Nature*, 401, 891.
- [10] Ly, C., Walker, R. C., y Wrobel, J. M. (2004), “An Attempt to Probe the Radio Jet Collimation Regions in NGC 4278, NGC 4374 (M84), and NGC 6166”, *Astron. J.*, 127, 119.