

Imagen artística de un hipotético interferómetro instalado en la cara oculta de la Luna. El paisaje está basado en una de las clásicas imágenes del Apolo 17 (cortesía de NASA).

La última y única vez que he colaborado en este Anuario escribiendo un artículo de divulgación fue hace catorce años, en el volumen correspondiente a 1994, el primero de esta nueva época. En aquel artículo titulado Radiotelescopios para el fin del decenio, repasaba los nuevos instrumentos radioastronómicos que se esperaba entrasen en funcionamiento por estas fechas. El futuro que predije hace más de diez años no dista mucho de la realidad. Algunos instrumentos no han prosperado, como el MMA que ha sido reconvertido en el proyecto ALMA, y otros que no estaban previstos han entrado en funcionamiento, como la antena de 40 m de diámetro del Centro Astronómico de Yebes. Una de las secciones estaba dedicada al Sub-Milimeter Array (SMA). La titulé El SMA: captando pequeñas ondas en la gran isla, tomando prestado el lema del CSO, otro telescopio submilimétrico situado en el cono del volcán Mauna Kea (isla de Hawaii, EE.UU.), Catching small waves from the big island. Hoy retomo el hilo de la narración donde lo dejé, intentando plasmar en las siguientes páginas qué nos deparará el próximo futuro en lo que a radiotelescopios se refiere. Esta vez no voy a abarcar instrumentos de todo tipo, sino que me ceñiré a aquellos que se dedicarán a trabajar a gran longitud de onda, por lo que haciendo un guiño a los amantes del surf, titularé este artículo

## A LA CAZA DE LAS GRANDES ONDAS

### Javier Alcolea

Observatorio Astronómico Nacional Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento

#### **Abstract**

In this paper, I will briefly review the main characteristics and research areas of the two major new initiatives in the field of low frequency radio-interferometry: the projects LOFAR and SKA. I will also comment on the possibility of using the Moon as a platform for the installation of an ultralow frequency array.

### Introducción

La Astronomía es una ciencia bastante peculiar. Por definición trata de todo lo que está leios y, antes de la era espacial, inalcanzable. Para los astrónomos el laboratorio es el propio cosmos, pero éste diseña los experimentos por su cuenta y a nosotros sólo nos resta observarlos. Incluso hoy en día, el acceso que tenemos al universo es muy limitado. El hombre sólo ha llegado a poner el pie en el cuerpo astronómico más cercano, La Luna. Misiones no tripuladas han llegado a posarse en cuerpos más lejanos de nuestro sistema planetario, como Titán en el caso de la sonda Huygens. Otras han llegado a medir la gravedad y los campos electromagnéticos en los confines del Sistema Solar. Podemos medir aquí en La Tierra los efectos de la gravedad de La Luna y el Sol, y de un modo más indirecto los de los otros planetas. También llegan hasta nosotros los neutrinos provenientes del Sol y de las explosiones de supernovas cercanas, así como las partículas de alta energía (rayos cósmicos) que atraviesan La Galaxia. Y poco más, si no fuera por las ondas electromagnéticas (OEM), la luz. La luz, visible o no, es el verdadero mensajero del cosmos. Nos permite localizar objetos, estudiar sus movimientos, entender su composición y los procesos que en ellos ocurren. A veces incluso nos permite descubrir que no entendemos nada, por lo que necesitamos invocar la presencia de materia y energía oscuras. La luz nos llega desde lugares tan lejanos que nos permite ver como era el universo cuando solo tenía un 3 % de su edad actual (la era de la reionización), e inferir de lo que hoy vemos qué ocurrió en las épocas en las que todo era oscuridad (la era de la recombinación).

La naturaleza de la luz, o de las OEM (usaré los dos términos indistintamente), es muy peculiar. Se comporta como las ondas que se forman en la superficie de un estanque, interfiriendo entre sí. Al mismo tiempo, como las piedras que tiramos al estanque, la luz está cuantizada: podemos tirar una piedra o dos, pero no una y media. Las piedras electromagnéticas, los cuantos de luz, son los fotones. Como cualquier fenómeno ondulatorio, la luz nos llega con distintos colores igual que hay sonidos graves y agudos. Color y tono no son más que manifestaciones de una cualidad de las ondas, su frecuencia v, que no es más que el número de oscilaciones que se producen en un segundo de tiempo. Por supuesto, al igual que hay sonidos tan graves (infrasonidos) y tan agudos (ultrasonidos) que no podemos oír, no debemos pensar que los colores de la luz sólo abarcan del rojo al violeta. El espectro electromagnético, que es como solemos denominar al rango completo de tonos de la luz, abarca desde la ondas radio a muy baja frecuencia, hasta los rayos γ en el extremo opuesto, pasando por las microondas, el infrarrojo lejano, medio y cercano, la luz visible, el ultravioleta y los rayos X.

Las piedras que tiramos al estanque serán una, dos o tres, pero la energía que depositen en la superficie del agua dependerá de su tamaño y la

fuerza con que las lancemos. Con la luz ocurre lo mismo, pero lo curioso es que la energía de los fotones tiene que ver con su frecuencia. La energía de un fotón no es más que hv donde h es la constante de Plank,  $6,626\,075\,5\,10^{-34}\,\mathrm{J\,s^{-1}}$ . Como la frecuencia y la longitud de onda  $\lambda$  (la separación entre dos máximos consecutivos de las fuerzas electromagnéticas que se propagan) están relacionadas entre sí mediante la expresión  $v\lambda = c$ , siendo c la velocidad de la luz en el vacío,  $299\,792\,458\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ , la energía de un fotón también puede expresarse como  $hc/\lambda$ . De estas sencillas ecuaciones se desprende que los fotones de mayor energía son los de mayor frecuencia, esto es, menor longitud de onda, mientras que los menos energéticos serán los de mayor longitud de onda, y por lo tanto menor frecuencia.

Estas relaciones son muy importantes porque los fotones muy energéticos sólo pueden producirse en entornos también muy energéticos. Por ejemplo, los fotones de rayos  $\gamma$  se originan en reacciones nucleares a temperaturas de decenas de millones de grados o por el efecto Compton inverso<sup>1</sup>. Por el contrario, los fotones de las ondas radio pueden llegar a ser emitidos por cuerpos con temperaturas de sólo algunas décimas de grado por encima del cero absoluto (-273,15°C), pero también en fenómenos muy violentos. Los entornos energéticos pueden emitir fotones duros (alta frecuencia) o blandos (baja frecuencia). Por el contrario, los entornos con poca energía sólo son capaces de emitir señales de muy baja frecuencia. Además, no debemos olvidar que la luz que nos llega de objetos muy distantes sufre un corrimiento al rojo (aumento de la longitud de onda, expresado por  $z = \Delta \lambda / \lambda$ ), debido a la expansión del universo. Así, para observar fenómenos que ocurrieron cuando el cosmos era joven, tenemos que usar ondas mayores que las que usamos para estudiar esos mismos procesos en el universo local.

En lo que sigue me ceñiré a tres instrumentos que, en un futuro más o menos lejano, van a ser un referente en Radioastronomía para ondas de frecuencia entre  $10\,\text{MHz}$  y  $25\,\text{GHz}$  ( $25\,\text{mil}$  megaciclos), o longitudes de onda  $30\,\text{m} < \lambda < 13\,\text{cm}$ . Éste es el rango de ondas en el que nació la Radioastronomía allá por 1932, y aunque con el paso del tiempo ha habido siempre un ímpetu por subir en frecuencia, la cuna de esta ciencia sigue siendo un campo que depara y deparará muchas sorpresas.

# LOFAR (www.lofar.org)

El nombre de este telescopio situado al norte de los Países Bajos, es un acrónimo de la expresión en inglés LOw Frequency ARray, Interferómetro

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Cuando un electrón relativista (que se mueve a velocidades cercanas a la de la luz) choca con un fotón y le cede energía, no puede empujarle (pues el fotón siempre se mueve a la misma velocidad) sino que le aumenta la frecuencia.

de Baja Frecuencia. Se trata de un conjunto de radiotelescopios funcionando en modo interferométrico que va a poder trabajar en las bandas HF y VHF, desde los 30 MHz ( $\lambda = 10\,\text{m}$ ) hasta los 240 MHz ( $\lambda = 1,25\,\text{m}$ ).

En óptica, pero no sólo en el rango visible sino desde las ondas radio a los rayos γ, el detalle de las imágenes de un telescopio tiene una limitación impuesta por la naturaleza ondulatoria de la luz. Así, la resolución espacial de un instrumento (esto es, cuán detalladas son las imágenes que proporciona) nunca puede ser mejor que  $1.22\lambda/D$ , donde λ es la longitud de onda de trabajo, D es el tamaño de la apertura del telescopio y la resolución espacial angular está dada en radianes. Si expresamos la resolución en segundos de arco, la ecuación que debemos usar es  $250000\lambda/D$ . La apertura es la zona del telescopio que capta la luz. En una cámara fotográfica el tamaño de la apertura está limitado por el diafragma, que podemos abrir más o menos. En un telescopio óptico la apertura coincide con el espejo primario, y lo mismo ocurre con los radiotelescopios con forma de paraboloide. Tomemos por ejemplo la frecuencia central de LOFAR, 120 MHz. Si queremos tener una resolución de 1" necesitaremos una apertura de 600 km. Desde luego es impensable construir semejante telescopio, a no ser que se trate de un interferómetro. Un interferómetro es una serie de telescopios que trabajan conjuntamente combinando las señales que reciben. En este caso, el tamaño de la apertura será la distancia entre los elementos del instrumento más apartados entre sí, pues al fin y al cabo estamos captando luz que llega a una zona con ese tamaño. Para obtener la resolución que hemos tomado por ejemplo, bastará con tener elementos separados unos 600 km. En el caso de LOFAR la separación máxima será de 100 km, con lo que el detalle alcanzable por el instrumento será 750"/v(MHz), es decir, 25" a 30 MHz y 3" a 240 MHz.

Más o menos, todo el mundo se hace una idea de cómo se selecciona la región del cielo que se quiere observar con un telescopio óptico: simplemente se apunta hacia allí. Algo similar ocurre con los radiotelescopios simples, pero apuntar un radiointerferómetro requiere algo más que apuntar al mismo sitio con todos sus elementos. Volvamos a nuestro estanque de aguas tranquilas y tiremos una piedra relativamente grande. Las ondas que se generen serán de gran amplitud (la superficie subirá y bajará mucho). Tomemos ahora un puñado de piedras pequeñas que en conjunto pesen más o menos como la piedra grande de antes. Al tirarlas al estanque observaremos que no se forma una onda grande sino muchas pequeñas, que se estorban unas a otras; es el fenómeno de la interferencia. Si queremos que las piedras pequeñas produzcan el mismo efecto que la grande, tendrán que entrar en el agua en fase, de forma que todas las oscilaciones se sumen. Para ello no hace falta que todas las piedrecitas caigan muy juntas ni al mismo tiempo, las podríamos tirar en cualquier lugar del estanque, con tal de que las ondas de cada una de ellas se sumasen, interfiriesen constructivamente, a las de las demás. En la práctica esto es imposible, pero en teoría basta

con que la entrada en el agua de cada piedra ocurra con un retraso igual al tiempo que tardan las ondas en llegar a ese punto desde el centro; tenemos que hacer funcionar cada elemento con el desfase adecuado.



Figura 1: Elementos del interferómetro LOFAR. A la izquierda los dipolos de baja frecuencia (30–90 MHz), a la derecha los de alta frecuencia (110–240 MHz). Fotografías cortesía de www.lofar.org.

Igual ocurre en un interferómetro. Para que las señales que provienen de un punto se sumen constructivamente, hay que compensar las diferencias que existan entre los tiempos de llegada de un mismo rayo de luz a los distintos elementos del instrumento. Esto depende de la orientación del interferómetro con respecto a la zona del cielo que queremos visualizar. Haciendo uso de esta peculiaridad de los radiointerferómetros, LOFAR consigue apuntar a cualquier región del cielo sin mover nada, simplemente introduciendo los retrasos correspondientes. De hecho LOFAR no tiene partes móviles. Este tipo de telescopios se denomina interferómetro por software. La idea es muy simple. Como elementos individuales se utilizan dipolos o conjuntos de dipolos. Aislados, estos dipolos tienen la propiedad de detectar señales provenientes de todo el cielo. En cambio, el conjunto de dipolos sólo detecta la señal proveniente de la zona del cielo seleccionada mediante el conjunto adecuado de retrasos. En la práctica, las señales detectadas por cada uno de los elementos se envían por fibras ópticas a un centro de cálculo, donde se graban en discos duros. En este sitio, un gran computador correla (multiplica las señales de cada par de antenas) introduciendo un determinado grupo de retrasos, obteniendo la transformada de Fourier de la imagen de la zona del cielo seleccionada. Posteriormente se deshace esa transformación de Fourier y se limpia el mapa<sup>2</sup>. De hecho usando los mismos datos y un grupo de retrasos diferentes, puede hacerse el mapa de otra región del cielo. En teoría se podría obtener una imagen de todo el cielo completo si se dispusiese de suficiente capacidad de cálculo.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Para entender el proceso de generación de imágenes en un interferómetro se puede consultar el artículo publicado por F. Colomer en el Anuario de 1998.

Como vemos se trata de un proyecto en el que las tecnologías de la comunicación y de la computación son parte integrante del telescopio en sí y no meras herramientas auxiliares. Esto tiene la gran ventaja de que conforme pasa el tiempo los costes disminuyen y las capacidades aumentan; es la conocida ley de Moore, que se aplica no sólo a los procesadores, sino también a las líneas de comunicación y sistemas de almacenamiento de datos.

Antes de describir las líneas de investigación en las que se espera que LOFAR haga una importante contribución, describiré brevemente los parámetros más significativos del proyecto. El instrumento está compuesto por una estación central y 45 más repartidas en un área de 100 km de diámetro. Cada estación tiene 100 antenas de baja frecuencia (30–90 MHz) y otras tantas de alta frecuencia (110–240 MHz), excepto la estación central que está mucho más poblada (3200 elementos). Las estaciones externas se disponen a lo largo de cinco brazos espirales en nueve anillos, cuya distancia al centro aumenta en progresión geométrica de 1,2 km hasta los 50 km. Cada elemento producirá datos a razón de 10 Gbps (10 000 Mbps) por sensor, por lo que el centro de proceso de datos debe soportar un flujo de 900 Gbps y deberá tener una potencia de cálculo de 160 billones de operaciones por segundo. Además, esta infraestructura se va a aprovechar para instalar sismómetros y detectores de infrasonidos (para escuchar el subsuelo y analizar los movimientos que en él se producen), detectores útiles para llevar a cabo agricultura de precisión (control de plagas y condiciones ambientales), y sensores de otro tipo. Como vemos se va a utilizar LOFAR como una red neuronal de captación de datos astronómicos, geofísicos o de otra índole.

LOFAR avanza poco a poco. La estación central ya está lista y realiza observaciones de prueba con regularidad. El despliegue de la totalidad de las estaciones se espera que finalice en 2008. Una vez concluido, el potencial de LOFAR para hacer observaciones que cubran un gran campo visual será enorme. Por ejemplo, suponiendo que se observen cinco zonas del cielo al tiempo, a 30 MHz se espera que en el plazo de un año de observaciones se pueda cubrir un área de 3000 grados cuadrados (toda la bóveda celeste ocupa 41 250 grados cuadrados) con la mayor sensibilidad posible (hasta alcanzar el límite de confusión,— ver más adelante —), detectando en este tiempo más de 4 millones de objetos astronómicos.

De acuerdo con nuestro presente entendimiento de la evolución del universo, medio millón de años después del Big Bang la temperatura típica descendió por debajo de los 3000 grados, y el hidrógeno se recombinó con los electrones para quedar en estado neutro. Durante esta *Era Oscura* el universo siguió enfriándose hasta que las primeras estrellas, protogalaxias y cuásares volvieron a ionizar el gas neutro con su intensa radiación ultravioleta. Por las observaciones de galaxias muy remotas (en el tiempo y el espacio) y los resultados de los satélites COBE y WMAP, se cree

que la Época de la Reionización (EdR), cuando surgieron esas primeras fuentes de luz, tuvo que suceder para valores de corrimiento al rojo, z, entre 15 y 6. La mejor manera de observar el hidrógeno neutro atómico que llenaba el universo durante la *Era Oscura* y hasta el final de la EdR es mediante su transición de 21 cm de longitud de onda. Pero para z entre 6 y 15 estos 21 cm se trasforman en 1,5 y 3 m respectivamente, es decir, entre 100 y 200 MHz. Mediante LOFAR se podrá observar cómo ese hidrógeno atómico neutro se fue ionizando con el paso del tiempo, y de aquí entender mejor cuáles fueron esas fuentes de ionización y el porqué de la estructura actual del cosmos.

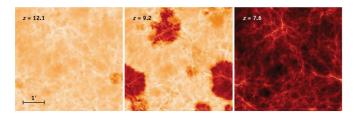


Figura 2: Simulación de la estructura del universo durante la época de la reionización. A la izquierda el universo es fundamentalmente neutro (predominan los tonos claros), mientras que a la derecha la componente más importante es el gas ionizado (tonos oscuros). Imagen cortesía de S. Furlanetto et al. y www.skatelescope.org.

Acabada la EdR, comienza la denominada Era de los Cuásares, 7 > z >1,5. Es en esta época en la que se establece la jerarquía de estructuras que vemos en la actualidad, estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias y supracúmulos de galaxias. Pero, por ejemplo, se desconoce si las galaxias se formaron por la presencia de un agujero negro supermasivo o viceversa. Durante ese tiempo las galaxias tenían una tasa de formación estelar mucho más alta que en la actualidad (de 4 a 10 veces mayor), y las que presentaban brotes de intensa formación estelar (galaxias starburst) o núcleos activos (cuásares) eran mucho más abundantes que en la actualidad (en el universo local a z < 1.5). Los núcleos activos de galaxias (AGNs) se deben a la presencia en el centro de las galaxias de un agujero negro supermasivo (centenares de millones de masas solares). Este agujero negro puede ser muy voraz, alimentándose del gas y estrellas circundantes, pero es incapaz de tragar tanta energía gravitacional como se libera con la caída de material. El resultado es la eyección de chorros de partículas a velocidades próximas a las de la luz, en dos direcciones opuestas. Los electrones acaban frenándose por choques con el material galáctico o intergaláctico, lo que hace que emitan una intensa radiación a bajas frecuencias, denominada radiación sincrotrón. Cuanto más tiempo pasa más baja es la frecuencia de

emisión, por lo que las estructuras más antiguas de estos chorros (y las más grandes), sólo de detectan a muy baja frecuencia. Se piensa que LOFAR será capaz de detectar más de 1000 de estas radiogalaxias a distancias mayores que la más distante detectada hasta la fecha. Además, LOFAR será capaz de observar galaxias starburst a distancias sin precedentes, gracias a la intensa radiación sincrotrón emitida por estos objetos y que se debe a los numerosos restos de supernova producidos por la ingente muerte de estrellas de muy alta masa (mueren a un ritmo muy alto porque también nacen a un ritmo muy elevado). En particular LOFAR podrá detectar objetos similares a la galaxia starburst Arp 220 (situada a z=0.018) a distancias de z=3.3. LOFAR también será capaz de detectar la emisión difusa que rodea los cúmulos de galaxias, permitiendo estudiar la influencia de estos halos en la formación y evolución de dichos cúmulos.

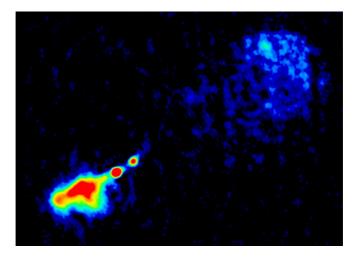


Figura 3: Imagen de la radiogalaxia 3C 236, probablemente el objeto individual más grande del universo (4 Mpc de tamaño). Se trata de una galaxia con núcleo activo, que se situaría a mitad de camino de los puntos calientes cerca del centro del cuadrante inferior izquierdo de la figura. La nebulosidad compacta e intensa situada más abajo y a la izquierda, y la más grande y difusa arriba a la derecha, trazan la presencia de electrones ultrarelativistas emitidos por el agujero negro supermasivo. La diferencia de intensidad entre ambos lóbulos se debe al carácter fuertemente directivo de la radiación sincrotrón, siendo el lóbulo inferior-izquierdo el que apunta hacia nosotros. Imagen cortesía de R. Schilizzi y www.evlbi.org.

Se espera que LOFAR también contribuya a esclarecer el problema del origen de los rayos cósmicos de muy alta energía. Los posibles candidatos

que se barajan son los choques en los chorros de partículas de radiogalaxias particularmente intensas o las fuentes de rayos γ. La observación en ondas radio de baja frecuencia de la radiación sincrotrón de estos dos tipos de objetos será sin duda crucial en este tema. Por otra parte, LOFAR también será capaz de medir la entrada de estos rayos cósmicos en la atmósfera. Trabajando a modo de radar, podrá detectar los ecos que se generarán en las zonas ionizadas de la atmósfera que surgen debido a los impactos de esas partículas tan energéticas. Usando únicamente su nodo central, LOFAR será capaz de observar el cielo visible desde el norte de Europa (2/3 del total del cielo) diariamente, lo que permitirá la detección casi instantánea de objetos que muestren una inusual actividad. Estos objetos podrán ser estudiados instantáneamente con más detalle usando el instrumento en su totalidad.

A distancias más próximas, en el universo local, La Galaxia y el propio Sistema Solar, son muchos los proyectos que se podrán abordar. Se espera que se pueda completar el censo de supernovas en nuestra Galaxia, y compararlo con el que se realizará en otros objetos con más alta tasa de formación estelar como la galaxia *starburst* M 82. Se podrán estudiar las propiedades del medio interestelar, separando la emisión térmica (gas caliente) y sincrotrón, y se descubrirán más de 1500 nuevos púlsares. Finalmente se espera poder comprender la emisión de muy baja frecuencia que se origina en la magnetosfera de Júpiter, e incluso tratar de usar este tipo de emisión como otro método para detectar la presencia de planetas gigantes alrededor de estrellas cercanas similares a nuestro Sol.

Aunque el detalle que alcanzarán las imágenes tomadas por LOFAR a baja frecuencia será mucho mejor que lo que hoy en día se puede hacer, una resolución de 25" a 10" plantea un problema fundamental; enseguida se llega al límite de confusión. Cuando se realizan mapas de alta sensibilidad pero poca resolución espacial ocurre que llega un punto en el que se observa un ruido de fondo en las imágenes, que no desaparece por mucho que se aumente el tiempo de exposición. Este ruido de fondo no es ruido sino la emisión de multitud de radiofuentes que, al estar más próximas entre sí que la resolución del telescopio, no llegan a distinguirse. Cuando se alcanza este punto, la sensibilidad del instrumento no puede mejorarse aumentando su superficie colectora o disminuvendo el ruido de sus receptores. Lo único que se puede hacer es mejorar su resolución espacial, lo que en el caso de un interferómetro quiere decir añadir más estaciones y situarlas más lejos del centro del instrumento. Es por esto que aún no habiéndose completado la instalación del LOFAR original, va se está trabajando para aumentar un factor 10 la separación máxima entre sus estaciones. Se pasaría de 100 a 1000 km, y por lo tanto se aumentaría la resolución de las imágenes también en un factor 10, es decir, el problema de la confusión se reduciría en un factor 100 en número de fuentes.

Para conseguir esto las autoridades de los Países Bajos ya han iniciado

conversaciones, y hasta conseguido acuerdos, con los países de su entorno. Francia, Italia, el Reino Unido, Suecia y Polonia han demostrado su interés por unirse al proyecto. Este LOFAR extendido consistiría en unas 16 estaciones de observación adicionales, que sólo requerirían de un aumento de cálculo en el correlador y conexiones de internet adicionales (el flujo de datos aumentaría hasta 1 200 Gbps). Normalmente las estaciones se situarían en otros observatorios con lo que la existencia de canales de datos de alta velocidad está garantizada. El aumento de la potencia de cálculo necesario tampoco debe representar ningún problema, porque la ley de Moore garantizaría la disponibilidad de una mayor capacidad de cómputo para la fecha en que el interferómetro extendido entrase en funcionamiento, hacia 2010.



Figura 4: Posible distribución de las estaciones LOFAR en el proyecto extendido. Imagen cortesía de www.lofar.org.

Además de disminuir drásticamente el problema de la confusión de fuentes, la disponibilidad de una resolución espacial diez veces mayor también amplía el horizonte de los objetos y fenómenos que se podrían explorar con semejante instrumento. En el Sistema Solar se podría estudiar el comportamiento del propio Sol, tratando de entender cómo surgen y se desarrollan las tormentas solares. Estas eyecciones de material se propagan en el medio interplanetario afectando a los sistemas de comunicación por satélite y a la propia ionosfera de La Tierra. Se espera que mediante la observación continua del Sol durante unos segundos cada varios minutos, podamos ser capaces de predecir el tiempo solar (tormentoso, estable, variable), y adoptar medidas para mitigar sus efectos en La Tierra. También

podrán estudiarse los cinturones de radiación de Júpiter e investigar su existencia en Saturno. Estos cinturones de radiación no son más que partículas de alta energía (rayos cósmicos) que quedan atrapadas por el campo magnético de los planetas, y que emiten ondas radio por debajo de los 300 MHz. Dada la alta capacidad destructiva de los rayos cósmicos, la habilidad de un planeta para capturar esas partículas en cinturones de radiación resulta fundamental para el desarrollo de la vida. Precisamente, la entrada de los rayos cósmicos por los polos de la Tierra (la zona más desprotegida) es lo que da origen a las auroras boreales, que también podrían ser estudiadas en Júpiter. Incluso podría llega a detectarse la emisión radio de las descargas eléctricas atmosféricas, es decir, los rayos, en las atmósferas de otros planetas del Sistema Solar.

### SKA (www.skatelescope.org)

La idea que subyace detrás del proyecto SKA es muy sencilla, lo dice su propio nombre. SKA es el acrónimo del inglés Square Kilometer Array. Es decir, Interferómetro de un Kilómetro Cuadrado, y eso es de lo que se trata. Este proyecto, del que se empezó a hablar allá por los años 1990, pretende la construcción de un conjunto de radiotelescopios cuyas áreas de apertura sumen un total de un kilómetro cuadrado. Así de sencillo y así de ambicioso. Un kilómetro cuadrado es la superficie de un cuadrado que tenga un kilómetro de lado, o la de un círculo de 1128 m de diámetro, o si lo prefieren una parcela de 100 hectáreas. En la actualidad el radiotelescopio simple más grande es todavía la antena fija de Arecibo<sup>3</sup> en Puerto Rico (1963); un círculo de 305 m de diámetro con una superficie de apertura de 73 000 m<sup>2</sup>, es decir, un 7,3 % de lo que sería el SKA. Las 50 antenas del proyecto ALMA<sup>4</sup> de 12 m de diámetro sólo suman 5650 m<sup>2</sup>, mientras que las 27 antenas de 25 m del VLA<sup>5</sup> representan el 1,3 % del SKA. Como podemos ver el salto cuantitativo no es nada despreciable. De hecho hacia 1990 semejante instrumento representaba una mejora en un factor 100 para estudios de líneas espectrales, y de un factor 1000 para observaciones del radiocontinuo. Aunque hoy en día esos factores no son tan grandes, debido a proyectos como LOFAR y la mejora de los telescopios ya existentes, la construcción del SKA seguirá permitiendo observar objetos de 10 a 100 veces más débiles que lo que puede hacerse con la instrumentación presente.

Podemos imaginar el SKA como una versión ampliada de LOFAR, o a LOFAR como un mini-SKA. Ambos comparten el modo de funcionamiento de interferómetro por software, con capacidad para observar distin-

<sup>3</sup>http://www.naic.edu

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Para más detalles sobre ALMA ver el artículo de R. Bachiller en el Anuario de 2001.

<sup>5</sup>http://www.vla.nrao.edu

tos puntos del cielo al mismo tiempo, dependiendo del conjunto de retrasos introducidos entre las distintas estaciones. En el interferómetro SKA tampoco se van a instalar todas las antenas de un modo contiguo, ocupando un área de un kilómetro cuadrado, sino que se repartirán sobre una superficie mucho mayor, para así aumentar el poder de resolución del telescopio. El 50 % de la superficie colectora se concentrará en un área de unos 5 km de diámetro, el 37,5 % en un área de hasta 150 km, mientras que el resto (12,5 %) se distribuirá sobre distancias de al menos 3000 km. En total SKA agrupará unas 2000 antenas distribuidas en unas 100 estaciones de observación.



Figura 5: Recreación gráfica del aspecto del núcleo central del SKA. En primer plano las antenas de baja frecuencia. Al fondo las antenas que se podrían usarse a frecuencias más altas. Imagen cortesía de www.skatelescope.org y www.xilostudios.com.

Aunque conceptualmente LOFAR y SKA son muy similares, el segundo resulta un proyecto mucho más complejo. En primer lugar se trata de un telescopio más grande y en segundo lugar se pretende que trabaje entre  $100\,\mathrm{MHz}$  y  $25\,000\,\mathrm{MHz}$  (ó  $25\,\mathrm{GHz}$ ), es decir,  $\lambda=12\,\mathrm{mm}-3\,\mathrm{m}$ . La resolución espacial máxima esperada será pues de  $0.000^\circ$ 25 a  $100\,\mathrm{MHz}$  y  $0.0000^\circ$ 10 a  $25\,\mathrm{GHz}$  (50 veces mejor que la del Telescopio Espacial Hubble). Además de este excelente detalle, SKA será capaz de producir imágenes gigantescas que cubran una gran región del cielo (hasta 50 grados cuadrados a  $1\,\mathrm{GHz}$  con una resolución de  $0.0000^\circ$ 25, es decir, imágenes de  $500\,\mathrm{mil}$  millones de píxeles). La potencia de cálculo exigida para generar estos mapas y procesarlos es impresionante, se necesitan realizar centenares de billones de operaciones por segundo. Además, se necesitan líneas de datos con capacidades de millones de Mbps para transmitir la información desde

las estaciones al centro de proceso. Nuevamente se confía en que siga cumpliéndose la ley de Moore, que duplica la velocidad de cálculo cada año y medio, la capacidad de almacenamiento de datos cada año, y la velocidad de transmisión cada 9 meses.

A λ3 m la tecnología a usar será similar a la de LOFAR, pero a λ12 mm tiene que ser radicalmente distinta pero, eso sí, manteniendo un coste total ajustado, entorno a los 1300 millones de euros (más 70 M€ al año de gastos de funcionamiento). El SKA representa un reto científico, tecnológico, industrial y logístico nada trivial. A fecha de hoy no está decidido qué tipo de antenas se usarán en el rango de mayor frecuencia. Existen varias opciones pero está por demostrar su viabilidad técnica y económica. De hecho está previsto que entre 2009 y 2012 se construyan distintas versiones del SKA a escala de un 1 %, a fin de comprobar fehacientemente cuál de las distintas tecnologías es la más adecuada. Tampoco se ha tomado una decisión definitiva sobre el emplazamiento del instrumento, aunque en 2006 la lista de posibles lugares se ha reducido a dos: Australia y el sur de África.



Figura 6: Localización de los nodos del interferómetro SKA propuestos para la opción sudafricana. Imagen cortesía de www.ska.ac.za.

Por las características del instrumento, la ciencia que se espera hacer con el SKA es en gran medida similar (aunque de mayor alcance) a la que he descrito para el caso de LOFAR. Aunque el SKA contribuirá de un modo muy significativo en numerosas campos de la Radioastronomía y la Astronomía en general, se han definido hasta cinco proyectos claves, suficientemente importantes como para condicionar incluso los parámetros fundamentales que caracterizan este telescopio. A estos proyectos científicos se les ha exigido que cumplan al menos tres condiciones: que se

centren en problemas fundamentales para la Física y/o la Astrofísica, que sean áreas en las que la Radioastronomía sea la mejor manera de abordar el problema, bien por sí sola o en combinación con otras técnicas de observación a otras longitudes de onda, y que sean problemas que preocupen a una gran comunidad científica, no sólo a expertos en Radioastronomía de bajas frecuencias. Estos proyectos clave son: la Cuna de la Vida, Gravitación en Condiciones Extremas, el Origen y Evolución de los Campos Magnéticos Cósmicos, el Origen y Evolución de las Galaxias, y por último la Observación de la Era Oscura. Además, no podemos olvidarnos del hecho de que con cualquier instrumento significativamente mejor que los anteriormente existentes, siempre se descubren objetos o fenómenos simplemente impensables hoy en día.

La Cuna de la Vida. Las estrellas similares a nuestro Sol, antes de empezar a quemar hidrógeno en su núcleo, pasan por una fase denominada de estrella T Tauri, en la que su luz se debe a que el gas que forma la estrella todavía se está compactando y por lo tanto liberando energía gravitacional. Las estrellas T Tauri están rodeadas de un disco de polvo y gas que gira a su alrededor: es en este disco donde se forman los planetas que orbitarán entorno a la estrella y que, dependiendo de sus condiciones físicoquímicas, serán capaces o no de albergar vida tal y como nosotros la entendemos. Se cree que los planetas se forman por agregación de esos granos de polvo. Por debajo de un milímetro es muy difícil que un choque entre dos granos los destruya, por lo que formar partículas de ese tamaño a partir de granos mucho más pequeños<sup>6</sup> no plantea ningún problema. Objetos de un metro o mayores ya son capaces de aglutinar otras partículas, gracias a su atracción gravitatoria, y seguir creciendo hasta alcanzar tamaños de miles de kilómetros; es decir, hasta alcanzar el tamaño de un planeta como La Tierra. En cambio, lo que ocurre con los objetos entre un milímetro y un metro no está claro. Fundamentalmente estos granos emiten luz a longitudes de onda un poco más pequeñas que su tamaño, es decir, en el rango de alta frecuencia del SKA. Con su excelente sensibilidad y resolución angular, SKA podrá observar como crecen esos granos en objetos situados hasta distancias de 150 pc (unos 500 años luz), lo que incluye las poblaciones de estrellas T Tauri de las nubes de Tauro, Ofiuco v Camaleón.

Una vez que los planetas se forman, especialmente los de tipo gigante como Júpiter, su presencia altera la estructura de esos discos circunestelares, creándose huecos, al igual que la influencia de las lunas de Saturno crea discontinuidades en el anillo de polvo de este planeta. El SKA también podrá detectar la presencia de uno de estos planetas en formación gracias a la discontinuidad generada en el disco. De hecho se podría llegar a detectar el giro del protoplaneta, puesto que para estrellas de tipo solar, el periodo orbital de los planetas cercanos será del orden de años. Repitiendo la obser-

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>El tamaño típico de un grano de polvo interestelar es de unas milésimas de milímetro.

vación de un objeto cada pocas semanas, es posible que se distinga el giro de las irregularidades que produciría la atracción gravitatoria del planeta en el gas y el polvo del disco.

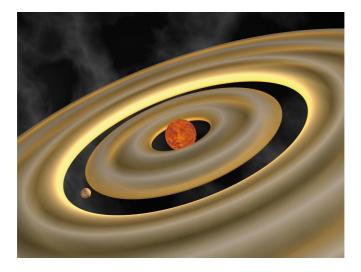


Figura 7: Recreación gráfica de la formación de un planeta gigante en el disco circunestelar de una estrella T Tauri. Imagen cortesía de Michael Kramer y www.skatelescope.org.

Claro está que detectar un planeta con condiciones habitables no es sinónimo de haber encontrado vida extraterrestre, y mucho menos vida inteligente. Aunque se supone que moléculas como el ozono y el metano son buenos indicadores de la existencia de vida (en este campo ALMA va a contribuir sin duda con notables descubrimientos), estos compuestos pueden originarse en entornos carentes de vida. En cierto sentido, es más fácil detectar vida extraterrestre inteligente. La sensibilidad del SKA será tal que si una civilización extraterrestre dispusiera de un sistema de radar similar al existente en Arecibo, podría llegar a detectarse a una distancia de entre 5 000 y 15 000 pc: es decir, a lo largo de todo el plano galáctico. Además, es precisamente entre 1 y 10 GHz donde cabría esperar este tipo de emisiones intencionadas, pues a estas frecuencias ni la emisión sincrotrón ni la de los granos de polvo las enmascararía. Como argumentaba Carl Sagan ya hace tiempo, para que dos civilizaciones se encuentren, tan importante es escuchar como transmitir. No obstante, incluso si una civilización extraterrestre no emitiese señales con el propósito de darse a conocer, sería posible detectar otro tipo de transmisiones, TV, radares de aeropuerto, etc., pero en un rango de distancias más pequeño, hasta centenares de años luz.

Gravitación Extrema. La teoría de la Relatividad General de Einstein ¿es 100 % correcta? Como es fácilmente comprensible, la respuesta a esta pregunta es de un enorme interés, no sólo para los astrofísicos sino para la Ciencia en general. De momento la respuesta es sí, incluso en los casos más extremos que se han podido medir, pero esto podría no ser así en el futuro. De hecho los físicos teóricos que trabajan en la búsqueda de un modelo unificado para todas las fuerzas, y que pasaría necesariamente por la cuantización de la gravedad, piensan que la última palabra no está dicha. Newton falla estrepitosamente en el caso de Mercurio porque este planeta está demasiado cerca del Sol como para despreciar las correcciones de la Relatividad General. De igual forma, los físicos teóricos piensan que las leyes de la Teoría de la Relatividad no se cumplen al 100 % cuando se trata de sistemas que se mueven a alta velocidad y en presencia de campos gravitatorios muy intensos; por ejemplo, un cuerpo orbitando muy cerca de un agujero negro.

Hasta la fecha no se han encontrado este tipo de sistemas binarios. Pero con la gran potencia detectora del SKA se espera que se detecten una buena parte de todos los púlsares<sup>7</sup> de nuestra galaxia, unos 20 000, de los cuales más de 1 000 tendrían periodos del orden del milisegundo. En estas circunstancias no sería de extrañar que se detecten sistemas compuestos por un púlsar y un agujero negro estelar (surgido de la explosión supernova de una estrella de más de 20 masas solares), por un púlsar y un agujero negro de tipo medio (como los que parecen existir en algunos cúmulos de estrellas), e incluso por un púlsar y un agujero negro supermasivo (como el del centro de La Galaxia). La observación sistemática de estos sistemas, con un preciso control del periodo del púlsar, permitirá medir con total exactitud la órbita del púlsar alrededor del agujero negro. De esta manera se podrá verificar la validez o no de la Relatividad General en condiciones límite.

Por otra parte, observando repetidas veces un grupo numeroso de púlsares de periodo muy corto (milisegundos), se puede construir un gran detector de ondas gravitacionales. Una vez tenidos en cuenta los efectos del movimiento relativo entre un púlsar y La Tierra, y el secular pero predecible aumento del periodo del púlsar debido a su continua pérdida de energía, otras anomalías detectadas podrían deberse al paso de una onda gravitacional. Estas ondas han sido predichas pero no directamente

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Un púlsar es el resultado de la explosión supernova de estrellas entre 10 y 20 masas solares. En la explosión se expulsa toda la estrella excepto un pequeño núcleo, formado casi exclusivamente por neutrones. Estas estrellas de neutrones rotan hasta 1000 veces por segundo. Es tal la masa del objeto y la velocidad de giro, que esta velocidad permanece muy estable, simplemente gracias a la gran inercia del sistema. En realidad, la velocidad decrece con el tiempo pero de una forma predecible. Estos objetos emiten chorros de electrones a lo largo de las dos direcciones que definen su eje de giro. Estos electrones emiten una radiación de tipo sincrotrón que sólo es visible desde La Tierra si el haz nos enfoca, como ocurrirá con un faro costero. De esta manera, midiendo la frecuencia con que nos llegan esos pulsos de energía se calcula la frecuencia de giro de la estrella de neutrones con gran precisión.

observadas hasta la fecha<sup>8</sup>. Si una de estas ondas atravesase el espacio entre nosotros y alguno de esos púlsares, las oscilaciones de la fuerza de la gravedad retrasarían y adelantarían la llegada de las señales emitidas por el púlsar de un modo fácilmente reconocible.

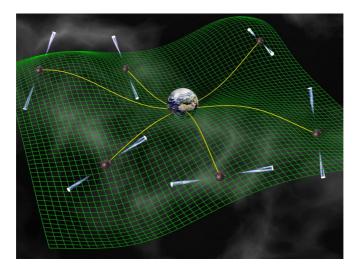


Figura 8: Mediante la observación continuada y con altísima precisión de la velocidad de giro de un conjunto de púlsares, se podría detectar el paso de una onda gravitatoria gracias a las perturbaciones inducidas en la estructura del espaciotiempo. Imagen cortesía de Michael Kramer (Sterne und Weltraum) y www.skatelescope.org.

Origen y Evolución de los Campos Magnéticos Cósmicos. No se puede tener una comprensión acertada del universo sin entender el papel que desempeñan los campos magnéticos. Si dejamos de un lado la fuerza oscura, sólo existen dos tipos de fuerza que actúan a gran distancia, la Gravedad y el Electromagnetismo. El universo a gran escala es neutro (puede estar ionizado, pero la suma de iones positivos y negativos se cancela), por lo que la fuerza eléctrica puede despreciarse. Gravedad y Magnetismo son pues las dos únicas fuerzas (junto con la fuerza oscura) que controlan la estructura del cosmos y su evolución. Todavía no se entiende bien el origen del magnetismo a gran escala. El SKA, por sus frecuencias de trabajo y su facultad para detectar la polarización de las

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Se sabe de su existencia por los estudios realizados por Russell Alan Hulse y Joseph Hooton Taylor en el sistema binario PSR B1913+16 (J1915+1606), que les valieron el premio Nobel de Física en 1993. En este sistema binario compuesto por dos púlsares, la evolución de las órbitas de los objetos sólo se explica si se tiene en cuenta la pérdida de energía que genera la emisión de ondas gravitacionales.

emisiones recibidas, está perfectamente capacitado para arrojar luz sobre este asunto. La intensidad de la radiación sincrotrón en las radiogalaxias mide la intensidad del campo magnético, y su ángulo de polarización su orientación. Este ángulo cambia según la frecuencia de observación debido a que el medio interestelar e intergaláctico están parcialmente ionizados. Pero precisamente la medida de este ángulo de rotación nos informa del valor medio del campo magnético a lo largo del camino recorrido por la luz. También se puede medir el campo magnético mediante el desdoblamiento de líneas espectrales de algunas moléculas como el radical hidroxilo, OH. Este tipo de observaciones serán capaces de determinar el valor del campo magnético en nubes moleculares neutras, por oposición a las medidas anteriormente citadas que trazan el gas ionizado. Resultará particularmente interesante estudiar la presencia de campos magnéticos muy extensos en galaxias de alto z. Si estos campos se originan por efecto dinamo (por el giro de un cuerpo conductor eléctrico, como en La Tierra) no deberían ser intensos en galaxias jóvenes, pues se sabe que el efecto dinamo tarda del orden de 1000 millones de años en desarrollar un campo magnético a gran escala.

Origen y Evolución de las Galaxias y Observación de la Era Oscura. No me vov a detener mucho en estos dos temas estrella para el SKA. pues en gran medida son compartidos por LOFAR y su importancia ya ha sido explicada páginas atrás. Respecto al primero de estos temas, sólo comentar que la posibilidad de observar máseres de vapor de agua con el SKA, permitirá medir la constante de Hubble con precisión del 1 % (un factor 10 mejor que las presentes medidas). Se han observado estos máseres girando alrededor de los agujeros negros supermasivos de algunas galaxias. La gran sensibilidad y resolución angular del SKA permitirá medir los movimientos orbitales de las zonas de emisión. Gracias al efecto Doppler se puede medir la velocidad de esas emisiones, mientras que la repetición de las observaciones muestra el movimiento de esas mismas zonas de emisión en unidades de ángulo subtendido por unidad de tiempo. Evidentemente unas y otras medidas están relacionadas entre sí mediante la distancia al objeto. De esta forma se pueden determinar distancias trigonométricas a galaxias lejanas, y de aquí calcular la constante de expansión del universo con mucha mejor precisión, mediante el estudio de un gran número de estos máseres.

En el segundo de los temas, añadir que la sensibilidad del SKA puede permitir la detección directa de las primeras fuentes de ionización, estrellas supermasivas (más de 200 masas solares) y los primeros agujeros negros. Nótese también que a z=10, la transición J=2-1 del monóxido de carbono (la molécula más abundante en el universo después del hidrógeno molecular), que normalmente se observa a 230 GHz, cae en la banda de 20 GHz. Esto posibilita que el SKA estudie el contenido molecular de las protogalaxias en formación antes del fin de la EdR.

Este instrumento impresionante sólo será posible aunando los esfuerzos de todos los radioastrónomos. Hoy en día, el SKA es un proyecto internacional en el que participan 17 países, representados por más de 50 instituciones, entre las que se encuentra el Observatorio Astronómico Nacional. Todavía queda mucho camino que recorrer, pero el futuro es esperanzador. Se espera que en 2010 se tome una decisión sobre el emplazamiento definitivo. En 2012 deberá estar decidida la tecnología a usar en cada longitud de onda. Para 2014–2016 se espera tener construido el 10 % de este interferómetro, iniciándose su uso científico. SKA estaría finalizado hacia 2020–2022.

#### **FSMBULFRIA**

FSMBULFRIA es un nombre de mi invención que de seguro no se corresponderá con ningún telescopio futuro, pero que describe perfectamente el último caso que quiero presentar brevemente: el Radiointerferómetro de Muy Baja Frecuencia de la Cara Oculta de La Luna (Far Side of the Moon Based Ultra-Low Frequency Radio Interferometric Array).

¿Un radiotelescopio en La Luna? En primer lugar cabe preguntarse para qué hace falta semejante instrumento, habida cuenta de lo compleja que sería su instalación y funcionamiento. La atmósfera, esa delgada capa que nos permite respirar y nos protege de los rayos X y ultravioletas, tiene su lado negativo; enturbia las observaciones astronómicas que se realizan desde tierra. Este efecto es bien conocido en luz visible, es el titileo de las estrellas, pero afecta en mayor o menor medida a todas las longitudes de onda. En las capas superiores de la atmósfera, entre 50 y 400 km de altura, se encuentra la ionosfera. Esta es una zona en la que los rayos X y ultravioletas ionizan los átomos y las moléculas, arrancándoles electrones. Estos electrones libres hacen que las ondas radio por debajo de una determinada frecuencia sean reflejadas. El valor en ciclos de esta frecuencia de corte es  $9.10^3 \sqrt{N}$ , siendo N la densidad de electrones libres por cm<sup>3</sup>. Aunque fluctúa con la cantidad de radiación solar incidente, normalmente se alcanzan valores de N de  $10^6$  e<sup>-</sup>/cm<sup>3</sup>, por lo que la frecuencia de corte es de unos 10 MHz. Por esto los radioaficionados usan frecuencias más bajas, la banda HF, pues al rebotar sus emisiones en la ionosfera pueden alcanzar lugares mucho más distantes. La misma razón impide que las señales de objetos exteriores lleguen hasta nosotros, a no ser que instalemos un radiotelescopio a más de 500 km de altura. Tal radiotelescopio debería estar protegido de la emisión de la propia Tierra, por lo que un lugar ideal para su instalación sería la cara oculta de La Luna.

Establecer un radiotelescopio en La Luna plantea muchos problemas que no pasarán desapercibidos al lector. Hay que transportar los materiales hasta allí. Hay que transportar a los técnicos (humanos o robóticos) que lo instalen y lo mantengan en funcionamiento. Habrá también que enviar

los resultados hasta La Tierra, pues doy por hecho que ningún astrónomo va a subir hasta allí para realizar sus observaciones. Como no soy un experto en cosmonáutica no voy a tratar esos aspectos. Sí diré que hoy por hoy se piensa que para su instalación y funcionamiento se necesitará personal humano. Se habla de una posible base lunar, de igual forma que existe una base en el Polo Sur terrestre que da soporte allí a numerosos experimentos. Para que el telescopio no quedase cegado por el Sol, sólo se realizarían observaciones durante la noche lunar, de 14 días de duración. Pero precisamente durante este periodo no se podrían usar placas solares para la obtención de energía. Llegamos pues a la conclusión de que el instrumento debería funcionar con baterías durante dos semanas seguidas. El transporte de los datos plantea otra dificultad, pues desde la cara oculta no se pueden enviar directamente a La Tierra. Habría que disponer de un satélite de comunicación que orbitase La Luna y transmitiese los datos en diferido.

La instalación de un radiotelescopio en La Luna es una noticia recurrente, que recientemente ha cobrado más interés tras el anuncio por parte de la administración estadounidense, de su intención de volver a pisar nuestro satélite hacia 2020. De hecho la NASA ha seleccionado esta idea como una de las mejores para llevar a cabo en este hipotético regreso a La Luna. ¿Cómo sería este telescopio? Un diseño similar al de LOFAR resultaría muy ventajoso. Es simple, no tiene partes móviles y está bien adaptado para trabajar a bajas frecuencias. No parece casualidad pues que gigante aeroespacial europeo EADS y Astron, el instituto que lidera LOFAR, hayan firmado en 2006 un acuerdo para el desarrollo conjunto de un prototipo. No se trataría de un radiointerferómetro muy grande, pues el medio interplanetario emborrona mucho las imágenes a baja frecuencia, y por tanto la resolución espacial necesaria no es muy alta. A 10 MHz ( $\lambda = 30 \,\mathrm{m}$ ) se pueden obtener imágenes con 1' de arco de resolución a pesar del centelleo interplanetario, lo que se alcanza con un interferómetro de 100 km de tamaño (a 1 MHz sólo se requieren 10 km para alcanzar la resolución máxima que permite el centelleo). Estas pobres resoluciones permiten construir un telescopio que patrullase todo el cielo, haciendo mapas cada muy poco tiempo.

¿Qué se estudiaría con semejante instrumento? En primer lugar, nos asomaríamos al cosmos por una ventana jamás antes abierta. Detectaríamos la emisión ciclotrón (una versión menos energética de la emisión sincrotrón) de los cinturones de radiación de los planetas, del Sol y de radiofuentes intensas (cuásares, púlsares, etc.). Estudiaríamos las propiedades del propio medio interplanetario. Y como no, también buscaríamos vida inteligente más allá del Sistema Solar.

¿Se construirá el FSMBULFRIA? A lo mejor dentro de otros catorce años les doy la respuesta.