

RADIOASTRONOMÍA Y RADIOGALAXIAS

Deborah Dultzin Kessler

1. RADIOTELESCOPIOS

Poco después de la gran depresión, que golpeó a los Estados Unidos a principios de los años treinta, y en buena parte por el desarrollo de las técnicas del radar durante la primera Guerra Mundial, los astrónomos norteamericanos lograron echar el primer vistazo al cielo por medio de ondas de radio: iver con radiación invisible!

Situado en los vastos campos plantados de papas de Nueva Jersey, el primer radiotelescopio era un instrumento extraño, en nada parecido a los telescopios ópticos; pero su operación marcó una nueva época en la astronomía, comparable a la marcada por Galileo cuando, por vez primera, utilizó su pequeño telescopio para ver el cielo.

En realidad, ya antes se habían detectado ondas de radio del espacio, aunque no con un radiotelescopio. La compañía de teléfonos Bell estudiaba las fuentes de "estática" (ruido) que interferían las comunicaciones de los barcos con las estaciones de tierra, y encomendó al joven ingeniero Karl Jansky la investigación. Jansky diseñó una antena que podía distinguir la dirección de la que provenía la estática. Después de un año, logró distinguir entre tormentas eléctricas locales o distantes y estática de fondo proveniente del espacio. Ahora sabemos que lo que Jansky detectaba eran ondas de radio generadas en el gas de la Vía Láctea.

Con frecuencia se dice que los radioastrónomos "escuchan" el cielo. Aunque los pioneros, como Jansky, efectivamente escuchaban, hoy día los radioastrónomos utilizan sus radiotelescopios más como ojos que como oídos. La señal es captada de manera similar a lo que hace un radio ordinario. Las señales llegan a nuestro radio de una gran cantidad de estaciones radioemisoras que radian en todas direcciones y a diversas longitudes de onda (frecuencia). Nosotros sintonizamos nuestros receptores a la longitud de onda que deseamos y el aparato extrae el mensaje de voces o música superpuesto a las ondas de radio, que escuchamos mediante una bocina.

Un radiotelescopio es una versión compleja de un radorreceptor, pero no está conectado a una bocina. Los emisores (radiofuentes) naturales del Universo emiten tan sólo una cacofonía de silbidos y ruidos. El "oír" no nos dará ninguna información sobre la forma o el tamaño del emisor. Para obtener esta información necesitamos una *radioimagen*, que es lo que proporciona el radiotelescopio. Para obtener estas radioimágenes, los astrónomos se cuidan de no operar sus radiotelescopios a longitudes de

onda en que se realizan transmisiones sobre la Tierra que puedan interferir con las débiles señales del espacio. De otro modo, sería como tratar de ver las estrellas de día. Existen convenciones internacionales sobre ciertas longitudes de onda destinadas a la radioastronomía. Nadie puede transmitir en estas longitudes de onda, de manera que los radiotelescopios pueden escudriñar el Universo sin el "resplandor" de los transmisores terrestres.

Existen asimismo ciertas limitaciones atmosféricas a las longitudes de onda que podemos detectar (Figura 13). Las longitudes de onda mayores a 30 m son rebotadas de regreso al espacio por la ionosfera. En el otro extremo, están las longitudes de onda cortas, alrededor de 1 mm, que se mezclan con el lejano infrarrojo. La frontera exacta entre ambos se define en la práctica por el tipo de detector que se utiliza. Si se trata de un radiotelescopio, se hablará de *ondas de radio* —milimétricas o submilimétricas— y si se trata de un detector infrarrojo se hablará del *lejano infrarrojo*. El vapor de agua existente en la atmósfera absorbe radiación a estas longitudes de onda; por ello, los radiotelescopios milimétricos no pueden estar a nivel del mar ni en lugares húmedos.

Como ya señalamos, un radiotelescopio funciona de manera similar a un radio. El receptor es una antena, con frecuencia colocada sobre una superficie parabólica —llamada *plato*— que sirve, como el espejo parabólico de los grandes telescopios, para colectar y enfocar la radiación (Figura 21). En estos casos, la antena receptora se coloca en el foco de la parábola. Sin embargo, no todos los radiotelescopios tienen esta forma. La energía de la radiación recibida es transformada en una señal eléctrica que se manifiesta bajo la forma de una débil fluctuación de voltaje. Esta pasa por una serie de amplificadores, que la amplifican hasta miles de millones de veces. Finalmente, una computadora recibe las señales y las almacena. Para poder construir una radioimagen, el radiotelescopio barre la fuente para obtener la intensidad de la señal punto a punto. La computadora puede desplegar la información bajo la forma de un *radiomapa* o una *radiofoto*. El radiomapa consiste de varios niveles de intensidad representados por líneas de contorno. Una fuente aislada aparece como una serie de círculos concéntricos, el menor y más interior de los cuales marca la mayor intensidad (Figura 22). Puede lograrse una forma más directa de "ver" la radioimagen utilizando una pantalla de televisión. Se pueden usar técnicas de *falso color* mediante las cuales la computadora asigna un código de colores a las diversas intensidades. De esta forma, podemos obtener radiofotos en color.

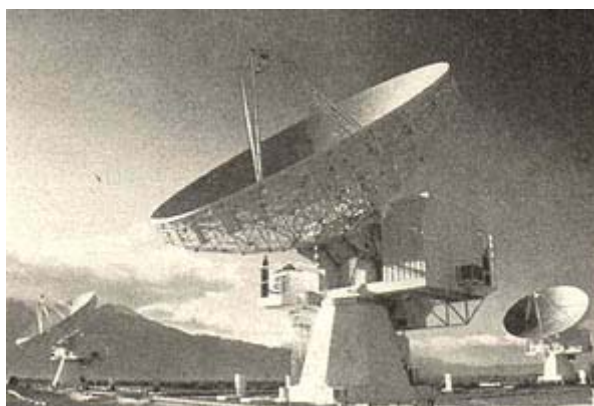


Figura 21. Radiotelescopio

El problema de la resolución representó desde un principio un dolor de cabeza para los radioastrónomos. La resolución, que tiene que ver con el grado de detalle con que un telescopio puede revelar, depende del diámetro de la superficie colectora de la radiación —lente, espejo o plato— relativo a la longitud de onda de dicha radiación.

Si la superficie colectora es grande comparada con la longitud de onda, la resolución será buena. Las ondas de luz visible tienen longitudes de onda de cienmilésimas de centímetro (mucho más pequeña que las dimensiones de la superficie colectora), por lo que el poder de resolución de un telescopio óptico siempre es grande (aumenta con la superficie colectora). Aun el ojo —cuya superficie colectora de luz es la lente formada por el cristalino— tiene alto poder de resolución. Sin embargo, las ondas de radio tienen longitudes de onda casi un millón de veces mayores que la luz visible, así que, para poder resolver un detalle parecido al que nos dan los telescopios ópticos, los radiotelescopios debieran ser un millón de veces mayores! Esto es a todas luces imposible. El telescopio de plato más grande del mundo, situado en Effelsberg, Alemania Federal, observa a longitudes de onda de 11 cm y el diámetro de su plato es de 100 m. Su poder de resolución es menor al del ojo humano. Las dimensiones de este plato representan el límite tecnológico razonable. La construcción y manipulación de platos mayores representa un problema ingenieril insorteable.

Se han encontrado, sin embargo, alternativas. Una de ellas ha sido la construcción de un plato apoyado y fijo en la tierra, construido aprovechando una depresión natural del terreno en un valle de Puerto Rico; este es el radiotelescopio de Arecibo, cuyo plato mide 330 m de diámetro. La antena ha sido colgada por cables fijos a las montañas circundantes y se encuentra a una altura de 130 m sobre el plato (Figura 23). Este gigante es capaz de ver casi con el mismo detalle que el ojo.

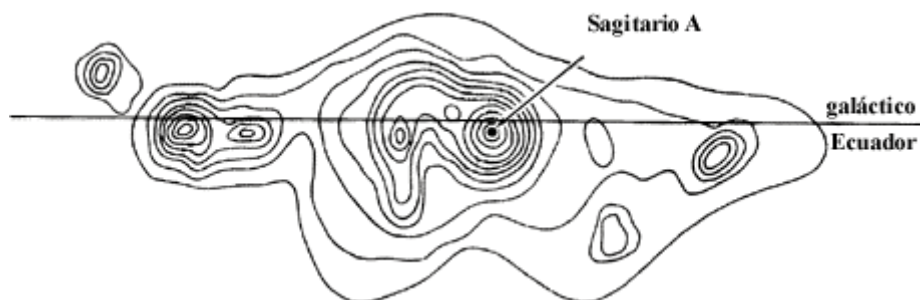


Figura 22. Mapa de radio del centro de la galaxia. Los contornos son curvas que unen puntos de igual intensidad de emisión.



Figura 23. Radiotelescopio de Arecibo, Puerto Rico.

El radiotelescopio más grande del mundo parece más un estadio de fútbol que un telescopio. Está también fijo en tierra y tiene la forma de un aro de 500 m de diámetro. La superficie curva es la orilla de una parábola (Figura 24). Se encuentra en las montañas del Cáucaso, en la Unión Soviética, y su resolución es tres veces mayor que la de Arecibo. Sin embargo, está aún muy por debajo de la resolución de un telescopio óptico pequeño.



Figura 24. Radiotelescopio RATAN, el más grande del mundo. Se encuentra en el Cáucaso, URSS

2. RADIOINTERFEROMETRÍA

El problema de la baja resolución llevó a los radioastrónomos a aguzar el ingenio a fin de encontrar una solución. El pionero fue Martin Ryle, de Cambridge, en la década de 1960. En esa época se desarrollaron los radiotelescopios llamados de *síntesis*, que ensamblan dos radiotelescopios pequeños y utilizan una computadora potente así como la circunstancia de la rotación de la Tierra sobre su eje. El principio de operación es la *interferometría*, que se basa en lo siguiente: cualquier espejo forma una imagen en el foco donde converge la radiación reflejada por cada parte de su superficie, de tal modo que las ondas "interfieren" una con otra; la cresta

de una, puede ser reforzada por la coincidencia con la cresta de otra, o amortiguada por el valle de otra (Figura 25).

Haciendo uso de este principio se puede crear el efecto de un enorme espejo mediante la utilización de dos pequeños. Mantenemos uno fijo en el centro y movemos el otro circunferencialmente a posiciones sucesivas, hasta cubrir así el área de un gran espejo imaginario que estamos sintetizando. En cada posición del espejo móvil, una computadora registra la imagen en el foco y, eventualmente, todas las imágenes pueden combinarse a fin de obtener la que daría el gran espejo imaginario —o sintetizado— cuya área se ha barrido. Desafortunadamente esta técnica no puede emplearse para la luz visible —es decir, para sintetizar grandes espejos de telescopios ópticos— pero sí para ondas de radio. La razón es que, para construir la imagen global, hay que seguir en detalle las fases de cada imagen —las formas de las ondas en cada punto del espejo— y sumarlas correctamente. La longitud de onda de la luz visible es tan pequeña que esto resulta imposible con la tecnología actual. Las ondas de radio, en cambio, tienen una longitud de onda suficientemente grande como para registrar las fases con precisión electrónicamente. Además, los dos radiotelescopios no tienen que reflejar realmente la imagen a un foco mutuo distante. Esto se hace también electrónicamente; la salida de cada plato es una señal eléctrica y éstas pueden sumarse para simular la combinación de las radioondas en el foco.

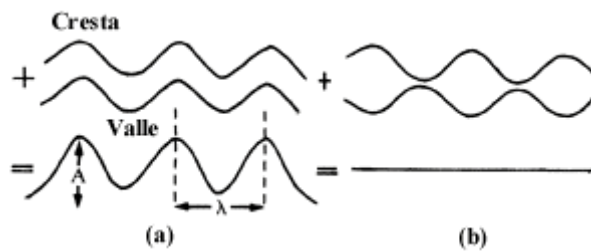


Figura 25. Ondas "A" es la amplitud y λ la longitud de onda. Cuando hay interferencia de dos o más ondas, las amplitudes se suman. En el caso (a) la interferencia es positiva o constructiva, en el (b) es negativa o destructiva.

De esta manera, se puede sintetizar un gran plato con dos pequeños, conectados entre sí, y una técnica electrónica bastante complicada. El problema práctico de mover continuamente uno de los radiotelescopios, cubriendo el área del plato imaginario, se resuelve valiéndose de la rotación de la Tierra. Imaginemos que miramos hacia la Tierra desde una radiofuente sobre el Polo Norte. Al girar la Tierra, la posición relativa de dos radiotelescopios se modifica. Vistos desde la posición sobre el Polo Norte, veremos que si consideramos uno de los telescopios fijo, el otro describe un semiarco a su alrededor. Para la siguiente rotación terrestre se acerca ligeramente el segundo espejo; éste describirá entonces un semiarco menor y así sucesivamente, hasta, sintetizar el área de un semicírculo (Figura 26). La información del *semiplato* faltante puede ser reconstruida por la computadora a partir de la existente, en forma automática. Mediante dicha técnica, se puede suministrar a la computadora la información que generaría un gran plato cuyo diámetro sería igual a la máxima separación entre los dos platos pequeños.

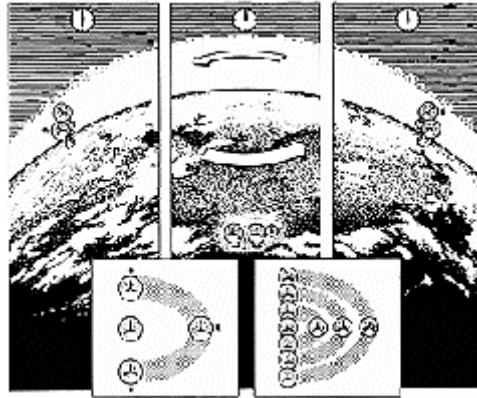


Figura 26. Radiotelescopio de síntesis. Vistos desde una posición sobre el polo, al girar la Tierra uno de los radiotelescopios (marcado con un asterisco) describe un arco alrededor del otro (considerado fijo). Después de cada rotación se van acercando hasta sintetizar el área de un semicírculo.

El primer telescopio de síntesis que se construyó tenía 1.6 km de largo y fue seguido por otro de 5 km, en 1972. En la actualidad existen varios de ellos. Los primeros radiotelescopios de este tipo que se construyeron tenían problemas para observar objetos lejos del Polo Norte celeste. En tal caso, el plato sintetizado resultaba oval y no circular, lo que introducía una distorsión en la imagen, sobre todo en la dirección Norte-Sur. Para objetos cercanos al ecuador celeste la distorsión es extrema. La solución fue incluir más de dos platos, unos alineados Este-Oeste y otros Norte-Sur. De esta manera se reducen al mínimo las distorsiones y la computadora puede eliminarlas.

El más ambicioso arreglo de este tipo es el VLA,¹ situado en el desierto de Socorro, en Nuevo México, y consta de 27 platos de 25 metros de diámetro cada uno. Los platos se pueden mover sobre los brazos de unos rieles en forma de Y. El arreglo sintetiza un plato de 25 km de diámetro. Al observar en la menor de sus longitudes de onda, 1.3 cm, el VLA resuelve detalles de 0.13 segundos de arco, una resolución mil veces mejor que el ojo y casi diez veces mejor que el mayor telescopio óptico.

En este tipo de arreglos, los platos están conectados entre sí electrónicamente, mediante cables subterráneos, a una computadora que se encuentra en el edificio de control. No es factible construir arreglos más grandes conectados entre sí de este modo. Sin embargo, se pueden hacer arreglos mayores si la señal de cada plato se transmite por un radiotransmisor ordinario al centro del control. Existe un arreglo de 133 kilómetros que funciona así, ligando varios platos en diversos puntos de Inglaterra, llamado MERLIN². El más ambicioso de todos los radiointerferómetros es VLBI³, que es un arreglo transcontinental. Los astrónomos de varios países del mundo se ponen de acuerdo para observar simultáneamente una radiofuente: registran las señales junto con las de un reloj atómico, que sincroniza el tiempo con una precisión extrema y se guardan los datos en cintas magnéticas que después se hacen llegar a un centro común. En la época en que la "guerra fría" se suavizó un poco, participaban en el proyecto el radiotelescopio de Crimea en la URSS y el de Virginia del Oeste, en Estados Unidos, con lo que el diámetro efectivo era prácticamente el diámetro de la Tierra; desafortunadamente, la colaboración se ha interrumpido. El VLBI puede resolver detalles de 0.0001 segundos de arco (o determinar posiciones con esa precisión). Pero ahora

cabe preguntarse ¿qué se ha logrado descubrir con toda esta nueva tecnología radioastronómica?

Las estrellas son cuerpos luminosos que emiten casi toda su energía en el intervalo de luz visible (las muy calientes en el ultravioleta y las muy frías en el infrarrojo). Su radiación a longitudes de onda de radio es despreciable. Sin embargo, existen otros objetos y procesos cósmicos que se manifiestan por su emisión de radio: uno de ellos es la radiación del hidrógeno frío — neutro— que es el principal constituyente del medio interestelar. El hidrógeno neutro emite una radiación característica a 21 cm y, gracias a la observación de esta radiación, se logró delinear por primera vez la estructura espiral de nuestra galaxia. También emiten en radio las moléculas del espacio interestelar: agua, monóxido de carbono, amoníaco, etc. El estudio de las nubes moleculares ha contribuido también a comprender la estructura de nuestra galaxia —así como otros problemas, como la formación estelar.

Cuando una estrella explota, se convierte en lo que se conoce como una supernova. En el proceso de explosión son arrojadas grandes cantidades de gas al espacio. Este material, sujeto a violentos choques, produce una fuerte emisión de radio, muy distinta a las antes mencionadas.

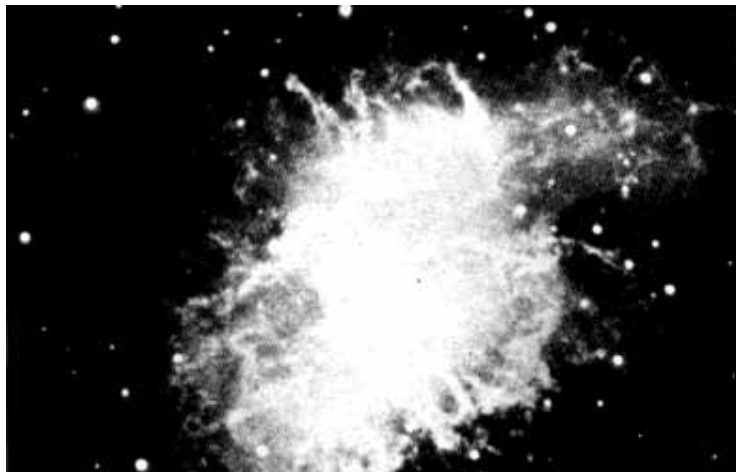


Figura 27. nebulosa del Cangrejo.

El astrónomo ruso Yosif Shklovsky se dio cuenta, en los años cincuenta, de que la radioemisión del remanente de la supernova conocido como la nebulosa del Cangrejo (Figura 27) era radiación sincrotrónica —producida por electrones relativistas girando en campos magnéticos—, descubriendo así la primera fuente natural de emisión de este tipo de radiación.

Sin embargo, uno de los descubrimientos más espectaculares de la radioastronomía fue el de las radiogalaxias.

3. RADIOGALAXIAS

En los años cincuenta se descubrió otra poderosa fuente de radio llamada Cisne A (la más potente de la constelación del Cisne). La posición de una fuente de radio era difícil de determinar con precisión en aquella época debido al problema de resolución que tenían los primeros radiotelescopios. Sin embargo, al poco tiempo el alemán Valter Baade logró identificar ópticamente esta fuente con un objeto que tenía la apariencia de dos galaxias en colisión (Figura 28) Si la radioemisión se debía a un objeto extragaláctico a la distancia de Cisne A, su intensidad resultaba como un millón de veces la de la radioemisión de toda la Vía Láctea! Baade pensó que quizá el choque de dos galaxias pudiese explicar esta colosal generación de energía. Estaba tan seguro de ello que le apostó una botella de whisky a su colega Rudolph Minkowsky, quien se disponía a tomar el espectro de Cisne A, a que el espectro mostraría líneas de emisión de gas chocado producido por la colisión. Baade ganó la apuesta; aunque luego resultó que la interpretación del espectro de emisión fue incorrecta. Analizaremos este punto más adelante.



Figura 28. Imagen óptica de Cisne A.



Figura 29. Imagen óptica de Centauro A.

Por lo que respecta a la apariencia del objeto, se trata en realidad de una galaxia elíptica gigante, que se ve doble debido a que se halla atravesada por una banda de polvo parecida a la de Centauro A (Figura 29). Centauro A se encuentra a 16 millones de años luz y es la radiogalaxia más cercana a nosotros —y asimismo una elíptica gigante. En el caso de Cisne A, no podemos distinguir el detalle del polvo, pues se encuentra mucho más lejos: a 740 millones de años luz.

La intensa radioemisión no proviene del centro de la galaxia identificada ópticamente, sino de dos lóbulos —o radiolóbulos— situados a los lados de la galaxia. En un radiomapa de Cisne A (Figura 30), la galaxia óptica no es visible. En cambio, vemos dos regiones muy extendidas de radioemisión. Estos son los lóbulos, que miden aproximadamente 50 000 años luz y se encuentran a 200 000 años luz a cada lado de la galaxia óptica (estos lóbulos, en cambio, son invisibles ópticamente). Los lóbulos son gigantescas nubes de electrones relativistas y campos magnéticos que emiten radiación sincrotrónica. La energía contenida en estos lóbulos es de 10^{60} ergios⁴, lo que equivale a la cantidad total de energía radiada por nuestra galaxia en mil millones de años. La idea de choques de galaxias se abandonó por completo hace varios años.



Figura 30. Mapa de radio de Cisne A.



Figura 31. Imagen óptica de Virgo A (M 87). El chorro tiene una longitud (proyectada) de 6 500 años luz.

Pero entonces, ¿de dónde proviene esta cantidad colosal de energía? Esta es la pregunta que trataremos de contestar a lo largo del presente libro.

Por lo pronto, podemos responder a otra pregunta: ¿cuál es el origen de los radiolóbulos? La clave la dio otra radiogalaxia, Virgo A (M87), una elíptica gigante que mencionamos ya en el primer capítulo. Una de las características más impresionantes de esta galaxia es el chorro de materia luminosa que emana de su núcleo (Figura 31). La luz de este chorro no es común, se trata de radiación sincrotrónica de alta frecuencia. De hecho, el mismo chorro se detecta en todas frecuencias, desde rayos X hasta radio. Aquí se muestra (Figura 32) un mapa de radio de Virgo A. La conexión entre la galaxia óptica en el centro —que en este caso es también un potente radioemisor— y los lóbulos es evidente. Gracias a las modernas técnicas de radiointerferometría se han logrado descubrir, en una gran cantidad de radiogalaxias, estos chorros que conectan a las radiogalaxias con sus lóbulos. El material que forma los chorros son electrones —y protones— relativistas arrojados por el núcleo de la galaxia y que brillan por radiación sincrotrónica. Los lóbulos se nutren de material eyectado por el núcleo de la galaxia y la forma de los chorros es muy variable (Figuras 33, 34, 35): pueden ser rectos o curvos, continuos o discontinuos, bilaterales o unilaterales. La cantidad de preguntas que surgen respecto de las radiogalaxias es enorme y la mayoría no tienen respuesta. Enunciaremos algunas: ¿cuál es la fuente de la energía? ¿Cómo se aceleran los electrones a velocidades cercanas a la de la luz? ¿Cómo se producen los campos magnéticos? ¿Cómo se puede colimar el material que forma los chorros; es decir, por qué sale en forma de chorros? ¿Cómo es que no se expande y/o destruye el chorro a través de cientos de miles y hasta millones de años luz? ¿Qué es lo que lo mantiene confinado? ¿La apariencia de "pelotitas" se debe a inestabilidades del chorro o es arrojado así el material? ¿Por qué y cómo desemboca en los lóbulos? ¿Qué mantiene confinados a los lóbulos? ¿Por qué todas las radiogalaxias son elípticas? ¿Por qué las más potentes se encuentran en los centros de los cúmulos?, etc., etc. A lo largo, y sobre todo al final de este libro, veremos cuáles de estas preguntas se puede intentar responder.

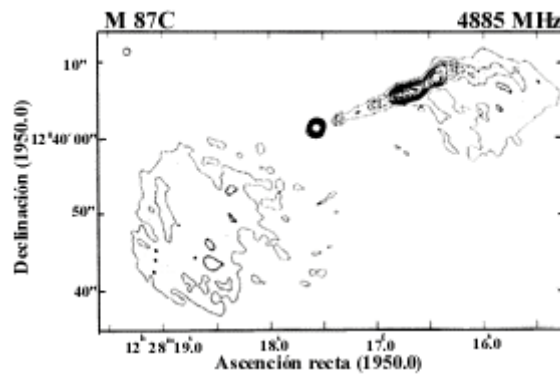


Figura 32. Mapa de radio de Virgo A. (M 87).



Figura 33. Imagen de la radiogalaxia Hércules A reconstruida por computadora. Observaciones de VLA a $\lambda = 6$ cm.



Figura 34. Imagen de la radiogalaxia NGC 1265 reconstruida por computación. Se cree que lo que puede producir la curvatura de los chorros es la presión del medio intergaláctico. Observaciones de VLA en $\lambda = 6$ cm.

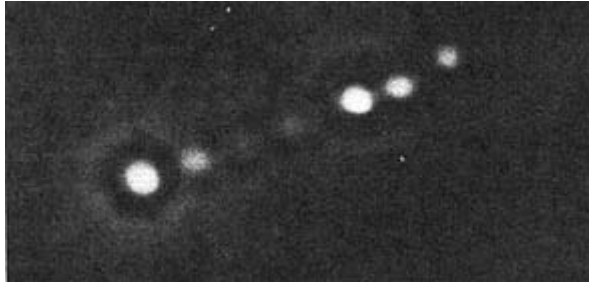


Figura 35. Un procesamiento de imágenes por computadora nos muestra la estructura discontinua del chorro óptico de M 87.

NOTAS

1 Del inglés, *Very Large Array*.

2 Del inglés, *Multi Element Radio Linked*.

3 Del inglés, *Very Long Baseline Interferometry*.

4 El ergio es una unidad de energía. La generación de 10^7 ergios por segundo equivale a un watt.

Deborah Dultzin Kessler
deborah@astrocu.unam.mx