

# La Radioastronomía: una nueva forma de mirar al Cosmos

Jesús Gómez González

## Introducción

Se suele decir que la Radio-astronomía surgió de forma casual hacia 1932-33 cuando el joven físico norteamericano de 28 años, Karl Jansky, detectó por primera vez las ondas radio procedentes de un objeto astro-nómico (el plano de nuestra galaxia, la Vía Láctea) mientras se hallaba realizando un estudio de los efectos que perturbaban las comunicaciones telefónicas por radio entre Europa y los EEUU. Ésta fue, sin duda, la primera detección. No obstante, los primeros radioastrónomos o, cuando menos, precursores de radioastrónomos, habían ya surgido unas décadas antes (últimos años del siglo XIX y primeros del XX). Por entonces, eminentes personalidades científicas como Sir Oliver Lodge, Marconi, Edison o jóvenes investigadores cuyo nombre ha perdurado, como el francés Charles Lenormand, construyeron sus propios sistemas receptores y se lanzaron a intentar detectar ondas electromagnéticas a frecuencias radio procedentes del Sol. No tuvieron éxito en sus intentos (como tampoco lo tenemos, los radioastrónomos actuales en multitud de estudios o proyectos), pero les animaba ese espíritu de pioneros, de descubridores, que debe caracterizar al genuino investigador, al auténtico científico. Por eso he querido recordarlos aquí. Por eso y porque creo que encarnan muy bien una característica muy propia de los radioastrónomos que, en mi opinión, ha estado siempre en la base de los importantes descubrimientos y fundamentales aportaciones al conocimiento del cosmos realizadas mediante sus técnicas en estos últimos 50 años: su capacidad para participar activamente en la definición, construcción y puesta a punto de la instrumentación y métodos utilizados en sus observaciones. Capacitación que unida a la versatilidad que ofrecen las técnicas de las radiocomunicaciones, les han permitido desplegar una creatividad observacional muy poco frecuente en otras técnicas, y que ha conducido a la realización de las que, sin duda, han sido las aportaciones astronómicas más importantes de la segunda mitad del siglo XX. Afirmación que se ve avalada por la concesión –hasta ahora– de 6 Premios Nobel de Física a algunos de los más brillantes radioastrónomos. Y digo algunos porque, como se suele



**Nebulosa del Cangrejo. Resto de supernova en cuya región central se encuentra el púlsar que se originó al colapsar gravitacionalmente el núcleo de la estrella que explotó.**

decir “son todos los que están ¡aunque no están todos los que son!” En los apartados que siguen voy a tratar de exponer, a grandes trazos, las que, por su envergadura o trascendencia, han sido las más sobresalientes de esas aportaciones de la Radioastronomía. Aportaciones que en unos casos se podrán identificar con descubrimientos o trabajos concretos que, aunque por su trascendencia han abierto nuevos campos de investigación en los que las publicaciones se cuentan por miles, inicialmente se debieron al ingenio y sagacidad de determinados radioastrónomos bien conocidos; en otros casos se tratarán de aportaciones que podríamos llamar colectivas –bastante habituales en Astronomía– para cuya realización ha

sido necesario el esfuerzo prolongado durante decenios de multitud de científicos y técnicos.

En la presentación de todas estas aportaciones seguiré un orden aproximadamente cronológico, si bien esta ordenación se referirá a los momentos de arranque de los trabajos correspondientes, pues la historia de la Radioastronomía es tan corta que puede decirse que los trabajos en los distintos campos que vamos a mencionar se han producido todos ellos –y se continúan produciendo– en la misma época (estos últimos 40-50 años). Veamos, pues, sin más dilación, las que, según mi criterio, han sido las más importantes de las aportaciones hechas por la Radioastronomía a nuestro conocimiento del Cosmos.

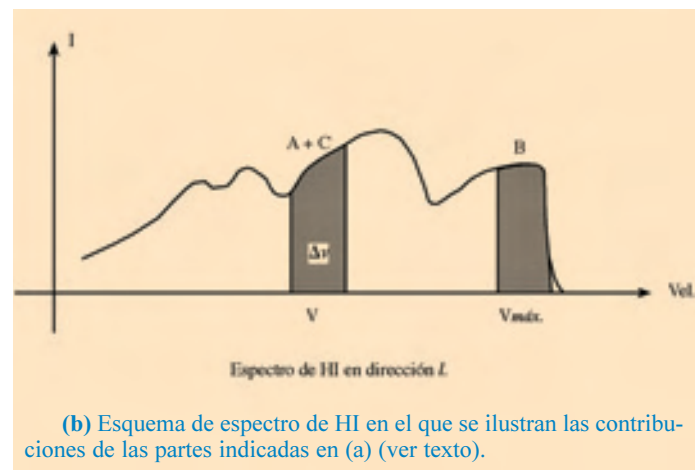
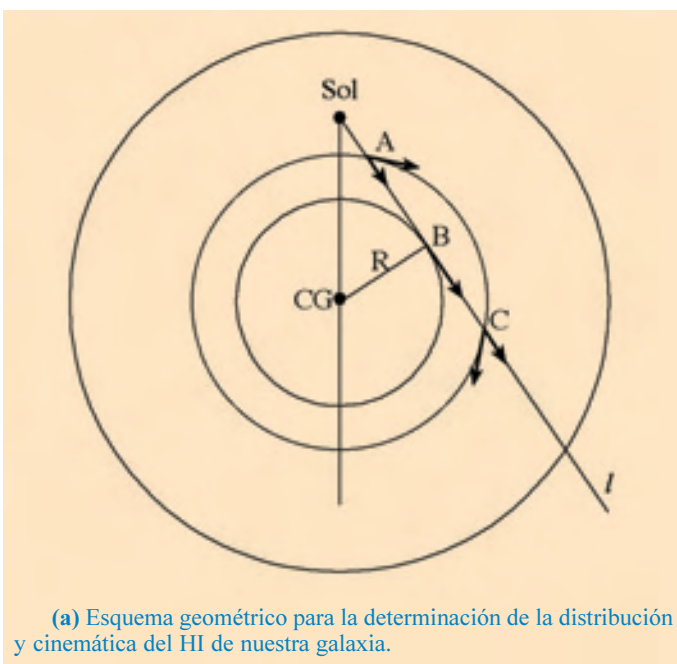
## La estructura a gran escala de nuestra Galaxia. La línea de emisión del HI a 21 cm de longitud de onda

Durante el siglo XIX y principios del XX, los astrónomos ópticos (únicos que por entonces existían) habían puesto de manifiesto la forma y dimensiones aproximadas del volumen en el que se distribuían las estrellas en nuestra galaxia, la Vía Láctea; esto es, habían llegado a establecer su forma de disco o lente y el orden de magnitud de su tamaño. Sin embargo, puede decirse que nada se sabía acerca de la estructura y cinemática internas de la misma: ¿existían brazos espirales?; ¿qué forma y tamaño tenían?; ¿cómo se estaban moviendo?;

¿cuál era la distribución de masas?; eran preguntas que, a mediados del siglo XX todavía no tenían respuesta. El problema para abordar estas cuestiones residía en el hecho de que la luz emitida por las estrellas es absorbida por el polvo interestelar, lo que hace que, cuando miramos en una dirección en el plano de nuestra galaxia, no podamos ver más allá de una distancia de 1-2 kpc (excepto en dirección de unos cuantos “agujeros” en el polvo galáctico, a través de los cuales podemos llegar a distancias algo mayores). Sin embargo, el polvo interestelar es completamente transparente a las ondas radio, frecuencias a las que uno puede ver a través de todo el plano del disco galáctico. Por ello, con el surgimiento de la Radioastronomía, se abrió la posibilidad de responder a las anteriores preguntas. Aunque, evidentemente, primero teníamos que saber qué era lo que teníamos que observar con nuestros radiotelescopios que pudiera darnos información acerca de la estructura y cinemática de nuestra propia galaxia de la que, precisamente por estar dentro de ella, tan poca cosa conocíamos. La respuesta la dio un joven estudiante de doctorado holandés, Van de Hulst, quien en 1945 estableció la posibilidad de detectar el hidrógeno neutro interestelar en su línea de emisión a 21 cm de longitud de onda, correspondiente a la transición de estructura hiperfina (niveles de energía correspondientes a los estados en que los espines del protón y el electrón están, respectivamente, paralelos y antiparalelos). En sus cálculos, Van de Hulst demostró que la emisión en esta línea debía tener la intensidad suficiente como para ser detectada con la instrumentación de la época. Y así fue: en 1951 un grupo de radioastrónomos de la Universidad de Harvard detectaba por primera vez la línea de 21 cm del hidrógeno neutro ofreciendo a la comunidad científica una herramienta de trabajo ciertamente excepcional, como así lo avalan la variedad de campos de estudio en los que hasta ahora se ha aplicado y los fundamentales resultados que, por su mediación, se han conseguido. El primero de ellos es el de la estructura y rotación galáctica al que, en este apartado, nos estamos refiriendo. El hecho es que el disco de nuestra galaxia no gira como un cuerpo rígido, sino que su velocidad angular de rotación varía con el radio (a las curvas que representan esta variación se les denominan cur-

vas de rotación). Esto hace que, como se esquematiza en la Figura, cuando miramos en una dirección del plano galáctico, el HI interestelar situado a lo largo de la línea de mira presente componentes de velocidad radial con respecto a nosotros que varían en función de la distancia. Para curvas de rotación “razonables” (basadas en las observadas en galaxias externas), la velocidad radial máxima (positiva o negativa) en una dirección, la presenta el gas del anillo interior (de radio  $R$ ) al que dicha dirección es tangente. Midiendo, pues, por efecto Doppler, la velocidad radial máxima,  $V_{\max}$ , del espectro de HI observado en esa dirección, habremos determinado un punto de la curva de rotación: el punto  $(R, V_{\max})$ ; y considerando que el gas que emite en el rango de velocidades  $(V_{\max} - \Delta V)$  a  $V_{\max}$ , está situado en la zona del punto de tangencia, midiendo en el espectro observado la intensidad de la línea de 21 cm en ese  $\Delta V$ , podemos deducir la masa de gas situada en esa zona. Por otra parte, si la rotación es circular, el gas que emite en un rango  $\Delta V$  centrado sobre otra velocidad  $V$  (obviamente menor que  $V_{\max}$ ) provendrá de las zonas A y C situadas simétricamente a cada lado del punto de tangencia B. Si la distribución del gas en el disco fuera uniforme, uno podría suponer –al menos inicialmente– que en cada punto A y C está situada la mitad de la masa del gas que emite a la velocidad  $V$ ; masa que deducimos a partir de la intensidad de la emisión del espectro de HI a esa velocidad. De este modo, uno podría ir asignando masas de HI en todo el plano de la galaxia; y, por sucesivas iteraciones, llegar a un modelo de distribución de masas y velocidades coherente con los espectros de emisión de HI observados en todas las direcciones del plano de la galaxia. Estos fueron los trabajos pioneros que emprendieron, a mediados del siglo pasado, figuras tan eminentes de la Astronomía, como el holandés Jaan Oort (sin duda, uno de los mejores astrónomos del siglo XX). Trabajos que, en la actualidad han conducido, entre otras muchas cosas, a establecer el resultado astronómico de fundamental importancia que es el conocimiento de la estructura en brazos espirales y la cinemática de nuestra propia galaxia.

Al extender este tipo de observaciones en la línea de los 21 cm a galaxias externas, se pusieron de manifiesto otros dos efectos que inauguraban nuevas líneas de investigación de gran transcendencia y plena actualidad. Por una parte, al observar la emisión en la línea de 21 cm en cúmulos de galaxias se comprobó que entre ellas existían extensos puentes de hidrógeno que las conectaban, evidenciando la presencia de materia en el espacio intergaláctico. Por otra parte, al ir



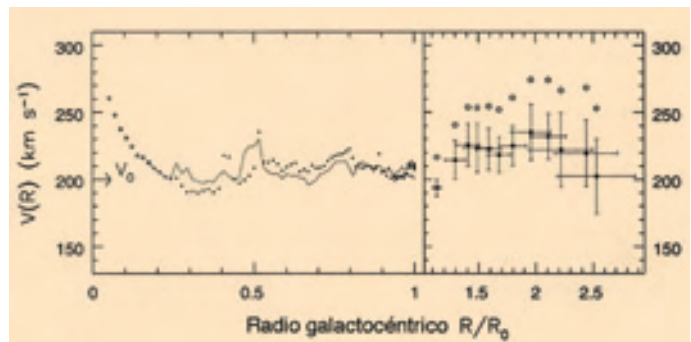
estableciendo las curvas de rotación de las galaxias externas se fue observando que a distancias radiales mucho mayores que el radio al que la emisión óptica de la galaxia (estrellas visibles) termina, seguía existiendo HI y, lo que era más sorprendente, que su velocidad de rotación no disminuía. Para que así sea —que la velocidad no disminuya— es necesario que la masa gravitatoria de la galaxia sea mucho mayor que la que se deduce para su masa en forma de estrellas. No podemos entrar en describir las posibles explicaciones que se han tratado de dar para explicar este hecho observacional. Explicaciones que no han podido eludir la conclusión de que debe existir una forma de materia oscura, que no se manifiesta más que por sus efectos gravitatorios, y que en la actualidad se supone presente a todas las escalas de interés cosmológico: de galaxias, de cúmulos y supercúmulos de galaxias y del Universo en su conjunto.

### La identificación de radiofuentes. Las técnicas de observación interferométrica. Los púlsares

Desde sus mismos inicios, la primera tarea que se marcaron los radioastrónomos fue el identificar las radiofuentes que en sus exploraciones del cielo iban descubriendo, con objetos ópticos que pudieran aportar datos acerca de su naturaleza. El problema observacional residía en que la resolución angular de los radiotelescopios que, por entonces, se utilizaban, era muy baja (algunas decenas de minutos de arco). Para un radiotelescopio de diámetro  $D$  trabajando a la longitud de onda  $\lambda$ , esta resolución es del orden del límite de difracción  $\theta \approx \lambda/D$  rad. Así, por ejemplo, para un radiotelescopio de 30m de diámetro trabajando a 21 cm de  $\lambda$ , esta resolución es del orden de 24'. Es decir, la región del cielo en la que buscar las contrapartidas ópticas de las radiofuentes, eran muy extensas y, por lo tanto, las identificaciones muy difíciles de hacer. Así que los radioastrónomos de los años 50 se pusieron a tratar de imaginar formas ingeniosas de conseguir una mayor resolución angular. La más evidente —y desde luego, poco ingeniosa— era la de construir radiotelescopios cada vez mayores. Así, en 1957, se construyó el radiotelescopio de 70 m de diámetro de Jodrell Bank, en Inglaterra. Pero la resolución angular era todavía bastante baja.

Otra posibilidad fue la de utilizar varias antenas que actuaran como un interferómetro: la resolución angular en estos casos en la dirección perpendicular a la línea de base de las antenas, era del orden de  $\lambda/D$ , donde  $D$  era ahora la distancia entre las antenas. Se lograban así resoluciones angulares del orden del minuto de arco, que permitían situar las radiofuentes con mucha mayor precisión y establecer límites superiores a su tamaño angular según determinados ejes.

El gran paso adelante lo dio el inglés Martin Ryle al desarrollar la teoría de la síntesis de apertura que está en la base del funcionamiento de todos los interferómetros actuales, tanto de los conectados en tiempo real, como de los que utilizan las técnicas de la Interferometría de Muy Larga Base o VLBI, en los que las antenas están a distancias de miles de kilómetros y la correlación de las señales captadas y almacenadas por cada una de ellas se hace en tiempo diferido. Es imposible explicar aquí esta teoría, de una cierta complejidad matemática. Diremos tan sólo que se fundamenta en el hecho de que desplazando las antenas de un interferómetro a distintas posiciones de sus líneas de base y aprovechando el giro de la Tierra, es posible ir adquiriendo información sobre



Curva de rotación típica de una galaxia espiral.

Curva de rotación de nuestra galaxia determinada por observaciones del HI a 21 cm de longitud onda.

las componentes de Fourier de la función bidimensional distribución de brillo (intensidad) de la radiofuente en el cielo. El resultado es el equivalente a sintetizar la resolución angular (diagrama de radiación) de una antena (apertura) que tuviese la forma del área total barrida por las antenas, en sus distintas posiciones, al girar la Tierra. De este modo, en la actualidad, con las técnicas interferométricas de VLBI se logran resoluciones angulares inalcanzables por cualquier otra técnica observacional: del orden de la centésima del milisegundo de arco ( $10^2 - 10^3$  veces mejores que las que se puede alcanzar con el telescopio espacial Hubble).

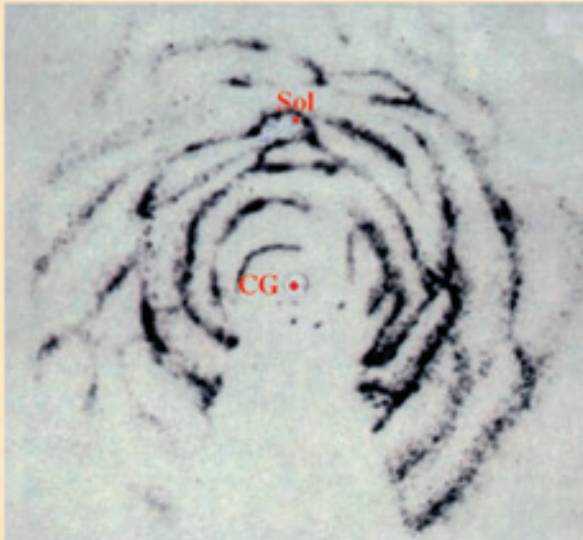
Pero volvamos en este punto al problema de la identificación de radiofuentes. Hacia 1960 los radioastrónomos de Cambridge habían identificado una radiofuente compacta muy intensa con un objeto óptico puntual, es decir, aparentemente una estrella. ¿Qué tenía de particular esa estrella para que emitiera ondas radio tan intensas? Habría que estudiar la clase de estrella que era, analizando su espectro. Y la sorpresa fue mayúscula: el espectro de la supuesta estrella era tan extraño que no se acertaba a identificar sus líneas. Este hecho, unido a su extraordinaria emisión radio, llevó a definir ese objeto astronómico como una radiofuente de aspecto cuasi-estelar, por lo que, más brevemente, se le denominó cuasar.

En 1962, el astrónomo del Observatorio de Monte Palomar, Marteen Schmidt, identificó por fin el espectro óptico al darse cuenta que las líneas de emisión estaban decaladas hacia el rojo a una velocidad que nadie se había podido imaginar (“redshift”  $z=0.16$ ). De acuerdo con la ley de Hubble ( $z$ -distancia), este objeto, este cuásar, se encontraría a distancias cosmológicas y, por tanto, su luminosidad sería, simplemente, descomunal. Otros descubrimientos de cuásares siguieron a 3C273. Y un nuevo campo de investigación se abrió, con implicaciones de fundamental importancia en evolución galáctica y en Cosmología. Los radioastrónomos nos mostraban otra imagen del Universo hasta entonces desconocida.

Otra de las técnicas empleadas para establecer límites angulares al tamaño de las radiofuentes (buscar fuentes compactas que pudieran ser cuásares) era la del centelleo interplanetario de su emisión. El fundamento es sencillo: del mismo modo que las estrellas (fuentes luminosas de pequeñísimo tamaño angular) centellean (variación aleatoria de su luminosidad) a causa de las fluctuaciones en nuestra atmósfera, a longitudes de onda decimétricas y centimétricas



cas, las radiofuentes galácticas y extragalácticas de muy pequeño tamaño angular también centellean (variación aleatoria de su intensidad) al atravesar las irregularidades en el gas ionizado interplanetario que se desplaza alejándose del Sol (viento solar); y así como los planetas (fuentes luminosas de un cierto tamaño angular) no centellean, las radiofuentes de unos pocos segundos de arco, tampoco lo hacen. Así que, para las radiofuentes próximas a la eclíptica (trayectoria del Sol en la esfera celeste), bastaba ir observándolas cuando su separación angular del Sol no era muy grande para, según centelleasen o no, poder establecer un límite superior a su tamaño angular.



Distribución del HI de nuestra galaxia determinada por observaciones del HI a 21 cm de longitud de onda

Por otra parte, y como parece evidente, el centelleo interplanetario de radiofuentes depende de la distancia al sol de la línea de mira hacia la radiofuente en cuestión. Observando, pues, las variaciones de parámetros como la intensidad y los tiempos característicos de las fluctuaciones como función de la distancia al Sol de la línea de mira, o analizando la correlación de las variaciones de intensidad observadas al mismo tiempo por antenas situadas en distintos emplazamientos, se podían determinar condiciones físicas del viento solar como tamaño y variación de densidad de las irregularidades, velocidad de desplazamiento, variación de estas características como función de la distancia al Sol, etc.

Para estudiar todos estos aspectos, en la década de los 60 del pasado siglo, el también radioastrónomo de Cambridge, Anthony Hewish, había construido una antena de baja fre-

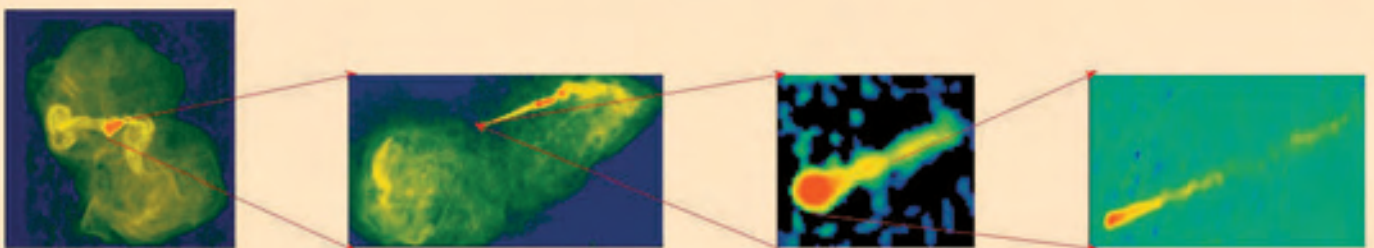
cuencia (81.5 MHz) para el estudio de los fenómenos de centelleo interplanetario de radiofuentes.

El receptor estaba por tanto diseñado para responder a fluctuaciones de la señal del orden del segundo (las típicas del centelleo interplanetario). Pues bien, no voy a contar aquí la historia por demasiado conocida, pero a finales de 1967, el radiotelescopio diseñado y construido por Hewish detectó de forma casual unas señales tan periódicas y repetitivas que se llegó incluso a pensar que pudieran ser de origen artificial. Como es bien sabido, lo que había descubierto eran los púlsares: estrellas de neutrones ultracompactas en las que una masa como la del Sol se concentra en un diámetro de 12 ó 15 km, que giran emitiendo hacia la Tierra únicamente cuando uno o ambos polos de su eje magnético apunta hacia nosotros. Conceptos como el de estrella de neutrones, que hasta entonces no pasaban de ser meras especulaciones de unos cuantos teóricos, cobraron realidad y se convirtieron en campo de estudio observacional, gracias al descubrimiento de Hewish y su equipo.

En 1974, Martin Ryle y Anthony Hewish recibían un merecido Premio Nobel de Física por las extraordinarias aportaciones que acabo de mencionar.

### La Cosmología y la Relatividad General

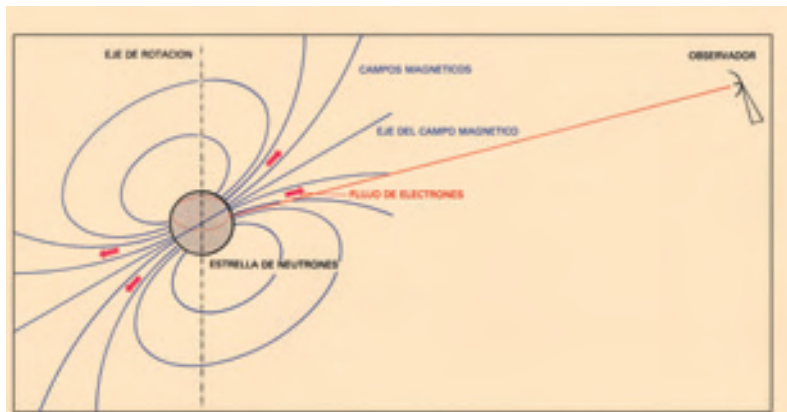
Hacia 1948, el polifacético físico de origen ruso, George Gamow, había lanzado la idea de que, de acuerdo con la Teoría del Big-Bang, la radiación térmica correspondiente a las altísimas temperaturas del Universo en sus primeros instantes, debería ser todavía observable en la actualidad en forma de una radiación térmica (espectro de radiación del cuerpo negro) correspondiente a una temperatura de unos pocos Kelvin. Radiación que llenaría uniformemente todo el Universo. En los primeros años de la década de los 60 del siglo pasado, el extraordinario físico, radioastrónomo y cosmólogo norteamericano Robert Dicke y su equipo de Princeton se hallaban poniendo a punto un nuevo receptor (receptor tipo Dicke) para detectar ese remanente de radiación térmica. Hemos de señalar que los efectos de esta radiación, a 2.7 K ya se habían puesto de manifiesto, en los años 40, a través de la excitación de unas cuantas moléculas interestelares (CH, CN); pero nadie había pensado en su existencia para explicar dicha excitación. Los radioastrónomos de Princeton sin duda habrían logrado su propósito, de no haber sido por dos ingenieros de la Bell Telephone, Arno Penzias y Robert Wilson que, a pocos kilómetros (en New Jersey), habían diseñado y construido a su vez una antena tipo bocina para el estudio de las comunicaciones vía satélite. Antena cuyas capacidades técnicas conocían tan bien que, cuando en sus medidas detectaron un exceso de ruido de unos pocos K (una fracción muy pequeña de la temperatura



Imágenes interferométricas a distintas longitudes de onda de la radiofuente central de la radiogalaxia M87 tomadas con resolución angular creciente. La imagen (d) es la observada por las técnicas de la VLBI con una resolución del orden de 0.001\".

de ruido de su sistema antena-receptor) no se conformaron hasta encontrar una explicación satisfactoria. Tampoco me voy a extender aquí, porque la historia ha sido amplia y magníficamente divulgada: la explicación a ese pequeño exceso de ruido era la captación de la radiación de fondo cósmica a 2.7 K, que la fecunda imaginación de Gamow había previsto. Y no es preciso, tampoco, resaltar las extraordinarias repercusiones de este descubrimiento que, en tanto que predicción, constituye el mayor éxito de la teoría del Big-Bang.

Arno Penzias y Robert Wilson entraban en la historia de la Astronomía por la puerta más grande (¡no cabe imaginar-se otra mayor!). Además, en 1978, se les concedía el Premio Nobel de Física.



Esquema de la emisión sincrotrón (producida por electrones relativistas) en forma de impulsos que se observa en la dirección de un púlsar.

Retomemos ahora el tema de los púlsares. Desde su descubrimiento en 1967, uno de los trabajos más importantes por su interés científico y envergadura, han sido las búsquedas sistemáticas de nuevos púlsares. En este tipo particular de observaciones, a la dificultad de no saber donde está la fuente, se añade la de no saber cual es su período; así que la búsqueda ha de hacerse en dos tipos de dimensiones y los radioastrónomos tienen ocasión de desplegar su imaginación y creatividad para poner en marcha procedimientos de búsqueda eficaces. En 1979, durante una estancia que hice en el Observatorio Nacional de Radioastronomía de los EEUU, en Green Bank, tuve ocasión de encontrar a uno de los más prestigiosos especialistas en púlsares, Joseph Taylor, que junto a uno de sus colaboradores, Russell Hulse, estaban realizando una de estas búsquedas de púlsares. Por entonces Joseph Taylor era profesor en la Universidad de Massachusetts, en Amherst, donde tiempo antes le había conocido (Amherst tenía un radiotelescopio similar al del Centro Astronómico de Yebes y, por otra parte, mi tesis doctoral trataba de la determinación de distancias de púlsares). Por esto, durante los días que estuvieron observando, el Prof. Taylor me explicó un ingenioso método que habían desarrollado para detectar si en un barrido del cielo había alguna radiofuente que emitiera por impulsos. Pues bien, años después, Taylor y Hulse anunciaban la detección del primer púlsar binario. Esto es, del primer púlsar en órbita alrededor de una estrella. El caso es que, estudiando la variación del periodo de los impulsos, habían llegado a establecer que, en su giro alrededor del baricentro del sistema se iba perdiendo una

energía que sólo podía explicarse como radiada en forma de ondas gravitacionales (la famosa predicción de la Teoría de la Relatividad General).

Más aún, el ajuste de las predicciones teóricas a los datos observacionales era tan extraordinariamente bueno, que se pudo descartar como inadecuada la otra teoría de la Relatividad General –la de Brans-Dicke (el mismo Robert Dicke que mencionábamos antes)– lo que los experimentos y observaciones anteriores todavía no habían permitido hacer.

En 1993, Hulse y Taylor recibían por estos trabajos el Premio Nobel de Física.

### La Radioastronomía milimétrica. Las moléculas interestelares. Vida y muerte de las estrellas

Más arriba hemos visto como una de las líneas del desarrollo instrumental de la Radioastronomía ha sido siempre la de ir tratando de alcanzar cada vez mayores resoluciones angulares. La otra ha sido la de ir cubriendo, (con la mayor sensibilidad posible) bandas de frecuencia cada vez más altas. En esta última línea de desarrollo, los radioastrónomos han puesto a punto sistemas capaces, hoy en día, de trabajar a longitudes de onda submilimétricas, habiendo tenido que desarrollar, para ello, equipos y componentes que más tarde han tenido aplicación en el campo de las radiocomunicaciones.

Estos desarrollos tecnológicos se hacen siempre movidos por un interés científico. En este caso, el principal interés científico ha sido el estudio de las moléculas interestelares. En la actualidad se conocen más de cien especies moleculares distintas (para muchas de ellas se detectan distintos isótopos e isómeros). Conocimiento que ha dado lugar al surgimiento de una nueva rama de la Astronomía, la Astroquímica, dedicada al estudio de los procesos de formación y destrucción de especies químicas en condiciones (densidad, temperatura) inalcanzables en nuestros laboratorios.

Pero el estudio de las moléculas interestelares tiene otro interés astronómico fundamental: constituyen la mejor herramienta observacional para conocer los procesos físico-químicos y condiciones (densidad, temperatura, cinemática) de las regiones totalmente oscurecidas por concentración del polvo interestelar en las que tienen lugar los procesos de formación y muerte de las estrellas. Son estos dos aspectos los que continúan sin comprenderse del todo, dentro de la teoría de la evolución estelar (teoría que, sin duda, constituye uno de los logros científicos más importantes del siglo XX). El estudio de los espectros de emisión en las bandas milimétricas y submilimétricas de las distintas especies moleculares, nos está llevando a comprender cuales son los procesos astronómicos que llevan a que las partes más densas de las nubes interestelares colapsen hasta formar una nueva estrella. O a entender como las estrellas de baja masa se desprenden de sus capas más externas formando a su alrededor esas bellas nebulosas planetarias que son el anuncio de su muerte en forma de enanas blancas.

Estos campos de estudio están en pleno desarrollo y, como seguidamente vamos a ver, los nuevos radiotelesco-



Nebulosa protoplanetaria OH231.8 ("La calabaza") que muestra el gas eyectado por una estrella en sus últimas fases de evolución; gas cuya componente molecular (color amarillo) se estudia por las técnicas radioastronómicas.

pios a punto de construirse van a representar la apertura de nuevas líneas de investigación como, por ejemplo, la de la formación de planetas cuando una nube interestelar colapsa para formar una nueva estrella.

### Los nuevos desarrollos instrumentales. Conclusión

En las páginas anteriores he presentado algunos de los resultados y aportaciones científicas más importantes de las realizadas por la Radioastronomía en los, prácticamente, 40 ó 50 años de su existencia. He dejado de mencionar otros muchos –muchísimos– resultados y aportaciones: los cuásares y la ley de Hubble, los cuásares y las lentes gravitatorias, el efecto Sunyaev-Zeldovich, los megamáseres extragalácticos y los agujeros negros, las fuentes supralumínicas, las aplicaciones de la Radioastronomía en las Ciencias de la Tierra y sus fundamentales aportaciones a la tectónica de placas, etc. etc.

Y cuando comienza el siglo XXI, las expectativas de desarrollo instrumental de la Radioastronomía son, simplemente, portentosas. Con la flexibilidad que ofrecen las técnicas que le son propias, los radioastrónomos de, prácticamente, todo el mundo, en un ejemplo de colaboración científica internacional, están a punto de comenzar la construcción de un radiotelescopio como ALMA (Atacama Large Millimeter Array); interferómetro compuesto por 64 antenas de 12 m de diámetro capaces de trabajar a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, a instalar en un área de más de 10 km de diámetro, a 5.000 m de altitud en el desierto de Atacama, Chile. Instrumento de una capacidad observacional sin precedentes en cuanto a su resolución angular, sensibilidad y

frecuencias de uso, que podrá utilizarse en, prácticamente, todos los campos de la Astronomía: desde la Cosmología a los planetas de nuestro Sistema Solar.

Pero cuando ALMA está a punto de comenzar a construirse (la fecha de inicio es 2003), proyectos aún mayores están ya en su fase de estudio de viabilidad y diseño de prototipos. Me refiero ahora al denominado SKA (Square Kilometer Array), un interferómetro para longitudes de onda centimétricas, de área colectora equivalente a 1 km<sup>2</sup>, con sectores de centenares de metros de diámetro distribuidos en distancias que van de cientos a unos pocos miles de kilómetros. Interferómetro que se instalará en algún lugar del Hemisferio Sur (probablemente Australia) y en el que están interesados en participar la práctica totalidad de las instituciones radioastronómicas de todo el mundo.

Para acabar, mencionaré los proyectos de VLBI espacial, en los que varias antenas estarán en órbita alrededor de la Tierra ampliando así, al máximo, las líneas de base (la resolución angular). O los planes para conectar por fibra óptica de gran capacidad los telescopios que constituyen la actual red de VLBI europea (EVN) que pasaría, de este modo, a convertirse, en la práctica, en un interferómetro conectado en tiempo real. En este campo concreto, nuestro país, con la inclusión del nuevo radiotelescopio de 40 m de Yebes en la EVN, podrá participar de forma activa y destacada, ya desde sus mismos comienzos.



Impresión artística del interferómetro euro-norteamericano ALMA que será instalado en Atacama, Chile (ver texto).

Sólo me queda desear que los jóvenes radioastrónomos españoles aprovechen tan extraordinarios medios observacionales para dejar su impronta en los importantes descubrimientos que, sin duda, se van a realizar en ese futuro que está a punto de comenzar.

**Jesús Gómez González**

*está en el Observatorio Astronómico de Guadalajara*