

Reimpresión de un artículo publicado en la edición de 2001 del Anuario del Observatorio Astronómico, publicado anualmente por el Instituto Geográfico Nacional de España.

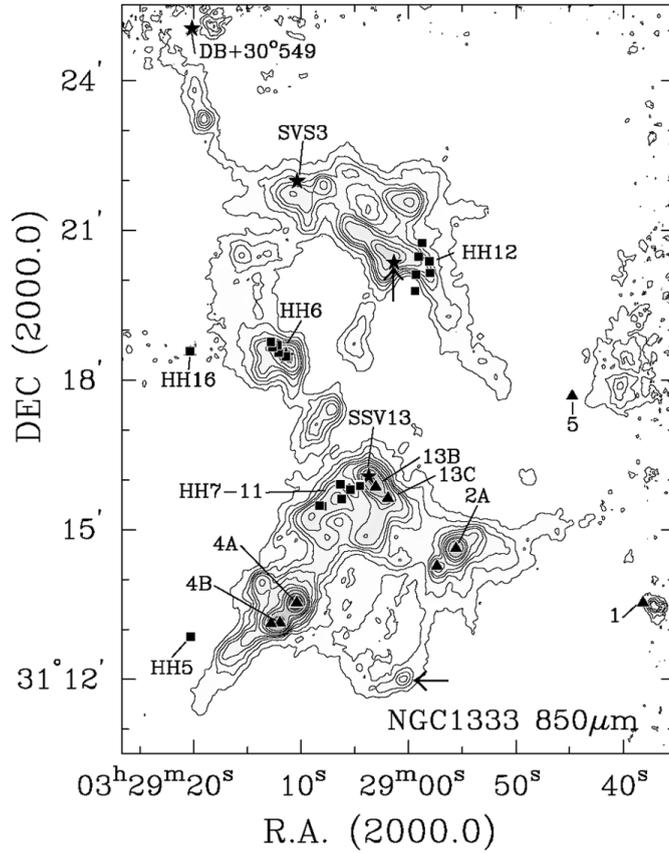


Imagen en el continuo a 850 micras de longitud de onda de la región de formación estelar NGC1333 obtenida por Sandell y Knee con el telescopio "James Clark Maxwell" en Mauna Kea en 1999. Los contornos muestran las regiones de mayor concentración de polvo (y por tanto de gas) interestelar. En las regiones más densas se encuentran protoestrellas que son observables en el infrarrojo (marcadas con símbolos de estrellas de 5 puntas) o en ondas submilimétricas (marcadas con triángulos). Los objetos de Herbig-Haro (marcados con cuadrados) son pequeñas nebulosidades asociadas con las violentas eyecciones bipolares que emergen de las estrellas recién formadas.

ALMA
EL GRAN INTERFEROMETRO DE ONDAS MILIMETRICAS
DE ATACAMA

Rafael Bachiller

Observatorio Astronómico Nacional (OAN)
Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Abstract

The Atacama Large Millimeter Array project, or ALMA, is a large interferometer which will enable precision imaging observations at millimeter and submillimeter (mm/submm) wavelengths. ALMA will consist of at least 64 high-precision parabolic antennas of 12 m diameter to be installed at Llano de Chajnantor, a 5000 m altitud plateau in the Atacama desert (northern Chile). ALMA will study the *cold universe*, i.e. the cold regions of the cosmos where galaxies, stars and planets are formed. In the mm/submm waves, ALMA will provide similar image quality and clarity to those provided by the Very Large Telescope (VLT) or the Next Generation Space Telescope (NGST) in the optical and the infrared ranges. ALMA, VLT, and NGST are thus complementary telescopes which will revolutionize most areas of astrophysical research in the next coming decades.

Astronomía milimétrica y submilimétrica

La Astrofísica llega al siglo XXI enfrentándose con varios problemas fundamentales en la comprensión del cosmos. Por ejemplo, la formación de los planetas, de las estrellas, de las galaxias y, naturalmente, del universo como un todo, permanecerán entre los objetivos prioritarios durante al menos una buena porción del siglo que comienza.

Las observaciones demuestran que una buena parte de los procesos físicos que dominan la formación de planetas, estrellas y galaxias, así como la evolución temprana de todos estos objetos, suceden en un medio material a muy baja temperatura (típicamente entre 10 y 100 grados Kelvin¹). Este “universo frío” apenas emite radiación óptica, ni de frecuencias más altas (ultravioletas, rayos X, etc), es decir, no es observable con los telescopios convencionales. Sin embargo, esta materia fría sí que emite radiaciones en ondas de radio, preferiblemente en los rangos milimétrico y submilimétrico (mm/submm) del espectro².

¹Los grados Kelvin se miden con respecto al cero absoluto de temperatura, que corresponde a -273 grados Celsius.

²Longitud de onda entre unas decenas de micras y unos 10 milímetros.

Las estrellas son gigantescas factorías de elementos pesados que, a su vez, forman pequeñas partículas sólidas: los granos de polvo. El polvo se eyecta al medio interestelar al final de la vida de las estrellas y allí, mezclado con gas molecular, actúa como una pantalla que nos impide ver las nuevas estrellas y los planetas que se forman en el seno de esas nubes. De la radiación emitida por los objetos oscurecidos (ya sean protoestrellas, protoplanetas o núcleos de galaxias externas) tan sólo las ondas mm/submm son capaces de escapar de la nube que los envuelve. Por lo tanto, tan sólo gracias a esas radiaciones es posible “ver” (observar) esos objetos en formación.

Por otro lado, la radiación propia del polvo interestelar tiene lugar en el mismo dominio mm/submm y lo mismo sucede con las moléculas que constituyen el gas de las nubes interestelares. El estudio de estas radiaciones proporciona el único medio de diagnóstico fiable sobre las condiciones físicas (densidad y temperatura) y la composición química del ámbito en que se forman las estrellas. Este mismo tipo de medidas es lo que permite estudiar las nubes de gas y polvo que envuelven los núcleos de las galaxias lejanas.

Como en otros rangos del espectro electromagnético, la radiación mm/submm puede ser de dos tipos: radiación continua y líneas espectrales. El continuo mm/submm es una radiación similar a la de un cuerpo negro que tiene su máximo de emisión entre 100 micras y 1 mm y que se origina en el polvo interestelar. Estos fotones forman una radiación relativamente tenue y difusa, pero acaba contribuyendo con una gran densidad de energía tanto al fondo de la Vía Láctea como al fondo extragaláctico. De hecho, los fotones submilimétricos son los más abundantes del universo.

Las líneas espectrales que se observan en el rango mm/submm se forman, preferentemente, en el gas molecular de las nubes interestelares y circunestelares. Las transiciones entre los niveles rotacionales más bajos de un gran número de moléculas (esto es, los fotones emitidos cuando una molécula rotante frena su giro) tienen lugar en el dominio mm. Una línea espectral tiene una longitud de onda muy concreta, lo que hace de ella una “firma” inequívoca de la presencia de la molécula correspondiente. En el dominio mm/submm hay más de 1000 líneas espectrales conocidas. Este alto número de líneas espectrales, junto con las razones mencionadas antes, hacen del rango mm/submm el más apropiado para el estudio de las nubes interestelares, de sus objetos embebidos y, en resumen, de todo el ‘universo frío’.

Resulta por tanto que la banda mm/submm tiene para el astrónomo actual un interés estratégico clave, pues ésta es la banda que permite abordar muchos de los problemas centrales que permanecen abiertos en la alborada del nuevo siglo.

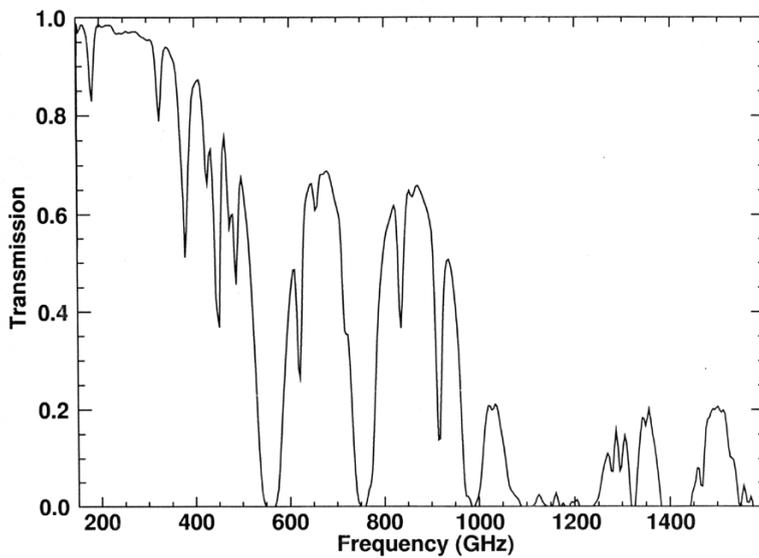


Figura 1: Transmisión atmosférica en Chajnantor en función de la frecuencia de observación. La atmósfera es muy transparente por debajo de 375 GHz (0,8 mm de longitud de onda), y presenta anchas "ventanas" con buena transmisión en torno a 400, 670 y 850 GHz (0,75, 0,45 y 0,35 mm de longitud de onda, respectivamente).

Radiotelescopios de ondas mm/submm

Naturalmente los astrónomos no han venido descuidando la ventana mm/submm, pero tecnológicamente las observaciones en este rango de longitudes de onda no son tarea fácil. Los radiotelescopios de ondas mm/submm son antenas parabólicas que han de tener una gran precisión en su superficie, y por lo tanto tienen serias limitaciones en su tamaño. Estos radiotelescopios (llamados "de antena única") tienen diámetros típicos entre 10 y 40 metros, lo que equivale a un poder de resolución espacial entre 30 y 8 segundos de arco (") a 1 mm de longitud de onda, mucho menor de lo que consiguen los telescopios ópticos. Con este poder de resolución, el astrónomo no puede distinguir los detalles que desearía: por ejemplo, ver un disco gaseoso que puede estar formando planetas en torno a una estrella cercana. Hay que tener en cuenta que en las nubes moleculares masivas más cercanas (las de Taurus a unos 140 pc de distancia), 8" equivalen a más de 1000 UA (unidades astronómicas³), y no es posible por tanto el

³Una unidad astronómica, UA, es la distancia media Tierra-Sol: $1,496 \times 10^{11}$ m

distinguir detalles del tamaño de nuestro Sistema Solar (que tiene unas decenas de UA). La misma situación se da en la Astrofísica extragaláctica, pues aunque con los instrumentos actuales puede detectarse la radiación emitida por muchas de ellas, no es posible tener una idea mínimamente detallada de sus regiones de formación estelar, o de la estructura de sus regiones nucleares.

Los interferómetros nacen para superar las dificultades técnicas inherentes a la construcción de grandes antenas de precisión. Un interferómetro es un conjunto de antenas relativamente pequeñas que trabajan al unísono para simular, a efectos de resolución angular, una antena única tan grande como la máxima distancia que separa a las antenas pequeñas individuales.

Por ejemplo, el interferómetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) en el Plateau de Bure (Alpes franceses) está formado por 5 antenas idénticas de 15 m de diámetro y que son móviles (van montadas sobre raíles). Situando las antenas en diferentes posiciones, que pueden distar hasta unos 500 metros entre sí, es posible simular un radiotelescopio de 500 m de diámetro. Se obtiene así un poder de resolución en torno a $1''$ (para 1 mm de longitud de onda), lo que significa 140 UA (unidades astronómicas) en las nubes de Taurus.

Para comprender como funciona un interferómetro supongamos una onda plana que llega sobre el observatorio de Bure. Cada antena de 15 m actúa como una especie de “ventana” que muestrea una pequeña región (un círculo de 15 m) de la onda incidente. Dado que hay varias antenas y que son móviles sobre distancias de 500 m, resulta que este muestreo tiene lugar sobre un círculo total de 500 m (también se aprovecha el movimiento de la Tierra como un movimiento adicional de las antenas en el espacio). Es decir es como si tuviésemos una gran antena imaginaria de 500 m, pero que su superficie fuese transparente en muchas zonas. Para obtener una buena observación con esa gran antena imaginaria, vemos que será conveniente mover las antenas reales a muchas posiciones diferentes para intentar obtener un muestreo tan completo como sea posible de las ondas incidentes. En la práctica esto supone situar las antenas en unas posiciones dadas (una “configuración”) realizar una observación del objeto que nos interesa, mover a otra configuración y rehacer la observación, y así tantas veces como sea preciso. Gracias a la combinación de todas estas observaciones se llegará a obtener una imagen de calidad del objeto que estamos estudiando.

De lo expuesto se pueden deducir rápidamente cuáles son las limitaciones de un interferómetro. Por un lado se trata de un sistema lento de observación y, por otro, está limitado a fuentes relativamente brillantes, aquellas que sean detectables gracias al área colectora total de las antenas individuales (¡ no la de la gran antena imaginaria !). Para paliar estas limitaciones hay que (i) aumentar el número de antenas tanto como sea posible para mejorar el muestreo, y hacer así que las observaciones sean más

rápidas y (ii) construir antenas tan grandes como sea posible para aumentar el área colectora y, por tanto, la sensibilidad.

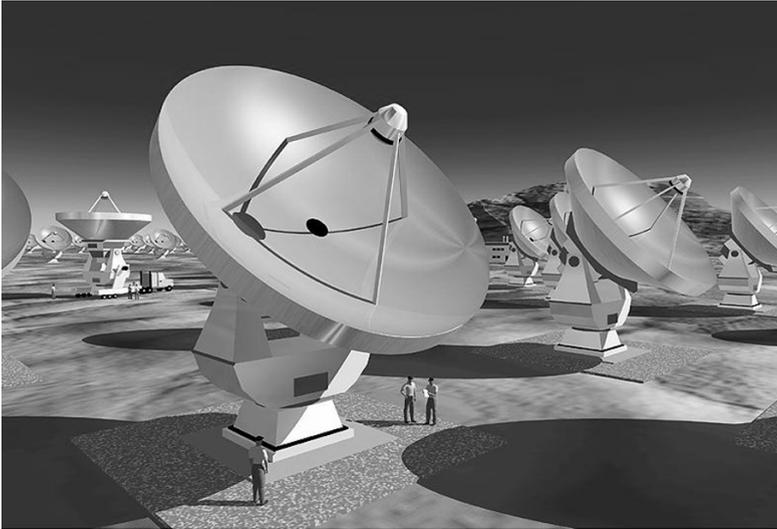


Figura 2: Ilustración artística del interferómetro ALMA. El diseño básico incluye 64 antenas de 12 metros de diámetro. (Cortesía de ESO.)

Interferómetros actuales y futuros

Junto con el interferómetro mm europeo del IRAM (5 antenas de 15 m), en este momento se encuentran operativos 2 interferómetros en EEUU - el de Owens Valley (6 antenas de 10,4 m) y el de Hat Creek (9 antenas de 6 m)- y un cuarto en Japón (5 antenas de 10 m).

El interferómetro del IRAM contará en 2001 con una antena adicional (un total de 6). Por otro lado, las antenas de los dos interferómetros mm estadounidenses (Owens Valley y Hat Creek) serán transportadas en un futuro próximo a un mismo lugar más elevado para constituir un único interferómetro denominado CARMA. El proyecto estadounidense SMA (8 antenas de 6 m) en construcción en el observatorio de Mauna Kea (Hawaii, EEUU) operará preferentemente en ondas submm. El telescopio espacial FIRST será lanzado en torno a 2007, se trata de un telescopio simple especializado en ondas submilimétricas que tendrá muy alta sensibilidad al no sufrir el apantallamiento de la atmósfera terrestre.

Pero todos estos desarrollos se verán culminados por la construcción de uno de los telescopios más ambiciosos que haya imaginado el hombre:

el gran interferómetro de ondas milimétricas de Atacama (Atacama Large Millimeter Array) o ALMA: 64 antenas de alta precisión que trabajarán al unísono, a 5000 m de altitud, en Atacama (Chile), uno de los desiertos más áridos de nuestro planeta.

El proyecto ALMA

En el momento de redactar este artículo (Julio de 2000) el consorcio para el diseño y construcción de ALMA está formado por institutos europeos y estadounidenses⁴. Así se ha diseñado lo que se denomina el proyecto ALMA “básico”. Japón está estudiando su participación y si llega a participar lo hará contribuyendo con una aportación adicional. Para esa eventualidad se ha ideado una versión más ambiciosa del proyecto: lo que denominaremos “gran ALMA”. En lo sucesivo mencionaremos las diferencias entre las dos versiones de ALMA cada vez que sea preciso.



Figura 3: Chajnantor, una llanura a 5.000 m de altitud en el desierto de Atacama (Chile) cerca de la frontera chileno-argentina, está llamado a ser el observatorio astronómico terrestre con cielos más claros.

⁴ALMA es fruto de una colaboración internacional que incluye a EEUU, a través del *National Radio Astronomy Observatory*, y a varios países europeos a través de un consorcio de los siguientes institutos: *European Southern Observatory*, *Centre National de la Recherche Scientifique* (Francia), *Max-Planck Gesellschaft* (Alemania), *Netherlands Foundation for Radio Astronomy* (Países Bajos), *Particle Physics and Astronomy Research Council* (Reino Unido) *Research Council* (Suecia), y *Oficina de Ciencia y Tecnología - Instituto Geográfico Nacional* (España). Chile, la nación que albergará ALMA, también participa en todas las tareas de planificación. Finalmente, hay negociaciones en curso con Canadá y Japón, países que han expresado su interés por unirse al proyecto

Un lugar excepcional

La atmósfera es una pantalla para las ondas mm/submm. La forma de liberarse, en cierta medida, de esa pantalla es instalando los instrumentos de observación en observatorios en alta montaña. Hasta el presente, el mejor observatorio para estas ondas es el de Mauna Kea, un pico volcánico de Hawaii (EEUU) a 4200 m de altitud. Sin embargo, ALMA requiere una meseta plana y extensa para poder repartir sus antenas por la superficie. Los Andes contienen varias mesetas que podrían cumplir las exigencias de ALMA, y durante 10 años se han estudiado diferentes sitios para localizar el más idóneo. Finalmente el Llano de Chajnantor (latitud $-23^{\circ}1'$ S, longitud $67^{\circ}45'W$), a una altitud de 5000 m en el desierto de Atacama (norte de Chile, cerca de la frontera con Argentina) ha resultado ser la opción más interesante.

El Llano de Chajnantor es una meseta amplia y despejada de unos 10 km de diámetro. La atmósfera es allí tan transparente y estable que la misma observación que se lleva a cabo en Mauna Kea podría realizarse en Chajnantor (utilizando exactamente el mismo sistema de observación) unas 4 veces más aprisa. Pero las condiciones de trabajo serán muy duras: la presión atmosférica en Chajnantor tan sólo alcanza el 55% de su valor en el nivel del mar, mientras que la intensidad de los rayos ultravioletas es 70% más alta. La temperatura puede oscilar desde varios grados bajo cero durante la noche hasta unos 30 grados Celsius durante el día, y el viento que barre la meseta puede llegar a ser bastante violento.

La fase de construcción de ALMA requerirá el transporte de grandes cantidades de equipo pesado hasta Chajnantor. Afortunadamente, y a pesar de que se trata de un sitio tan remoto, una gran carretera pasa cerca del Llano y un gaseoducto de gas natural lo atraviesa. Carretera y gaseoducto facilitarán enormemente el acceso y el suministro de energía al futuro observatorio. El Llano de Chajnantor está llamado a convertirse en el más seco, más alto, y de cielos más claros, de todos los observatorios astronómicos terrestres.

Antenas de precisión

El proyecto ALMA básico incluye 64 antenas de 12 m de diámetro, mientras que el proyecto gran ALMA tiene unas 78 antenas de 12 m y quizás una 10 antenas adicionales de 8 m.

La antena parabólica es, por tanto, el bloque fundamental de ALMA y ha de ser diseñada con el máximo cuidado. Las antenas han de ser suficientemente precisas como para poder funcionar correctamente en todo el rango mm/submm (frecuencias desde unos 30 GHz hasta 1000 GHz), lo que implica unas desviaciones mínimas respecto de la geometría de un paraboloide perfecto (desviación cuadrática media de unas 20 a 25 micras). Y además las antenas han de ser capaces de mantener su precisión en las condiciones climatológicas extremas de Chajnantor, y han de ser

móviles. Por todo ello, se utilizarán en su construcción materiales rígidos y ligeros como la fibra de carbono y el aluminio. Las deformaciones de las superficies parabólicas debidas a los cambios de posición de las antenas, a las variaciones de temperatura y al viento han de ser de tal forma que la superficie resultante sea un paraboloide tan preciso como el de la antena cuando no sufre ninguna de estas perturbaciones.

El gran poder de resolución del interferómetro exige que las antenas sean muy precisas en su apuntado a una posición del cielo. Las antenas de ALMA deberán apuntar con una precisión mejor que $0,6''$. Para poder realizar observaciones rápidas de regiones del cielo relativamente extensas, las antenas deberán poder apuntar rápidamente: deberán moverse a una velocidad de al menos 1 grado por segundo y quedar posicionadas con un error menor de $3''$, respecto de la nueva posición solicitada.

Las antenas podrán ser transportadas por un vehículo para poder quedar posicionadas en diferentes estaciones posibles, lo que dará lugar a las diferentes “configuraciones” del interferómetro. En la configuración más compacta las antenas estarán agrupadas con una distancia de unos 15 m entre cada dos antenas, mientras que las antenas deberán poder ser separadas entre sí para que el interferómetro logre un efecto de “zoom” (vaya aumentando su poder de resolución), hasta que todas las antenas queden distribuidas en el círculo de 10 km de diámetro de Chajnantor.

Varios conceptos de antenas para ALMA han sido desarrollados por NRAO en EEUU y por IRAM en Europa. Utilizando estas ideas, una empresa en Europa y otra en EEUU están actualmente construyendo sendos prototipos de antena. Los dos prototipos serán instalados en el observatorio del VLA en Socorro (Nuevo Méjico, EEUU) en 2001, con el fin de construir un interferómetro de 2 elementos para la realización de pruebas. Estas pruebas deberán permitir identificar los puntos mejores y peores de ambos prototipos. Las antenas finales de ALMA deberán incorporar los logros del mejor diseño, y deberán evitar los puntos débiles de ambos.

Receptores de alta sensibilidad

El proyecto gran ALMA preve la cobertura prácticamente completa del espectro entre 70 y 1000 GHz, además de un receptor a 35 GHz. Sin embargo, el proyecto básico inicialmente sólo contempla las 4 bandas de frecuencia más importantes, esto es las centradas a 103, 243, 323 y 660 GHz (ver Tabla). Estas 4 bandas se consideran así de importantes por contener un gran número de líneas espectrales moleculares, algunas de ellas muy intensas. Pero el sistema óptico tendrá en cuenta la posibilidad de que en un futuro se instalen los 10 receptores.

Los receptores irán alojados en una especie de “rueda” en el foco Cassegrain de las antenas. Dependiendo de la banda de frecuencia, se utilizarán detectores con sistemas de superconductores SIS o, por debajo de 116 GHz (banda número 3 e inferiores), transistores HEMT.

Receptor	Frec. central (GHz)	Banda (GHz)	$\Delta S(1)$ (mJy)	$\Delta S(25)$ (mJy)	$\Delta S(c)$ (mJy)
1	35	30–40	3.9	0.77	0.015
2	79	67–90	5.0	1.0	0.030
3	103	86–116	5.0	1.0	0.031
4	144	125–163	4.5	0.9	0.035
5	187	163–211	5.0	1.0	0.030
6	243	211–275	6.1	1.2	0.060
7	323	275–370	11	2.2	0.140
8	442	385–500	50	10	0.950
9	660	602–720	120	23	1.900
10	869	787–950	183	37	3.500

Tabla 1: Receptores de ALMA y su sensibilidad. $\Delta S(1)$ y $\Delta S(25)$ son las sensibilidades para una resolución de 1 km/s y 25 km/s, respectivamente (en modo espectral), y $\Delta S(c)$ en el continuo. Estas sensibilidades representan el rms sobre el flujo alcanzado tras 1 min de tiempo de observación.

La calidad de un receptores de microondas se mide mediante un parámetro denominado “temperatura de ruido”. Cuanto mayor es éste parámetro, más ruidoso (menos sensible) es el receptor. Las temperaturas de ruido de los receptores para ALMA se espera que sean las más bajas alcanzadas en la historia de la radioastronomía mm. Por debajo de 116 GHz, se esperan obtener valores en torno a 20-50 K y por encima de 116 GHz las especificaciones están en torno a $6hv/k$ (donde v es la frecuencia central y h y k son las constantes físicas usuales)⁵.

Los receptores sabrán discriminar la posible polarización de la radiación, lo que hará de ellos receptores “dobles” (un canal de recepción por cada modo de polarización posible). La medida de la polarización debe permitir medir los campos magnéticos y su estructura en los objetos emisores (ya sean protoestrellas, nubes interestelares, galaxias, etc).

Además los receptores deberán ser muy estables: las fluctuaciones en potencia total no deberán superar 10^{-4} partes en 1 segundo. Esta estabilidad es precisa para la cartografía rápida de grandes regiones del cielo (mediante un método de barridos que se suele denominar “on the fly mapping”). Para alcanzar tal estabilidad, es fundamental que los receptores dispongan de un sistema muy preciso de regulación de temperatura.

Los receptores de ondas mm/submm contienen partes que han de mantenerse en el vacío y refrigeradas a temperaturas criogénicas (tan sólo unos

⁵Todos los valores para las temperaturas de ruido se dan para el caso de banda lateral única (SSB).

grados por encima del cero absoluto), lo que complica considerablemente el mantenimiento de los equipos. En el caso de ALMA se piensa diseñar un laboratorio móvil con los equipos electrónico, de vacío y de criogenia necesarios para el mantenimiento de todos los receptores. Cuando haya un problema en una de las antenas, un vehículo transportará el contenedor con el laboratorio y lo acoplará a la antena en cuestión, de manera similar a como se inserta el contenedor con las provisiones a la cabina de un avión comercial. De esta forma se facilitarán enormemente las tareas de reparación y mantenimiento.

La banda de frecuencias más altas (la centrada en torno a 869 GHz) presenta considerables dificultades técnicas en este momento, pero la tecnología se encuentra en pleno desarrollo. Para las otras bandas, el gran desafío radica en la construcción de un número tan elevado de receptores (64 en el proyecto básico y cerca del centenar para gran ALMA). Hasta ahora los receptores de los radiotelescopios mm se fabrican en los institutos de radioastronomía, y cada receptor es un auténtico “prototipo”. Para el proyecto ALMA se impone un cambio radical de filosofía: los receptores serán diseñados en los centros de investigación, pero la fabricación deberá realizarse en empresas que los puedan producir prácticamente “en serie”. Esta manera de trabajar facilitará enormemente la transferencia de las más avanzadas técnicas de la detección de ondas mm/submm hacia la industria. Naturalmente dichas técnicas son de gran interés para el desarrollo de nuevos sistemas de telecomunicaciones.

Procesado de la señal

Los datos recibidos en cada antena de un interferómetro están afectados por desplazamientos en la fase que se originan cuando la radiación al atraviesa la atmósfera (el principal causante es el vapor de agua de la troposfera). En el caso de ALMA, estas inestabilidades en la fase se corregirán mediante la medida radiométrica del cielo en una banda del agua (muy posiblemente en torno a 183 GHz). Cada antena de ALMA irá por tanto equipada con un receptor dedicado específicamente a este fin (un receptor adicional a los que tienen un fin puramente astronómico). Antes de nada, la señal de cada antena de ALMA será corregida para compensar por los desplazamientos en la fase sufridos en la porción de atmósfera de su línea de mira.

Para obtener la imagen del objeto astronómico que estamos observando con un interferómetro, se precisa combinar (“correlar”) las señales procedentes de todas sus antenas. En efecto, puede demostrarse que esta “correlación” proporciona la transformada de Fourier de la imagen del objeto. Basta, por tanto, con construir la transformada de Fourier inversa de la correlación (mediante un ordenador adecuado) para obtener la imagen que buscamos.

Tradicionalmente la correlación en un interferómetro se estima formando todas las parejas posibles con sus antenas. En un interferómetro de N antenas pueden formarse $N(N-1)/2$ parejas diferentes. Es decir en el caso de ALMA ($N = 64$) se disponen de 2016 parejas (o líneas de base) distintas. Y de cada antena se desea procesar una banda muy ancha (con anchura de 16 GHz) para tener una máxima sensibilidad a la radiación continua. Un sistema electrónico ("correlador") debe ser capaz de combinar todos esos datos en tiempo real. Naturalmente la complejidad de un correlador crece con el número de parejas y con la anchura de la banda a procesar. En el caso de ALMA, el correlador tendrá que ser capaz de trabajar a una velocidad en torno al TeraHertzio (THz), es decir deberá realizar en torno al billón de operaciones por segundo. Esto supone un incremento de varios órdenes de magnitud respecto de los telescopios actuales más potentes. El diseño y construcción del correlador de ALMA es por tanto uno de los desafíos más importantes del proyecto. El correlador deberá ir seguido de un ordenador sumamente potente que calcule rápidamente la imagen del objeto astronómico que estemos observando.

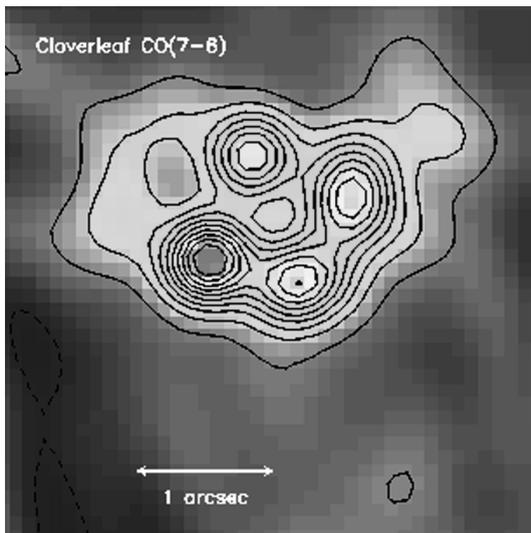


Figura 4: El "trébol de cuatro hojas" es un cuásar a un redshift de $z = 2,56$ que fue observado con el interferómetro del IRAM por Barvainis y colaboradores en 1994 y por Kneib y colaboradores en 1998. La peculiar morfología con cuatro máximos de emisión es originada por un fenómeno de lente gravitacional: una galaxia interpuesta en la línea de mirada amplifica la radiación y distorsiona la imagen del cuásar distante.

Así se observará con ALMA

Las condiciones de trabajo son tan difíciles en Chajnantor que el interferómetro deberá estar tan automatizado como sea posible, y deberá contar con un elaborado sistema de control de remoto, para que haya un mínimo número de personas presentes en el observatorio. Los astrónomos no deberán desplazarse hasta Chajnantor para observar con ALMA. Muy posiblemente los astrónomos autorizados enviarán las órdenes al telescopio desde sus propios despachos para que se ejecuten cuando las condiciones sean las más adecuadas. Un muy reducido número de astrónomos, técnicos y operadores supervisarán los equipos en el propio observatorio y se ocuparán del mantenimiento.

ALMA tendrá un gran ordenador central que controlará todas las antenas (desplazamientos, posicionado, apuntado, y seguimiento en el cielo) y toda la instrumentación (selección de receptores y sintonizado, configuración del correlador, etc). ALMA podrá ser dividido en varios subsistemas (al menos 4) que actuarán como interferómetros independientes y que podrán llevar a cabo, simultáneamente, observaciones astronómicas de diferentes tipos. Posiblemente el interferómetro estará dotado de un sistema inteligente para seleccionar de la lista de espera los proyectos de observación más adecuados para ser llevados a cabo en cada momento. Por ejemplo, si el tiempo atmosférico es excepcionalmente bueno, ALMA elegirá el proyecto de observación más exigente. El sistema también será capaz de decidir por sí mismo en qué momento la observación en curso ha obtenido la calidad requerida por el astrónomo que la planificó y, por lo tanto, cuándo puede pasar a un objetivo diferente. Todo este sistema dinámico de planificación (“dynamical scheduling”) optimizará el uso del telescopio y hará que cada proyecto se realice de la forma más adecuada posible.

Los objetivos científicos de ALMA

Cómo hemos descrito más arriba, ALMA se construirá con el objetivo básico de estudiar el universo frío, es decir las regiones del cosmos en que se forman las galaxias, las estrellas y los planetas. Naturalmente, además de estos objetivos centrales, el interferómetro podrá ser utilizado para observar cualquier objeto celeste que emita radiación mm o submm. Por ejemplo, ALMA podrá observar el Sol, los planetas del Sistema Solar, los cometas, estrellas de todos los tipos, etc. En cada caso, ALMA proporcionará información única y, por lo tanto, de suma importancia. Nosotros nos contentaremos con repasar a continuación los *principales* objetivos científicos del proyecto.

La formación de las galaxias

Las observaciones realizadas durante los últimos 8 años han ofrecido ejemplos de cómo el universo remoto puede ser estudiado en ondas

mm/submm. Desde que en 1992 se detectó la galaxia hiperluminosa IRAS 10214+4724 con un desplazamiento hacia el rojo de $z = 2,28$, otras 12 galaxias distantes -con desplazamientos hacia el rojo aún mayores- han sido detectadas en las líneas rotacionales del monóxido de carbono (CO). El record actual lo ostenta el cuásar⁶ BR 1202-0725 con $z = 4,49$. Estos objetos llegan a contener unas 10^{11} masas solares de gas molecular. Casi todas estas galaxias han sido detectadas además en el continuo mm/submm, lo que confirma que su contenido en polvo es también muy importante.

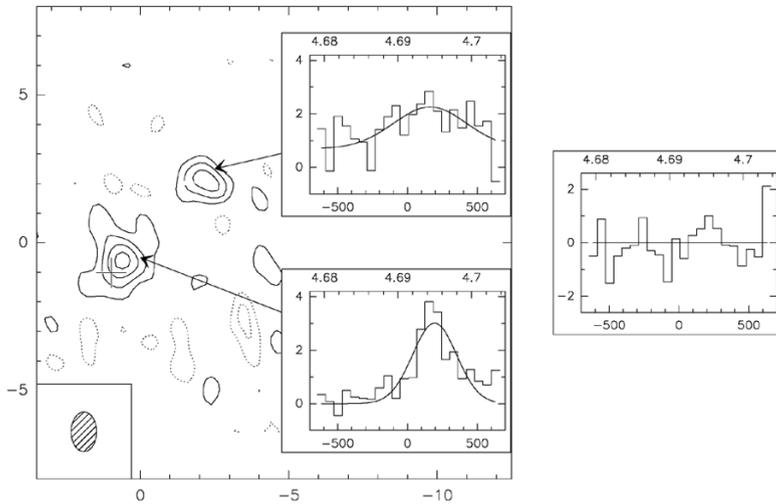


Figura 5: Mapa de la emisión continua a 1,3 mm de longitud de onda del objeto BR1202-0725, junto con los espectros de la línea $J=5-4$ de CO obtenidos hacia cada una de las dos fuentes observadas. Los datos fueron obtenidos por Omont, Guélin y colaboradores con el interferómetro del IRAM entre 1996 y 2000. Con un desplazamiento hacia el rojo $z=4,69$, BR1202-0725 es el objeto más distante en el que han sido detectadas moléculas de CO. La diferencia entre los espectros de las dos componentes, dibujado en el panel de la derecha, muestra que ambos espectros son compatibles dentro del nivel de ruido. Por lo tanto, parece plausible que ambas imágenes sean originadas por la misma galaxia lejana cuya radiación es amplificada por una lente gravitacional, de manera similar a lo que sucede en el “trébol de cuatro hojas”.

⁶Un cuásar es una galaxia con un núcleo tan sumamente brillante que no deja ver la galaxia propiamente dicha.

Estas detecciones demuestran que es posible estudiar las galaxias tal y como eran al poco tiempo de su formación. Por ejemplo, una galaxia con $z = 3$ es observada tal y como era en un momento $0.1t_H$, donde t_H es la edad del universo: el intervalo de tiempo transcurrido desde la Gran Explosión primordial (el Big Bang). Es decir, estudiando estas galaxias, estamos estudiando cómo era el universo en la décima parte inicial de su vida.

Parece ser que la época de máxima actividad en la formación de cuásares se corresponde con el intervalo $z = 2 - 3,5$. Este intervalo, de unos 2000 millones de años, debió jugar un papel muy importante en la evolución de las galaxias, pero las causas del comienzo y de la finalización repentina de esta actividad es uno de los mayores enigmas de la Astrofísica actual. El estudio de las galaxias con desplazamiento al rojo en ese rango es, por tanto, de una importancia fundamental. Sin embargo, los interferómetros actuales no permiten un estudio mínimamente detallado de la estructura de esas galaxias distantes que han sido detectadas hasta la fecha. Además casi todos los objetos detectados se encuentran amplificadas por lentes gravitacionales interpuestas. En el fenómeno de lente gravitacional, una galaxia relativamente cercana actúa como un telescopio natural amplificando la radiación procedente de otra galaxia mucho más lejana que se encuentra en la misma línea de mirada. Aunque este fenómeno ayuda a detectar objetos muy lejanos, las imágenes de estos resultan distorsionadas por el efecto de lente.

ALMA permitirá la detección de un número mucho mayor de objetos (hasta 20 veces más débiles que los detectados hasta la fecha, lo que supone un total en torno al millar de objetos) y posibilitará el estudio de la estructura de los más brillantes. En efecto, ALMA podrá realizar mapas detallados de galaxias muy lejanas (aunque no estén amplificadas por fenómenos de lente gravitacional) en tiempos de observación razonables. La detección de varias líneas de CO permitirá estimar las condiciones físicas que reinan en el gas molecular. Estos estudios nos dirán en qué momento de la evolución del universo (en qué rango de desplazamientos al rojo) se formaron las primeras cantidades significativas de elementos pesados (estudiando por ejemplo la cantidad de CO contenida en galaxias jóvenes), de polvo interestelar y, por lo tanto, cuándo aparecieron las primeras estrellas: las responsables de la formación de esos primeros elementos pesados y granos de polvo.

ALMA también realizará estudios de cúmulos distantes de galaxias, lo que nos proporcionará una información muy valiosa sobre las escalas de tiempo de formación de las galaxias y del desarrollo de estructura a gran escala en el universo. Por ejemplo, el número de cúmulos de galaxias en función del desplazamiento al rojo está íntimamente ligado al espectro de irregularidades en el universo primordial.

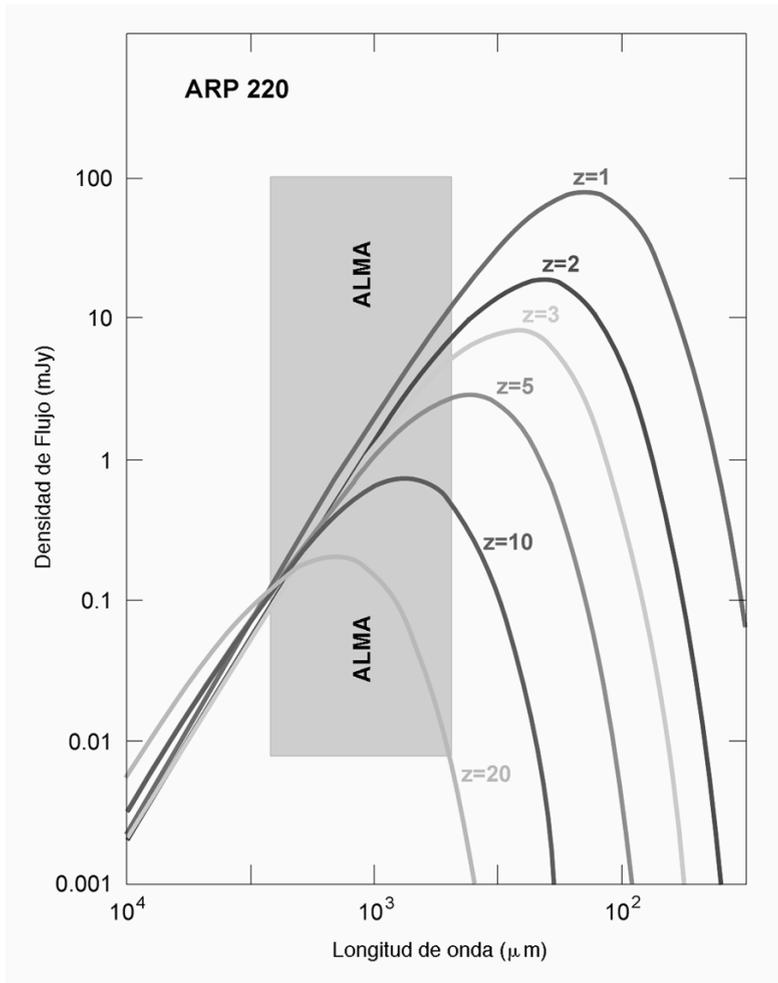


Figura 6: Con una luminosidad en el lejano infrarrojo $\sim 10^{12}$ luminosidades solares, Arp 220 es un prototipo de galaxia infrarroja ultraluminosa. Se estima que las protogalaxias típicas con un desplazamiento al rojo $z \sim 3$ deben tener luminosidades comparables. El gráfico muestra la distribución espectral de energía de una galaxia como Arp 220 según tenga desplazamientos hacia el rojo crecientes, desde $z = 1$ hasta $z = 20$. La zona sombreada muestra la sensibilidad de ALMA en torno a 1mm de longitud de onda tras unos 10 minutos de tiempo de integración. ALMA será capaz de detectar objetos similares a Arp 220 con altísimos desplazamientos hacia el rojo.

La radiación del fondo cósmico a 2,7 K (una reliquia de la Gran Explosión) sufre una distorsión al interactuar con los electrones del gas caliente que reside en los cúmulos de galaxias. La observación en ondas mm de esta distorsión, conocida como efecto Sunyaev-Zeldovich, proporciona un buen método para estudiar la distribución de materia en los cúmulos de galaxias.

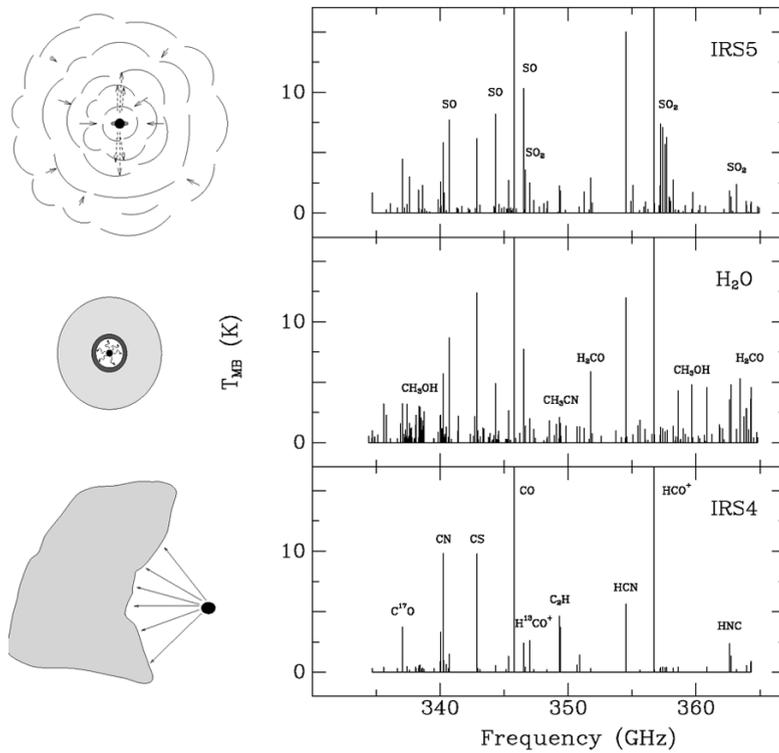


Figura 7: Espectros en la banda de 335–365 GHz (longitud de onda en torno a 0,8 mm) procedentes de 3 objetos protoestelares masivos en la nube molecular W3, tomados por los astrónomos holandeses Helmich y van Dishoeck con el telescopio “James Clark Maxwell” en Mauna Kea en 1997. Las grandes diferencias tanto en las condiciones físicas como en la composición química de los 3 objetos, IRS5, W3-H₂O, e IRS4, se traducen en espectros sumamente diferentes. Estas diferencias parecen tener su origen en los distintos estados evolutivos en que se encuentran las tres protoestrellas.

La formación de estrellas y planetas

Comprender los procesos físicos que hacen que una porción de nube interestelar se convierta en una estrella (o en varias) es una tarea apasionante. Dichos procesos son muy diferentes dependiendo del número de las estrellas en formación y de sus masas. Los modelos teóricos de formación estelar son difíciles de elaborar y los más detallados son los que se refieren a una única estrella de tipo solar. Pero aún en este caso “sencillo” hay múltiples variaciones dependiendo de las condiciones iniciales físicas, químicas y magnéticas que se supongan para la condensación gaseosa protoestelar.

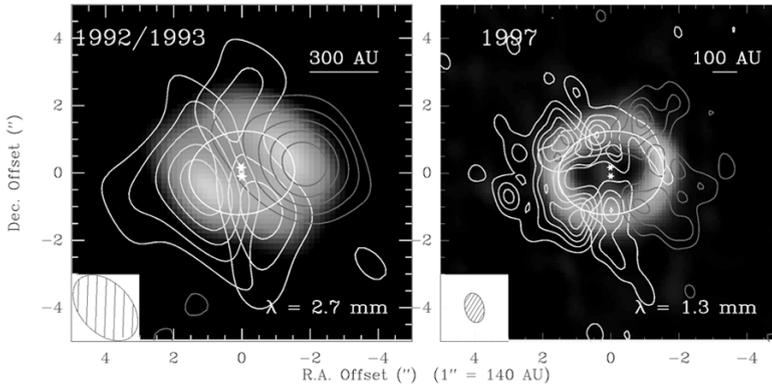


Figura 8: El disco circumbinario en torno a la estrella doble GG Tau observado por S. Guilloteau y colaboradores con el interferómetro del IRAM en 1999. A la izquierda la imagen en el continuo a 2,7 mm de longitud de onda con 3 canales de emisión $J=1-0$ del isótopo ^{13}CO . A la derecha la emisión en el continuo a 1,3 mm con los mismos canales para la línea $J=2-1$ de ^{13}CO . Los canales de las líneas de ^{13}CO revelan el campo de velocidades en el disco: una nítida rotación kepleriana.

ALMA será capaz de observar directamente muchos de los procesos físicos que los modelos han predicho que deben tener importancia. El poder de resolución del interferómetro es equivalente a 3 UA (para una longitud de onda de 1 mm) en las nubes moleculares cercanas más importantes (por ejemplo, los complejos de nubes en las constelaciones de Taurus, Ofiuco y Camaleón). Con esta capacidad para observar detalles, ALMA podrá discriminar sin ambigüedad entre las diferentes opciones ofrecidas por los modelos de formación estelar. ALMA nos mostrará claramente cómo las nubes van colapsando para formar las protoestrellas y cómo se generan las grandes eyecciones bipolares de gas que siempre acompañan dichos

fenómenos de formación (los llamados “flujos bipolares”) y cuál es papel real jugado por el campo magnético.

Una vez formada la protoestrella, se desarrolla un disco gaseoso que rodea al objeto central. Es en este disco donde se espera que tenga lugar la formación de planetas y por ello recibe el nombre de disco “protoplanetario”. Los interferómetros actuales no tienen el poder de resolución suficiente para estudiar las regiones centrales de dichos discos (digamos la región interna de unos 100 UA) y los discos rotantes bien detectados (p. ej. los de las estrellas GG Tau o GM Aur) son discos extremadamente grandes en torno a estrellas generalmente binarias, discos que, de estar en torno a nuestro Sol, se encontrarían mucho más allá del cinturón de Kuiper. Pero con ALMA sí que podrán estudiarse las propiedades del gas y del polvo sobre escalas de varias UA, escalas finalmente comparables a las del Sistema Solar. ALMA realizará mapas detallados de la rotación de dichos discos y de su composición química. Estudiando discos en diferentes estados evolutivos, se podrá estudiar de qué forma se van formando moléculas cada vez más complejas, cómo se van agregando los granos de polvo para formar sólidos cada vez más masivos, cuáles son las escalas de tiempo típicas en los procesos de formación de planetas, etc.

Nubes interestelares

Las nubes moleculares en los brazos espirales de la Vía Láctea son los lugares en que van formándose las estrellas nuevas. Estas estrellas alteran su medio circundante y determinan la evolución química del disco galáctico. ALMA revelará detalles precisos de la interacción entre las estrellas recién formadas y el medio gaseoso que las rodea. Naturalmente el Centro Galáctico será un objetivo primordial de ALMA, en particular el estudio del disco que rodea el agujero negro que muy posiblemente se encuentra en la radiofuente Sgr A*, en el centro exacto de nuestra Galaxia.

Este mismo tipo de trabajos sobre estructura galáctica podrán ser llevados a cabo incluso en otras galaxias del llamado Grupo Local y, muy particularmente, en las Nubes de Magallanes. ALMA podrá estudiar estas galaxias con el mismo detalle con que los interferómetros actuales estudian la Vía Láctea en el presente.

ALMA también cartografiará con mucho detalle las galaxias que se encuentran a distancias de hasta 100 Mpc (millones de pc⁷) y proporcionará estadísticas precisas de los tamaños y masas de su contenido en nubes moleculares gigantes. Los núcleos de las galaxias podrán ser estudiadas con una resolución lineal de tan sólo unos pc. Por ejemplo, los discos circunnucleares, que se sabe que están presentes en las galaxias de tipo

⁷1 parsec (pc) es la distancia a la que una unidad astronómica abarca un ángulo de un segundo de arco. Equivale a 3,26 años-luz.

Seyfert, podrán ser estudiados en todas las galaxias de este tipo que se conocen hoy en día.

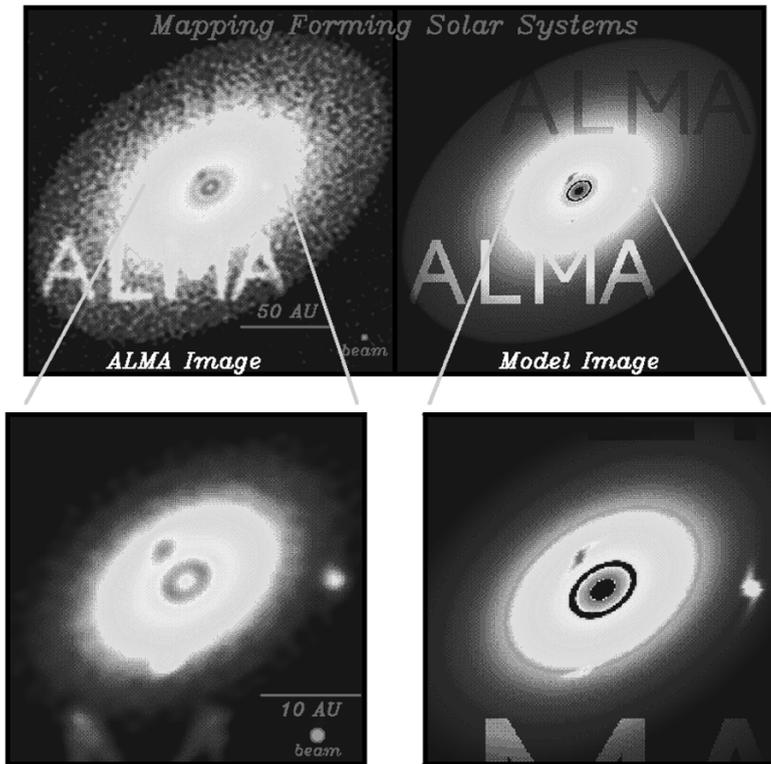


Figura 9: Simulaciones realizadas por L. Mundy de la Universidad de Maryland (EEUU) que ilustran la capacidad de ALMA para obtener imágenes de sistemas proto-planetarios en torno a estrellas jóvenes. ALMA será capaz de detectar condensaciones con una masa similar a la terrestre en las regiones de formación estelar más cercanas (a una longitud de 1,3 mm, una distancia de unos 150 pc, y suponiendo una temperatura del polvo interestelar de unos 30 grados Kelvin). ALMA podrá, por tanto, revelar como se van formando los planetas en los discos protoestelares, lo que ofrecerá indicios de gran interés para las búsquedas ulteriores de planetas extrasolares.

En resumen, ALMA es el equivalente en el dominio mm/submm de los nuevos telescopios ópticos/infrarrojo que se encuentran en construcción o en desarrollo en el momento actual. En concreto, debido a su poder de resolución comparable, ALMA, VLT (Very Large Telescope, el interferómetro óptico/IR situado en Cerro Paranal, Chile) y NGST (Next Generation Space Telescope, el telescopio espacial que relevará al telescopio Hubble) serán instrumentos perfectamente complementarios.

Combinando observaciones en diferentes longitudes de onda con estos instrumentos, la humanidad alcanzará, dentro de tan sólo unos años, la idea más precisa que haya tenido nunca sobre el cosmos. Pero es muy posible que estos instrumentos también abran unos nuevos interrogantes que hoy ni siquiera podemos imaginar. Alcanzar un horizonte para, desde allí, poder atisbar otro más lejano y desafiante: este es el sino estimulante del astrónomo, muy posiblemente el de todo científico, quizás el del hombre.

Agradecimientos Es un placer agradecer nuevamente al editor de este volumen, mi compañero y amigo el Dr. Pere Planesas, la invitación para escribir en este excelente *Anuario*, así como sus comentarios sobre el manuscrito.