

Capítulo 2

Cosmología y el origen y evolución de las galaxias

2.1. Introducción

En 1997 el Comité de Astronomía y Astrofísica del Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos estableció las áreas de la astronomía y la astrofísica que, por su importancia científica, debían pasar a ser prioritarias en las siguientes décadas. Se declaró que las cuatro prioridades científicas a resolver eran: (*i*) la determinación de la geometría y el contenido energético del Universo mediante la caracterización de las anisotropías del fondo de radiación cósmica; (*ii*) el estudio de las galaxias en su época de formación, a muy alto corrimiento al rojo; (*iii*) la detección y estudio de los planetas que circundan las estrellas cercanas; y (*iv*) la caracterización de las propiedades de los hoyos negros de todos los tamaños.

Las prestaciones del GTM y su programa científico dedicado a la formación y evolución de las estructuras a alto corrimiento al rojo, descrito en este capítulo, están completamente alineados con las recomendaciones de dicho informe estratégico. Las áreas de investigación mencionadas son particularmente relevantes para la astronomía en general, como se describirá a continuación.

La formación estelar del Universo está localizada principalmente en el medio interestelar de las galaxias, que son zonas donde hay mucho polvo y, por lo tanto, son regiones fuertemente oscurecidas. Tal actividad estelar puede pasar desapercibida en la cartografía ultravioleta, visible e infrarroja del cielo. Sin embargo, la radiación milimétrica y submilimétrica ofrece una visión casi transparente del cielo, y de ahí que la astronomía milimétrica proporcione una oportunidad única de desafiar los escenarios que hasta ahora se han aceptado para explicar los procesos físicos que gobiernan la formación de las estructuras del Universo, y que controlan la subsiguiente evolución de las galaxias y cúmulos de galaxias que vemos hoy en día.

En los últimos años se ha desarrollado un gran esfuerzo teórico, experimental y observacional para resolver algunas de las cuestiones fundamentales de la cosmología. Cuando el Universo tenía menos del 10% de su edad actual, las primeras galaxias ya se habían formado mediante la agregación de la primera generación de estrellas, que pasó a enriquecer el medio interestelar primigenio con elementos pesados y otros subproductos de la formación estelar. El medio físico del Universo a alto corrimiento al rojo es potencialmente muy diferente del medio que nos rodea, y nos fuerza a poner en duda

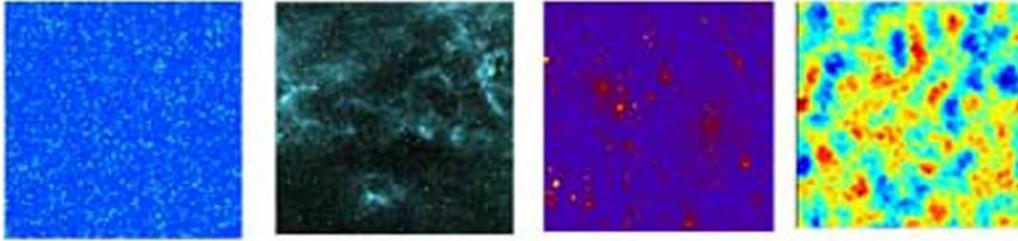


Figura 2.1: De izquierda a derecha, simulación en ondas milimétricas de la población de galaxias en formación, los cirros galácticos, el efecto Sunyaev-Zel'dovich de los cúmulos de galaxias, y las fluctuaciones del fondo de radiación cósmica de microondas. Estas simulaciones se amalgaman para realizar mapas del cielo extragaláctico que, tras ser procesados por un simulador de telescopios, estiman la factibilidad de los censos que se realizarán con el GTM^[1].

la suposición naíf de que los detalles de los procesos y eficiencias de la formación estelar sean iguales a los que conocemos localmente. Para comprender la formación y evolución de las galaxias debemos, por lo tanto, entender los procesos de formación y la historia evolutiva de las estrellas, y localizar las galaxias y los cúmulos galácticos en el contexto de la distribución de materia, que evoluciona desde las estructuras iniciales detectadas a través de las anisotropías del fondo de radiación cósmica de microondas.

2.2. Historia de la formación estelar ópticamente oscurecida

Los brotes de formación estelar violenta en galaxias polvosas, ópticamente oscurecidas, se manifiestan en forma de un fuerte campo de radiación que va desde el infrarrojo lejano a las ondas milimétricas. Conforme aumenta el corrimiento al rojo (z) de las galaxias, el pico de emisión infrarroja se corre hacia el régimen milimétrico, por lo tanto, las observaciones milimétricas pueden trazar la evolución de la formación estelar contenida en galaxias polvosas a lo largo de un gran volumen del Universo a alto- z .

En principio, las galaxias se pueden detectar en ondas milimétricas con tanta facilidad a $z \sim 8$ como a $z \sim 1$. Dado el gran volumen a explorar, los censos milimétricos pueden poner a prueba si estas galaxias representan la formación de los sistemas galácticos más masivos, como son las galaxias elípticas, en un solo episodio violento, al precipitar la materia que se encuentra alrededor de los picos de densidad de la distribución cósmica de materia a sus centros, o si su formación requiere periodos mucho más extendidos, agregando materia de sistemas poco masivos, con tasas de formación estelar mucho más modestas.

El principal objetivo científico del GTM es explotar su alta resolución angular, sensibilidad y velocidad de cartografía para comprender la historia de la evolución de las poblaciones de galaxias que dominan la emisión del fondo extragaláctico, emitido del infrarrojo lejano al milimétrico, lo que supone el $\sim 50\%$ de la energía integrada emitida por el Universo a través de objetos

discretos.

El GTM realizará un conjunto de censos pequeños y profundos, hasta llegar al límite de confusión, y también censos superficiales amplios para, conjuntamente, caracterizar el Universo a alto corrimiento al rojo en longitudes de ondas milimétricas. Al complementar estas observaciones con otras observaciones multifrecuencia, podremos (*i*) identificar las galaxias que forman la emisión del fondo extragaláctico, del infrarrojo lejano al milimétrico, y determinar sus corrimientos al rojo; (*ii*) medir sus luminosidades bolométricas, tasas de formación estelar y la evolución de sus funciones de luminosidad; (*iii*) determinar la fracción de núcleos activos de galaxias y las de las diferentes poblaciones de galaxias infrarrojas; (*iv*) medir el agrupamiento espacial de estas galaxias; y (*v*) caracterizar las propiedades espectroscópicas y de continuo de estas poblaciones de galaxias.

2.2.1. Censos cosmológicos

Las primeras generaciones de censos submilimétricos y milimétricos^[2,3] se han llevado a cabo con las cámaras SCUBA y MAMBO, que cuentan con arreglos bolométricos de tamaño modesto (~ 100 pixeles) en los telescopios de 15 m JCMT y de 30 m del IRAM. Dichos censos cubren áreas que abarcan desde unos cuantos minutos de arco cuadrados a medio grado cuadrado, y han realizado las primeras medidas de la historia de la formación estelar oscurecida del Universo temprano. Sin embargo, las observaciones descritas, por sí solas, no pueden determinar exactamente cuál es la evolución y distribución a gran escala de la población de galaxias milimétricas. La figura 2.4

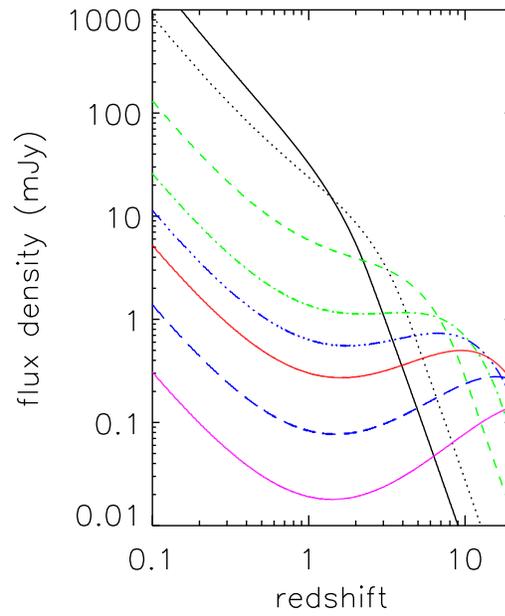


Figura 2.2: Efecto del corrimiento al rojo sobre la densidad de flujo observada proveniente de un objeto con la luminosidad de la galaxia infrarroja ultraluminosa Arp 220. De arriba a abajo, a $z=0.1$, las curvas representan la densidad de flujo observada a 160, 250, 500, 850, 1110, 1400, 2100 y 3300 micras, respectivamente. [Cortesía de D.H. Hughes, INAOE].

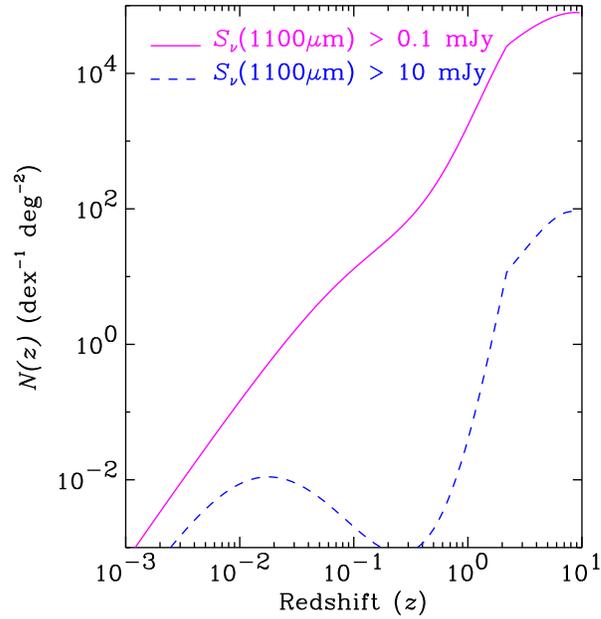


Figura 2.3: Distribución de corrimientos al rojo de galaxias polvosas con brotes de formación estelar en censos como los que se desarrollarán con el GTM. Los censos profundos de regiones pequeñas (curva continua) estarán dominados por la población de alto corrimiento al rojo ($z \gtrsim 2$), mientras que los censos superficiales de amplio campo (curva discontinua) estarán caracterizados por una distribución bimodal, que incluirá tanto galaxias distantes como galaxias brillantes del Universo local ($z \lesssim 0.05$). [Cortesía de D.H. Hughes, INAOE].

ilustra las dos razones fundamentales por las que esto ocurre: en primer lugar, las medidas de la densidad de la población derivadas de los diversos censos extragalácticos cubren un intervalo pequeño de brillos; y en segundo lugar, la incertidumbre en la densidad de fuentes es sustancial, ya que el número total de galaxias milimétricas detectadas con una razón señal a ruido mayor que cuatro es menor que cien. Con una estadística tan limitada, es difícil determinar la densidad de flujo a la que la densidad de fuentes converge para brillos débiles y, por lo tanto, la contribución del total de la población milimétrica al fondo de emisión extragaláctico. El agrupamiento de galaxias y el pequeño tamaño de las áreas cubiertas en los censos también dificultan el conteo de las fuentes menos brillantes, y la rareza de las fuentes más brillantes no permite saber si existe un corte en la evolución de la función de luminosidad o en la distribución de corrimientos al rojo de la población milimétrica.

Las razones prácticas que gobiernan las limitaciones arriba señaladas son la pequeña cobertura en frecuencia impuesta por las ventanas atmosféricas del infrarrojo lejano al milimétrico disponibles desde la Tierra; la baja resolución espacial, lo que implica un alto ruido por confusión, además de una reducida precisión posicional; el restringido campo de visión impuesto por el tamaño de los arreglos bolométricos disponibles, de típicamente 5 min de arco cuadrados; y la baja sensibilidad del sistema, resultado de la combinación del ruido instrumental, la apertura y precisión de la superficie del telescopio, y de la transmisión y el ruido del cielo. Todos los factores mencionados restringen el tamaño de los censos más amplios a menos de medio grado cuadrado, de tal forma que los censos milimétricos existentes son necesariamente sensibles

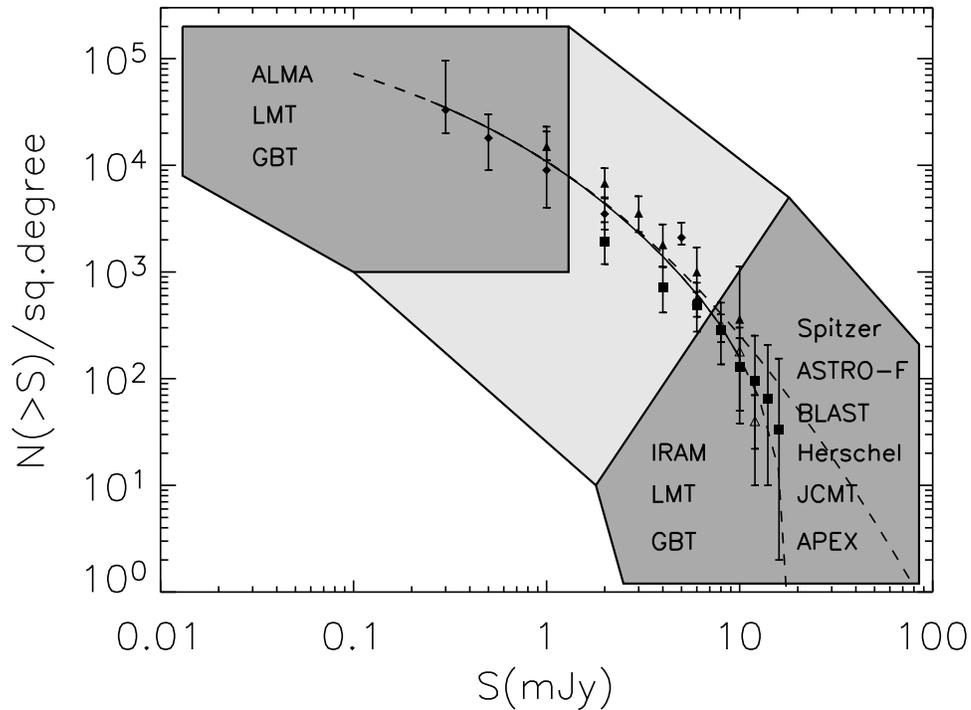


Figura 2.4: Densidad de fuentes extragalácticas a $850 \mu\text{m}$, como función del flujo medido en los censos SCUBA. La línea continua representa uno de los muchos posibles modelos de evolución de la población que reproducen los datos a $850 \mu\text{m}$ ^[4]. Las nuevas generaciones de instrumentos (sub-)milimétricos listados en la figura explorarán fundamentalmente las zonas gris oscuro, que se encuentran por debajo de los límites de confusión o por encima de las capacidades cartográficas de la infraestructura con la que se cuenta en la actualidad.

sólo a las galaxias más masivas y luminosas, $L_{\text{IR}} \gtrsim 3 \times 10^{12} L_{\odot}$, lo que corresponde a tasas de formación estelar mayores que 300 masas solares (M_{\odot}) por año, si es que la población está localizada a $z \gtrsim 1$, suposición consistente con los corrimientos al rojo espectroscópicos y fotométricos con los que se cuenta hasta el momento.

Los censos desarrollados con el GTM sobrepasarán estas dificultades. El GTM utilizará su gran velocidad de cartografía, sensibilidad y resolución angular para medir la densidad superficial y las propiedades de agrupamiento de las galaxias fuertemente oscurecidas entre $850 \mu\text{m}$ y 3 mm , sobre un intervalo amplio de densidades de flujo, convirtiéndose así en uno de los instrumentos más potentes del futuro en el régimen que va desde el infrarrojo lejano al milimétrico^[4]. El GTM podrá detectar galaxias con luminosidades $L_{\text{IR}} \gtrsim 10^{11} L_{\odot}$ y tasas de formación estelar $\gtrsim 10\text{--}50 M_{\odot}/\text{año}$, caracterizando galaxias más típicas que las encontradas en los censos que se han realizado hasta el momento y, al mismo tiempo, podrá descubrir las galaxias más extraordinariamente luminosas del Universo a alto corrimiento al rojo. Un modo extremadamente violento de formación estelar podría estar asociado con la súbita formación de las galaxias elípticas masivas, en escalas de tiempo menores que unos cuantos miles de millones de años. Por ejemplo, una búsqueda de sistemas extremos, con tasas de formación estelar mayores que $5000 M_{\odot}/\text{año}$, necesitaría un censo de más de 100 grados cuadrados antes de que se puedan deducir resultados estadísticamente significativos sobre este modo de formación galáctica.

2.2.2. Resolución del fondo de radiación del infrarrojo lejano al milimétrico

La emisión integrada de las galaxias fuertemente oscurecidas tiene su pico a $\sim 230 \mu\text{m}$ y contribuye aproximadamente un 50% al fondo de radiación extragaláctico desde las ondas de radio a los rayos X. Se trata de una componente que debe resolverse y entenderse. Es ilustrativo mencionar que hasta el momento se ha cartografiado menos de un grado cuadrado con la resolución necesaria para empezar a resolver la composición del fondo de radiación mencionado. Por ejemplo, sólo los mapas submilimétricos más profundos de SCUBA, con ruidos de $\sim 0.5 \text{ mJy}$ a $850 \mu\text{m}$, resuelven en galaxias individuales alrededor del $\gtrsim 30\%$ del fondo a $850 \mu\text{m}$, pero cubren menos de 100 min de arco cuadrados^[2,3]. Además, la extrapolación de las densidades de fuentes medidas por SCUBA y MAMBO, a longitudes de onda más corta, predicen que estas fuentes contribuyen menos del 15% al fondo infrarrojo lejano, que tiene su máximo a $230 \mu\text{m}$, mientras que los censos más grandes de alrededor de ~ 2000 min de arco cuadrados y más superficiales, con ruidos de $\sim 2.5 \text{ mJy}$ a $850 \mu\text{m}$, sólo logran identificar unos cuantos por cientos de este fondo^[5].

El GTM será el telescopio de mayor apertura efectiva operando a 1 mm y tendrá un límite de confusión, por fuentes extragalácticas, extremadamente bajo. Con AzTEC, la primera cámara bolométrica del GTM, se podrá resolver todo el fondo milimétrico en galaxias individuales. En la figura 2.5 se indican las sensibilidades requeridas, las áreas de los censos y el fondo correspondiente que resolverán.

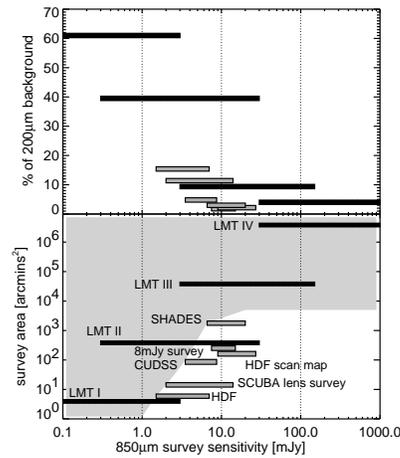


Figura 2.5: Censos cosmológicos planeados con el GTM. Se prevé efectuar una serie de censos embebidos, desde los muy profundos sobre un área pequeña, a los muy amplios pero bastante superficiales. La fracción correspondiente del fondo infrarrojo lejano resuelto se ilustra en el recuadro superior^[5].

2.2.3. Medida de la distribución de corrimientos al rojo de galaxias oscurecidas

Las propiedades de agrupamiento y la densidad superficial de fuentes milimétricas, y su contribución al fondo extragaláctico, son sólo una parte de la información necesaria para comprender las propiedades evolutivas de esta población de galaxias. Necesitamos, también, medir con precisión sus corrimientos al rojo. El medio interestelar fuertemente contaminado por polvo hace difícil la identificación, sin ambigüedad, de las contrapartidas visibles e infrarrojas de estas galaxias. Por lo tanto, en los últimos años se ha desarrollado un gran esfuerzo en determinar con qué precisión las distribuciones espectrales de energía, en el intervalo que va desde el infrarrojo medio hasta el radio, pueden predecir el corrimiento al rojo al que se encuentran las

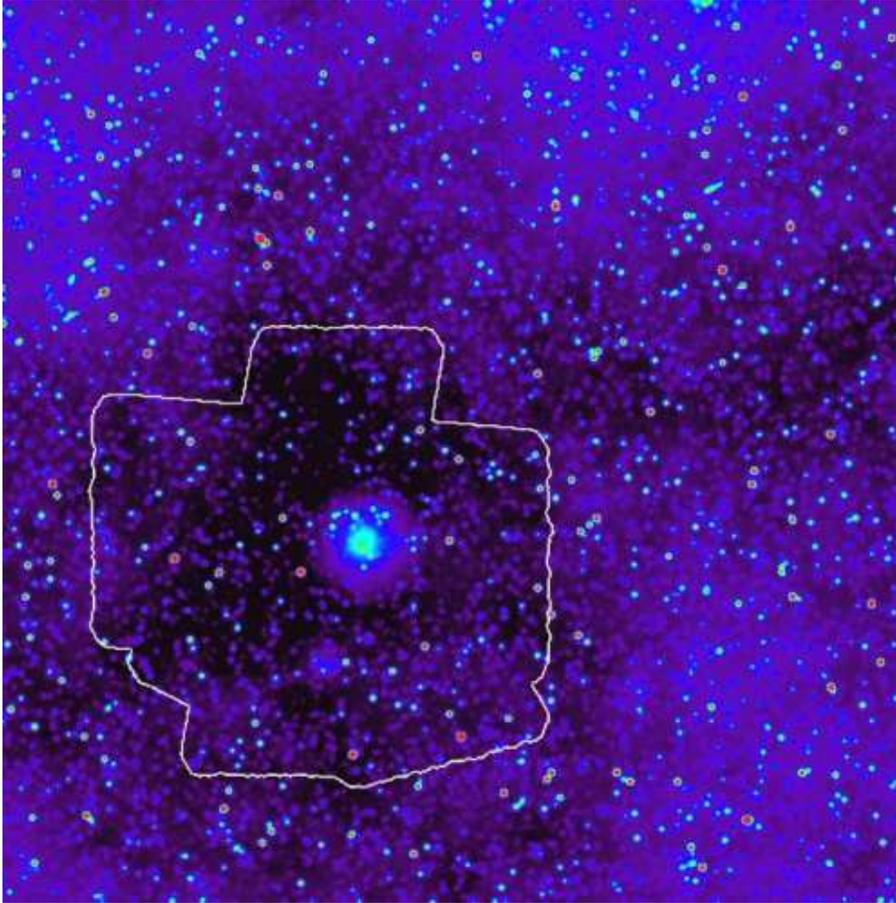


Figura 2.6: Simulación de la emisión de fuentes extragalácticas puntuales a 1.1 mm en un área de 0.5×0.5 grados cuadrados. La imagen incluye el incremento espectral producido por el efecto térmico Sunyaev-Zel'dovich en el cúmulo situado cerca del centro de la imagen (la fuente extendida con centro azul cielo), y el efecto del polvo de los cirros galácticos, cuya ausencia se pone de manifiesto en las zonas de la imagen con fondo oscuro. En una integración de 2 horas con AzTEC se podrían detectar más de 100 galaxias con fuertes brotes de formación estelar, como las encerradas en la región delimitada por la línea continua blanca y con apariencia puntual^[1].

galaxias^[6]. También se han encontrado corrimientos al rojo espectroscópicos para una fracción de galaxias milimétricas con contrapartidas en radio, ya que la interferometría en radio ayuda a refinar las posiciones de las fuentes y a identificar las contrapartidas ópticas e infrarrojas que pueden explorarse espectroscópicamente^[7]. La distribución de corrimientos al rojo fotométricos y espectroscópicos^[7,8] de galaxias milimétricas brillantes, indica que al menos el $\sim 60\%$ se encuentran entre $z = 1.8$ y 3.5 . Si se toma en cuenta la pequeña fracción ($\lesssim 10\%$) del fondo milimétrico que se explica con fuentes brillantes, es evidente, que necesitamos algún otro método para determinar los corrimientos al rojo de la población milimétrica que domina la emisión del fondo extragaláctico.

Las propiedades únicas del GTM y su instrumentación nos dan una solución de frontera al problema de la medida de corrimientos al rojo. Se ha demostrado que las galaxias milimétricas polvosas también contienen grandes reservas de gas molecular^[9], con masas de 10^{10} a $10^{11} M_{\odot}$, que alimentan la formación estelar. Dadas estas masas, el GTM tendrá la suficiente sensibilidad como para buscar a ciegas las transiciones rotacionales del monóxido de carbono (CO) en las galaxias identificadas en los censos del GTM.

Para desarrollar tal búsqueda, el GTM está construyendo un receptor de banda ancha que operará en la ventana de 90 GHz. Con una banda instantánea de 36 GHz, este receptor buscará líneas de CO corridas al rojo. Puesto que la separación entre las líneas de CO en reposo es de 115.27 GHz, la separación observada será igual a esta cantidad dividida por $(1 + z)$, y su detección dará una medida inequívoca de la distancia a las fuentes mi-

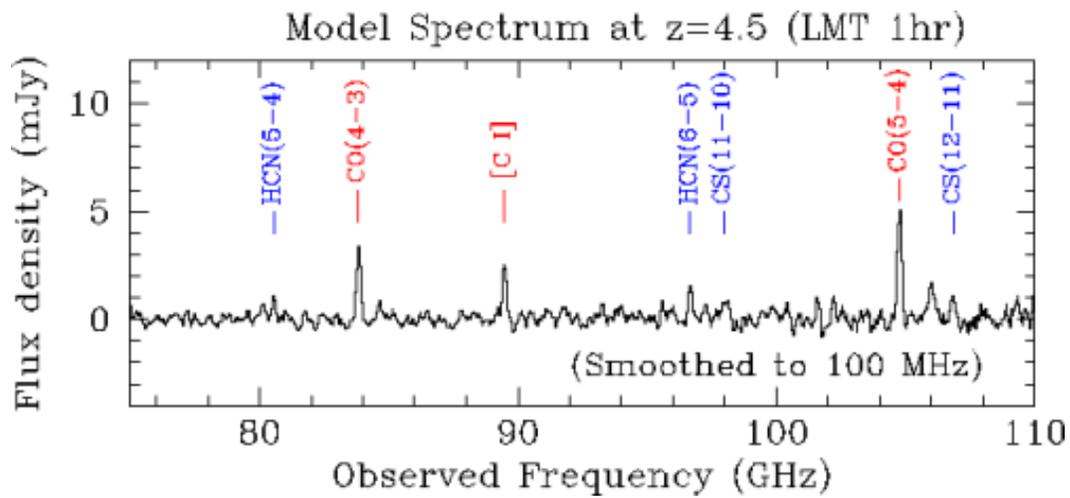


Figura 2.7: Espectro simulado de una galaxias milimétrica a $z = 4.5$ tras una hora de integración con el receptor de búsqueda de corrimientos al rojo del GTM, suponiendo una temperatura de 100 K. La densidad de flujo de las líneas de CO está basada en las intensidades medidas en el objeto cuasi-estelar BRI 1335–10417 a $z=4.4$. El brillo de las otras líneas está basado en el promedio de los cocientes de líneas observados en varias galaxias infrarrojas luminosas del Universo local. [Cortesía de M. Yun, UMass Amherst].

limétricas, sin la necesidad de buscar las contrapartidas en radio, el visible y el infrarrojo. Suponiendo que el GTM tenga la suficiente sensibilidad para detectar estas transiciones moleculares, podemos esperar encontrar al menos una línea en la banda del receptor, para cualquier galaxia, con la excepción de aquellas que se encuentren entre $z=0.4$ y 1.0 , donde ninguna de las líneas del CO están corridas lo suficiente como para entrar en la ventana del receptor. Por otra parte, las galaxias que se encuentren a estos bajos corrimientos al rojo deben de ser fácilmente reconocibles por su brillo a otras frecuencias, y por la emisión molecular de otras especies. La detección de una sola línea de CO no es suficiente para determinar el corrimiento al rojo, pero ayuda a constreñir la búsqueda de una segunda línea de CO. Alternativamente, para $z > 3.2$ tendremos o bien dos líneas de CO o una línea de CO y la línea de C I, y por lo tanto podremos determinar el corrimiento al rojo con una sola observación del GTM.

La espectroscopía de CO de fuentes individuales, acoplada a la distancia angular entre las fuentes censadas por el GTM, permitirá medir el agrupamiento espacial de las galaxias luminosas con brotes de formación estelar, sobre un gran intervalo de corrimientos al rojo y épocas cósmicas. Después de determinar el corrimiento al rojo de las galaxias, el GTM podrá usar sus receptores de banda más angosta para observar con mayor resolución espectral los perfiles de línea, y así derivar la velocidad de rotación del gas y, a partir de ésta, la masa dinámica. Los resultados condicionarán los modelos de formación de galaxias masivas a través de las cotas impuestas sobre la historia evolutiva de formación estelar de las galaxias.

2.3. Núcleos activos de galaxias a alto corrimiento al rojo

Los núcleos activos de galaxias más brillantes se manifiestan como radiofuentes luminosas u objetos cuasi-estelares a cualquier corrimiento al rojo. En muchos casos, sus galaxias anfitrionas contienen grandes cantidades de gas molecular y polvo^[10]. Por lo tanto, son excelentes ejemplos de galaxias en las que simultáneamente se exhibe actividad por acrecentamiento de hoyos negros, y por las altas tasas de formación estelar nuclear o circunnuclear.

Las imágenes visibles e infrarrojas de núcleos activos brillantes a bajo corrimiento al rojo ($z \lesssim 0.3$) demuestran que sus galaxias anfitrionas son elípticas masivas^[11]. Aunque a alto- z no hay suficiente resolución para confirmar la morfología de las galaxias anfitrionas, la luminosidad visible e infrarroja también es consistente con la de las galaxias elípticas de primer rango^[12].

Tanto las galaxias activas como las inactivas se ajustan a una estrecha correlación entre la masa contenida por su componente esferoidal y la masa de su hoyo negro supermasivo central^[13]. Este hecho apoya el concepto de que todas las galaxias, incluida la Vía Láctea, han experimentado una fase de actividad nuclear en algún momento de su evolución, posiblemente asociada con una época virulenta de formación estelar. Por lo tanto, las galaxias anfitrionas de los núcleos activos brillantes ofrecen la oportunidad de estudiar la conexión entre la formación y la evolución de los hoyos negros y la formación y evolución de las galaxias elípticas, o de forma más general, de los esferoides

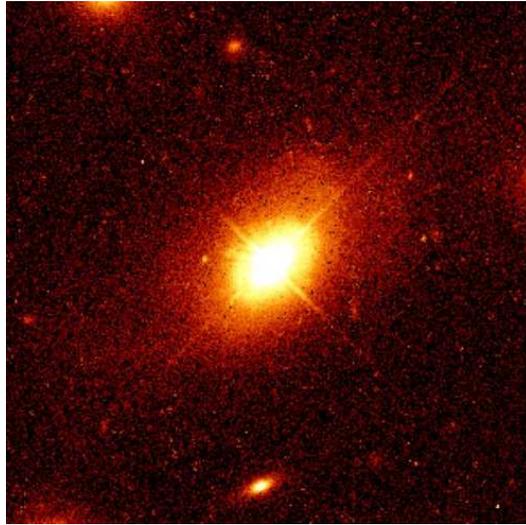


Figura 2.8: Imagen tomada con el Telescopio Espacial Hubble de un quasar a bajo- z . [Cortesía de J. Bachall (IAS), M. Disney (U. Wales) y NASA].

galácticos.

Con el GTM podremos estudiar la emisión sincrotrón no térmica de cuasares fuertemente radioemisores, radiogalaxias de espectro plano y blazares, y también la radiación térmica del polvo calentado por la formación estelar y el contenido molecular de las galaxias anfitrionas de los cuasares débilmente radioemisores y radiogalaxias de espectro empinado. Ya que el $\sim 90\%$ de los núcleos activos de galaxias son débilmente radioemisores, el GTM concentrará su empeño observacional en caracterizar el gas y el polvo de sus galaxias anfitrionas. Debido a la alta sensibilidad de detección de fuentes puntuales, y su alta velocidad de cartografía, se espera que los censos del GTM se dividan en dos programas: (*i*) fotometría y espectroscopía de una muestra no sesgada de unos 3000 núcleos activos de galaxias a todos los corrimientos al rojo; y

(ii) cartografía de los entornos de los núcleos activos a $1 \lesssim z \lesssim 7$.

2.3.1. Censos de la emisión de continuo y la emisión molecular

Las observaciones milimétricas y submilimétricas realizadas hasta la fecha en núcleos activos a $2 \lesssim z \lesssim 5$ han demostrado que las galaxias que los albergan son jóvenes, masivas y químicamente enriquecidas, habiendo generado $\sim 10^9 M_\odot$ de polvo en un periodo de tiempo que no excede uno o dos mil millones de años^[14]. El brillo de la emisión térmica implica tasas de formación estelar superiores a las $1000 M_\odot/\text{año}$. A $z \geq 6$ se ha establecido la presencia de masas similares en unos cuantos sistemas^[15]. A pesar de estos avances, los tiempos de exposición que se necesitan para garantizar detecciones con los telescopios actuales, limitan fuertemente las muestras de las que se dispone, y ya se han encontrado inconsistencias significativas entre los resultados obtenidos para las poblaciones de radiogalaxias y de cuasares débilmente radioemisores^[16]. Dadas las limitaciones en las muestras, todavía no es posible trazar la evolución de la función de masa de polvo de cuasares y radiogalaxias.

El GTM, en combinación con los instrumentos de continuo AzTEC y SPEED, permitirá la detección de masas más de 50 veces menores que las encontradas hasta el momento para grandes muestras de núcleos activos de galaxias. Por ejemplo, el GTM podrá comparar la evolución de la masa de polvo en submuestras de cuasares seleccionados por su luminosidad en rayos X o en el visible, tengan o no detecciones en el infrarrojo lejano, con

quasares débilmente radioemisores y fuentes fuertemente radioemisoras de espectro empinado. Todas estas muestras se compararán a su vez con muestras de control de galaxias elípticas pasivas e inactivas o galaxias espirales del Universo local. Dado el vasto espacio de corrimientos al rojo y potencias de actividad medidas a frecuencias de rayos-X, visibles o de radio, será posible comparar la evolución de las propiedades milimétricas de un número significativo de núcleos con tasas de acrecentamiento similares, minimizando los sesgos inducidos por el calentamiento de los granos de polvo, debido a la radiación proveniente del núcleo activo. De forma inversa, también será posible estudiar la misma muestra para considerar la dependencia de la luminosidad milimétrica con la radiación no térmica de acrecentamiento en diferentes épocas cósmicas, para así minimizar el impacto que la evolución pueda tener en cada una de las submuestras.

Se realizarán también estudios complementarios del contenido de gas molecular con SEQUOIA, con el buscador de corrimientos al rojo, y el receptor de 1 mm. Los datos obtenidos medirán las propiedades físicas del medio interestelar de las muestras de núcleos activos de galaxias, tales como la masa de gas molecular, la temperatura y densidad del gas y la masa dinámica, entre otras.

Las futuras observaciones del GTM se emplazarán en el contexto del esquema unificado de núcleos activos de galaxias, que argumenta que no existen diferencias intrínsecas entre las propiedades de los núcleos fuerte y débilmente radioemisores, excepto aquellas introducidas por un efecto de orientación, como el producido por la atenuación asimétrica. La ventaja de

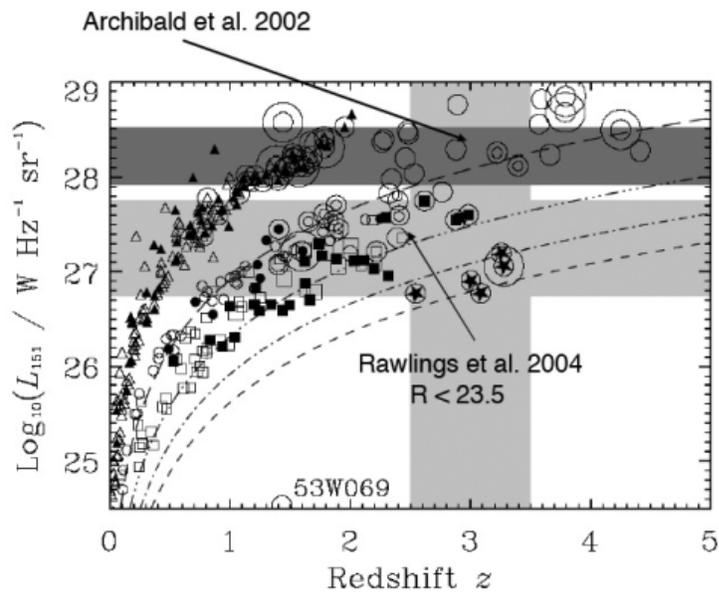


Figura 2.9: Luminosidad radio a 151 MHz como función del corrimiento al rojo de varios censos de radiogalaxias y cuasares. Las regiones sombreadas ilustran la posibilidad de seleccionar objetos en intervalos de luminosidad o corrimiento al rojo para estudiarlos con el GTM. [Cortesía de D.H. Hughes, INAOE, adaptado de [14, 17]].

realizar observaciones con el GTM descansa en que las ondas milimétricas no son sensibles a los efectos atenuantes del polvo de las galaxias anfitrionas. Por lo tanto, dichas observaciones no estarán afectadas por la orientación de las fuentes, y se podrán construir muestras detalladas de núcleos activos que presten evidencia o refuten el paradigma unificado.

2.3.2. El entorno de los núcleos activos de galaxias en ondas milimétricas

La detección de un fuerte agrupamiento de galaxias masivas es una de las predicciones del escenario jerárquico de la formación de estructuras. La distribución de las galaxias elípticas masivas a alto corrimiento al rojo, que se cree traza la distribución subyacente de materia oscura, ofrece una manera de cartografiar estas sobre-densidades. De ahí que el objetivo de muchos de los censos extragalácticos milimétricos y submilimétricos se centre en encontrar señales inequívocas de las fases intensas y cortas de formación estelar, mucho mayores que cientos de masas solares por año, asociadas con la erección de las galaxias elípticas y sus progenitores.

En vez de realizar censos sobre regiones sin sesgos, el GTM puede atacar campos en los que ya se espera encontrar un pico de sobre-densidad sobre la distribución de materia subyacente. Los núcleos activos de galaxias de alto- z marcan algunos de estos campos especiales donde ya se ha encontrado un exceso de galaxias de corte-Lyman y fuentes submilimétricas^[18]. La mayor parte de las galaxias masivas del Universo local son elípticas, y se encuentran principalmente en los cúmulos ricos de galaxias. Puesto que las

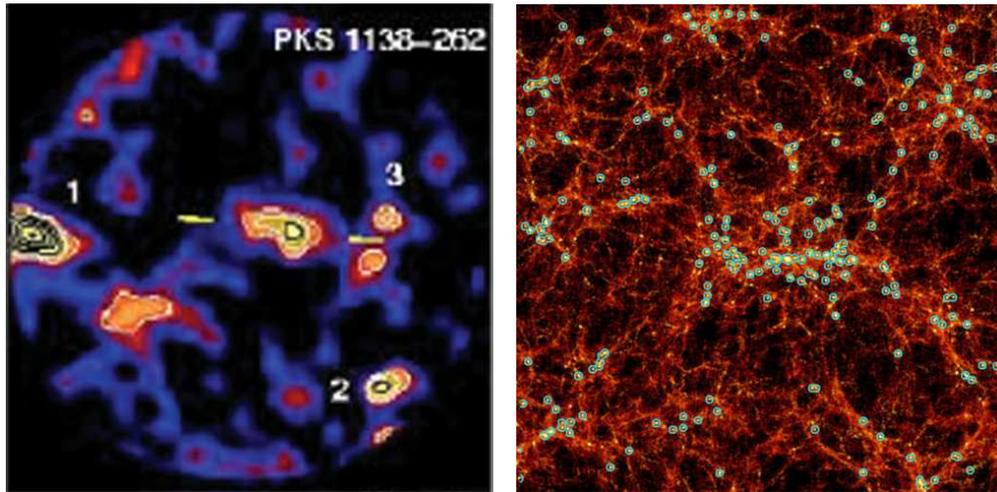


Figura 2.10: (a) Estructura alrededor de la radiogalaxia PKS1138–262, encontrada en un campo SCUBA^[18] de $\sim 2.3'$ de diámetro. Las galaxias detectadas parecen estar alineadas con la dirección del radio-chorro de la radiogalaxia, marcado por las dos líneas amarillas. (b) Simulación de un campo de $30' \times 30'$ alrededor del progenitor de un cúmulo rico de galaxias a $z = 3$ [Créditos: Governato, F. et al. ©*Nature Publishing Group*^[19]]. Los círculos marcan las posiciones de los halos de las galaxias más masivas, y se corresponden con aproximadamente el 60% del campo de SCUBA de la imagen (a). Los halos que se encuentran repartidos en el campo terminan dentro del radio virial del cúmulo central a $z = 0$. El GTM será capaz de cartografiar el área completa de un progenitor de cúmulo como éste con AzTEC, y trazar las estructuras filamentosas del protocúmulo a gran escala.

galaxias elípticas albergan todas las fuentes fuertemente radioemisoras que conocemos, las radiogalaxias de alto- z nos ofrecen la oportunidad de estudiar tanto la formación de sus galaxias elípticas, como las de sus entornos. También se espera que los cuasares débilmente radioemisores más luminosos se encuentren en galaxias elípticas masivas.

2.4. Detección de las anisotropías del fondo de radiación cósmica de microondas

El Observatorio del Fondo de Radiación Cósmica (COBE) demostró que este fondo es un cuerpo negro casi perfecto a 2.725 K, con fluctuaciones menores que los 80 μK sobre todo el cielo^[20]. Esta radiación es luz primordial proveniente de la superficie de la última dispersión, la época en la cual el Universo se enfrió a menos de la temperatura de ionización del hidrógeno, aproximadamente 380 mil años después de la Gran Explosión. Conforme los iones se recombinaron con los electrones del plasma caliente para formar átomos neutros, la radiación se desacopló de la materia y los fotones empezaron a viajar libremente, hasta que algunos de ellos fueron interceptados por los experimentos del fondo de radiación cósmica unos 13 mil millones de años más tarde.

Las fluctuaciones primordiales contienen información sobre las condiciones del Universo en el momento del desacoplamiento. Existen además fluctuaciones secundarias que se crean cuando los fotones se dispersan al interaccio-

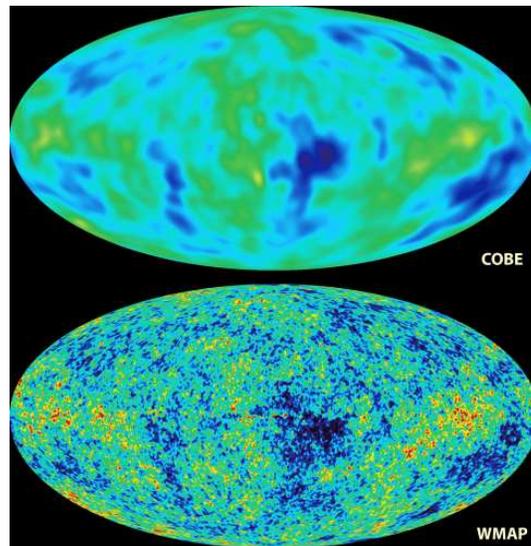


Figura 2.11: Comparación de los experimentos COBE y WMAP. Imagen de todo el cielo del Universo en su infancia, unos 380 mil años después de la Gran Explosión. La misión de la NASA COBE detectó por primera vez pequeñas fluctuaciones de temperatura, lo que representó un hito en la historia de la astronomía. La imagen de WMAP tiene mucha mejor resolución y es en base a estos datos que los parámetros cosmológicos se han constreñido recientemente hasta niveles sin precedentes. [Créditos: grupo científico de NASA/WMAP].

nar con los potenciales gravitacionales y las fuentes ionizantes en su camino hacia los observadores actuales. Se han realizado medidas de estas fluctuaciones en escalas grandes y pequeñas con telescopios a bordo de satélites y globos como COBE, WMAP, Maxima, Boomerang, y con interferómetros terrestres como CBI y ACBAR. El GTM puede llenar el hueco que existe entre las observaciones de estas dos clases de experimentos, debido a la gran resolución de 6 a 15 seg de arco entre 1.1 y 3 mm, y su gran sensibilidad de brillo superficial, como se muestra en la figura 2.12. Se espera que estas prestaciones del GTM se vean aún más reforzadas por la siguiente generación de cámaras de plano focal con campo de visión instantáneo.

2.4.1. Fluctuaciones primordiales del fondo de radiación cósmica

La teoría de la inflación predice que el plasma primordial tenía inhomogeneidades de densidad y presión que crecieron de acuerdo con el factor de escala del Universo. Estas ondas acústicas produjeron pequeñas variaciones de temperatura que se observaron más tarde como fluctuaciones primordiales del fondo de radiación cósmica congeladas sobre la superficie de última dispersión, en la época del desacoplamiento. Mientras que el satélite WMAP^[22] ha medido de forma precisa tales fluctuaciones en todo el cielo hasta escalas angulares $l \sim 600$ (ó 0.2 grados), el GTM podrá medir las fluctuaciones en un intervalo amplio de pequeños factores de escala $300 < l < 3000$ (desde 0.4 a 0.04 grados) en un plazo de tiempo razonable. Los resultados mejorarán la precisión de los datos de alto- l proveniente de los interferómetros ACBAR y CBI, ya que el GTM podrá cartografiar áreas más grandes del cielo. Las

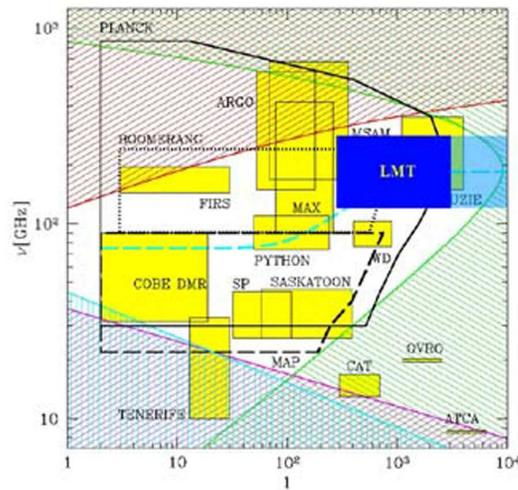


Figura 2.12: Sensibilidad de los telescopios utilizados en el estudio del fondo de radiación cósmica, como función de su escala angular ($l \sim 120/\text{deg}$) y frecuencia observada. La región azul opaca representa los límites prácticos impuestos por la primera generación de instrumentos del GTM. La región azul transparente indica el espacio de parámetros disponible para la segunda generación de cámaras bolométricas con más de 1000 píxeles, dada la resolución espacial impuesta por la apertura de 50m^[21].

escalas que se superponen a las medidas de WMAP proveen de una importante calibración. La señal de más alta frecuencia acústica y la pendiente del corte de alto- l se medirán de forma precisa en este régimen, y permitirán constreñir los parámetros cosmológicos. Las escalas pequeñas del espectro de potencias pueden usarse para evaluar la forma y la naturaleza gaussiana de las fluctuaciones de densidad, que son una prueba de la teoría de inflación, y también pueden estimar la época en la que se produjo la reionización del Universo temprano por la formación de las primeras estrellas y núcleos activos de galaxias.

2.4.2. Fluctuaciones secundarias del fondo de radiación cósmica debidas al efecto Sunyaev-Zel'dovich

Hay un número de mecanismos que se pueden invocar para producir dispersión de los fotones primordiales del fondo de radiación cósmica, incluyendo el amortiguamiento por plasma, los potenciales gravitatorios no estacionarios como los producidos en los flujos de gran escala, o la amplificación gravitacional. La fuente dominante de fluctuaciones secundarias del fondo de radiación es la ionización local de cúmulos de galaxias, y será detectada por el GTM.

El plasma del medio intergaláctico, dentro de los cúmulos de galaxias, interactúa con los fotones del fondo de radiación a través de la dispersión inversa de Compton, donde los electrones calientes producen dispersión de fotones de baja energía hacia energías mayores. Este efecto térmico Sunyaev-Zel'dovich (S-Z) distorsiona el espectro milimétrico en la vecindad de los cúmulos, produciendo un decremento máximo sobre el fondo de radiación a

2.3 mm, un incremento máximo a 0.85 mm y ninguna señal a 1.4 mm. El GTM podrá explotar este efecto para identificar cúmulos distantes y utilizar su resolución espacial para separarlos de galaxias cuasi-puntuales y de los cirros galácticos con espectro similar^[23]. La amplitud del efecto S-Z está gobernada por el parámetro de ionización de Compton y por la temperatura de los electrones. Las medidas del efecto S-Z, que el GTM tomará en ondas milimétricas, se combinarán con observaciones en rayos-X para estimar la masa de los cúmulos, que es un parámetro físico relevante. La cartografía y espectroscopía visible e infrarroja de las galaxias asociadas con los cúmulos, darán los corrimientos al rojo y las dispersiones de velocidades. Esta información impondrá cotas al crecimiento de las estructuras.

Además, ya que el Universo es transparente en ondas milimétricas, y la intensidad del efecto S-Z es simplemente la distorsión del fondo de radiación cósmica, ésta es independiente del corrimiento al rojo al que ocurre, y los censos S-Z están libres de sesgos de distancia. La búsqueda del efecto S-Z será indispensable para estudiar la formación y evolución de las grandes estructuras a cualquier época.

2.5. Estallidos de rayos gamma

Los estallidos de rayos gamma fueron descubiertos a principio de los años 70 por satélites militares que estudiaban el efecto de las explosiones nucleares en la atmósfera terrestre. Sólo una vez que se estableció el origen extraterrestre de estos sucesos, el descubrimiento se hizo público^[24]. Se pueden observar con instrumentos que detectan fotones de alta energía (rayos-X y

rayos-gamma) operados desde satélites para evitar la absorción de la atmósfera terrestre. Los estallidos de rayos gamma están repartidos sin patrón alguno en el cielo, y deslumbran cualquier otra fuente celeste de alta energía por periodos cortos de tiempo: su duración puede ser tan corta como una décima de segundo, y tan larga como unos pocos minutos. Con la excepción de los eventos llamados repetidores blandos de rayos-gamma, dichos estallidos no ocurren dos veces en la misma posición del cielo y, puesto que hasta muy recientemente los telescopios que los podían detectar tenían una pobre resolución espacial, su origen ha sido un gran misterio por más de dos décadas.

El instrumento BATSE, del Observatorio Compton de Rayos-Gamma, se diseñó para detectar un gran número de estallidos de rayos gamma, con la idea de buscar pistas sobre su origen. BATSE detectó aproximadamente un estallido al día, mostrando una distribución uniforme en el cielo, lo que implicaba un origen extragaláctico^[25]. La fuente de energía que originalmente se inferió para estos objetos era 100 veces más luminosa que la de una supernova. Sin embargo, más recientemente se ha recabado evidencia que señala que los estallidos de rayos gamma son explosiones en las que se producen eyecciones de materia en chorros altamente colimados, con velocidades cercanas a la velocidad de la luz^[26]. Por lo tanto, si la materia se eyecta en haces colimados, la energía total de la explosión es mucho más pequeña que si la materia se expulsara isotrópicamente.

A finales de 1990, la misión italiana de rayos-X Beppo-SAX mostró que los estallidos gamma de larga duración, los que duran más de dos segundos, se acompañaban de emisión en rayos-X de larga duración, aunque de más baja

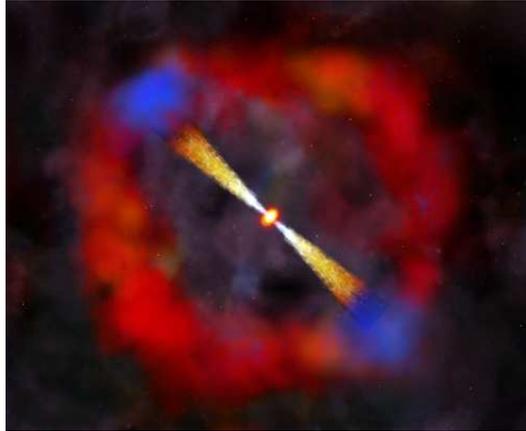


Figura 2.13: Concepción artística de un estallido de rayos gamma, donde los chorros de partículas de alta energía son emitidos por un hoyo negro en el centro del caparazón de una supernova. [Créditos: CXC/M. Weiss].

intensidad^[27]. Estos crepúsculos de rayos X duran varias horas, e incluso unos pocos días, lo que permite la localización del estallido de rayos gamma en el cielo de forma más precisa a través de telescopios cartográficos de rayos-X de baja energía. Las posiciones refinadas permitieron observaciones de seguimiento más detalladas con telescopios ópticos y radio, lo que mostró que estos estallidos ocurrían en galaxias normales hasta distancias muy altas^[28]. Se observó que unos pocos estallidos de rayos gamma tomaban características de supernova, probando que éstos son el inicio de uno de los tipos de supernova^[29]. Hoy en día, se cree que la mayoría de las supernovas explotan isotrópicamente, eyectando materia de la estrella progenitora en todas las direcciones a velocidades de unos diez mil km/s, mientras que los estallidos de rayos gamma eyectan la materia unas 30 veces más rápidamente a gran distancia en dos haces simétricos. Lo anterior es consistente con el hecho de

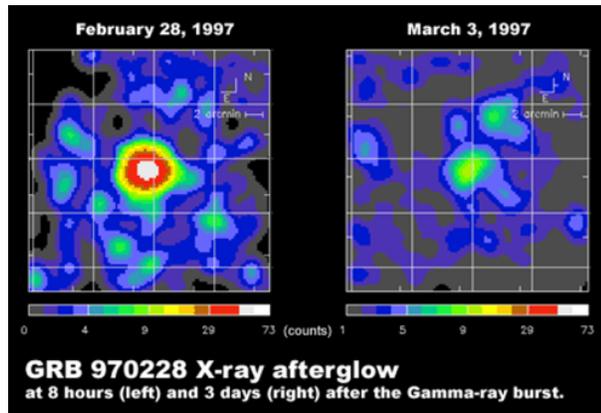


Figura 2.14: El primer crepúsculo en rayos-X detectado por BeppoSAX, GRB 970228. El cuadro de la izquierda muestra el crepúsculo 8 horas después de que el estallido de rayos gamma fuera detectado, y el cuadro de la izquierda muestra el crepúsculo 3 días más tarde. Las escalas espaciales y de brillo son las mismas para los dos cuadros. [Cortesía de E. Costa et al. ©*Nature Publishing Group*^[27]].

que los estallidos de rayos gamma se hayan detectado a grandes distancias. De hecho, se podrían convertir en sondas del Universo temprano, ya que se pueden detectar a grandes distancias si los observadores están alineados con el haz del estallido.

Puesto que las supernovas y los estallidos de rayos gamma marcan la muerte de estrellas masivas, sus posiciones dan información sobre la situación de regiones de formación estelar, ya que las estrellas masivas tienen vidas unas mil veces más cortas que estrellas como el Sol. Los estallidos de rayos gamma nos podrían llevar a los primeros sitios donde ocurrió la formación estelar en el Universo. Una vez que la posición del estallido se conoce, los telescopios más poderosos de la Tierra pueden observar y estudiar sus galaxias anfitrionas.

En vista de que la mayor parte de la formación estelar está embebida en entornos polvosos, se trata de uno de los objetivos prioritarios del GTM.

Las cuestiones científicas que se quieren resolver sobre los progenitores de los estallidos de rayos gamma son la naturaleza de las galaxias anfitrionas y su utilización como trazadores de la formación estelar a alto- z , ya que podrían ser detectados hasta $z \sim 15$. El GTM operará simultáneamente con dos misiones de alta energía, que detectarán y localizarán apropiadamente una gran muestra de estallidos de rayos gamma: Swift, que se lanzó en noviembre del 2004, y GLAST, que será lanzado en febrero del 2007. El campo de visión de estos observatorios espaciales cubre entre el 10 y el 20 % del cielo, permitiendo descubrir en promedio un estallido cada dos o tres días. Swift y GLAST darán posiciones con precisiones de unos pocos minutos de arco, comparables con el campo de visión del GTM. Las detecciones marginales de galaxias anfitrionas de estallidos de rayos gamma en ondas milimétricas y submilimétricas con las que se cuenta hasta el momento ponen de manifiesto que el GTM será capaz de detectar decenas de galaxias anfitrionas al año, a un nivel de unos pocos mJy a 0.85 mm y 1.2 mm. Las observaciones con el telescopio de 30 m del IRAM de GRB-991208 permitieron datar cuándo el material eyectado se volvió transparente a los fotones milimétricos, y se pudo seguir la rápida evolución del crepúsculo y constreñir los modelos existentes^[30]. El GTM podrá obtener exposiciones más profundas de los crepúsculos de los estallidos de rayos gamma, permitiendo entender las interacciones entre el material eyectado de alta velocidad y su entorno local.

Referencias

- [1] Chapin, E.L. (2004), “Constraining the History of High-Redshift Dust-Enshrouded Star-Formation with Balloon-Borne and Ground-Based Sub-Millimetre Surveys”, Tesis Doctoral, INAOE, México.

- [2] Smail, I. et al. (1997), “A Deep Sub-millimeter Survey of Lensing Clusters: A New Window on Galaxy Formation and Evolution”, *Astrophys. J.*, 490, L5.

- [3] Hughes, D.H. et al. (1998), “High-redshift star formation in the Hubble Deep Field revealed by a submillimetre-wavelength survey”, *Nature*, 394, 241.

- [4] Hughes, D.H. y Aretxaga, I. (2005), “Understanding the History of Obscured Star Formation in the High-redshift with Coordinated GTC and LMT Surveys”, en “II International Workshop on Science with the GTC: Science with GTC 1st-light Instruments and the LMT”, eds. J.J. González y J.M. Rodríguez-Espinosa, *Rev. Mex. Astron. Astroph. (Ser. Conf.)*, en prensa.

- [5] Adaptada de Hughes, D.H. et al. (2005), “Resolving the FIR-Submillimetre Extragalactic Background from Dome C, Anctartica”, en “Dome C Astronomy/Astrophysics Meeting”, EAS Publ. Ser., en prensa.
- [6] e.g. Yun, M.S. y Carilli, C.L. (2002), “Radio-to-Far-Infrared Spectral Energy Distribution and Photometric Redshifts for Dusty Starburst Galaxies”, *Astrophys. J.*, 568, 88.
- [7] Chapman, S.C. et al. (2003), “A median redshift of 2.4 for galaxies bright at submillimetre wavelengths”, *Nature*, 422, 695.
- [8] Aretxaga, I. et al. (2003), “Breaking the ‘redshift deadlock’- II. The redshift distribution for the submillimetre population of galaxies”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 342, 759.
- [9] Greve, T.R. et al. (2005), “An interferometric CO survey of luminous submillimetre galaxies”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 359, 1165.
- [10] Hughes, D.H. et al. (1993), “Thermal Dust Emission from Quasars - Part One - Submillimetre Spectral Indices of Radio Quiet Quasars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 263, 607.
- [11] Dunlop, J.S. et al. (1993), “Infrared Imaging of the Host Galaxies of Radio-Loud and Radio-Quiet Quasars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 264, 455.
- [12] e.g. Aretxaga, I. et al. (1998), “Multicolour imaging of $z=2$ QSO hosts”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 296, 643.

- [13] Gebhardt, K. et al. (2000), “Black Hole Mass Estimates from Reverberation Mapping and from Spatially Resolved Kinematics”, *Astrophys. J. Lett.*, 543, L5.
- [14] Archibald, E.N. et al. (2002), “Coupled spheroid and black hole formation, and the multifrequency detectability of active galactic nuclei and submillimeter sources”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 336, 353.
- [15] Robson, I. et al. (2004), “Submillimetre observations of $z > 6$ quasars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 351, L29.
- [16] Priddey, R.S. et al. (2003), “The SCUBA Bright Quasar Survey (SBQS) - II. Unravelling the quasar epoch at submillimetre wavelengths”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 339, 1183.
- [17] Rawlings, S. et al. (2004), “Submillimetre photometry of typical high-redshift radio quasars”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 351, 696.
- [18] Stevens, J.A. et al. (2003), “Sub-mm Imaging of Distant Radio Galaxies: Witnessing the Formation of Massive Cluster Ellipticals”, *Nature*, 425, 264.
- [19] Governato, F. et al. (1998), “The seeds of rich galaxy clusters in the Universe”, *Nature*, 392, 359.
- [20] Smooth, G.F. et al. (1992), “Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps”, *Astrophys. J.*, 396, L1.
- [21] Montana, A. (2002), “Fluctuations and Anisotropies in the Cosmic Microwave Background”, Tesis de Maestría, INAOE, México.

- [22] Bennett, C.L. et al. (2003), “First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results”, *Astrophys. J. Suppl.*, 148, 1.
- [23] Aragón Calvo, M. A. (2002), “Simulations of the Sunyaev-Zel’dovich Effect, and their Application to Future Millimetre-Wavelength Experiments”, Tesis de Maestría, INAOE, México.
- [24] Klebesadel, R.W. et al. (1973), “Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin”, *Astrophys. J.* 182, L85.
- [25] Briggs, M.S., et al. (1996), “BATSE Observations of the Large-Scale Isotropy of Gamma-Ray Bursts”, *Astrophys. J.*, 495, 40.
- [26] Rees, M.J. y Mészáros, P. (1992), “Relativistic fireballs - Energy conversion and time-scales”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 258, 41.
- [27] Costa, E. et al. (1997), “Discovery of an X-ray afterglow associated with the gamma-ray burst of 28 February 1997”, *Nature*, 387, 783.
- [28] Kulkarni, S.R. et al. (1998), “Identification of a host galaxy at redshift $z = 3.42$ for the gamma-ray burst of 14 December 1997”, *Nature*, 393, 55.
- [29] Mészáros, P. (2003), “Gamma-ray bursts: The supernova connection”, *Nature*, 423, 809.
- [30] Galama, T.J. et al. (2000), “The Bright Gamma-Ray Burst 991208: Tight Constrains on Afterglow Models from Observations of the Early-Time Radio Evolution”, *Astrophys. J.*, 541, L45.