

TRABAJO INVITADO

Proyecto LLAMA

E. M. Arnal^{1,2}, I. F. Mirabel³, R. Morras^{1,2}, G. E. Romero^{1,2},
Z. Abraham⁴, E. M. de Gouveira Dal Pino⁴ y J. Lepine⁴

(1) *Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), CCT- La Plata, CONICET, Argentina*

(2) *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), UNLP, Argentina*

(3) *Instituto de Astronomía y Física del espacio (IAFE)- CONICET, Argentina*

(4) *Instituto Astronomico e Geofisico (IAG) -Universidade de Sao Paulo, Brasil*

Abstract.

In this paper we briefly describe a joint scientific and technological effort between Argentina and Brazil, whose first goal is to install and run, in the northwestern part of Argentina, a millimetre and submillimetre observational facility. In the long run, we would like to incorporate this dish to existing ones (ALMA, APEX, ASTE) in the northern extreme of Chile, to be able to carry out, for the first time in Latinamerican soil, very long baseline interferometry at mm/submm wavelengths. We also succinctly mention a long term campaign that is under way in order to monitor the transparency of the atmosphere at those wavelengths. The science that can be accomplished with this instrument, the technology transfer spin-offs related to this project, and the scientific and strategic importance of this project within both the Argentinean and Latinamerican radioastronomy is described.

Resumen. En esta presentación se describe un proyecto científico y tecnológico conjunto con la República de Brasil, cuyo primer objetivo es la instalación y puesta en funcionamiento, como una facilidad individual, de una antena para ondas milimétricas y submilimétricas en la región noroeste de la República Argentina. A posteriori, se buscará integrar esta antena al interferómetro ALMA, a la antena APEX y/o a la antena ASTE, a los fines de establecer las bases de la primera red de Interferometría de Línea de Base muy Larga (VLBI, por sus siglas en inglés) en Latinoamérica. Se describen brevemente estudios realizados en sitios que podrían ser asiento de esta facilidad, algunos de los objetivos científicos que se persiguen, las oportunidades de transferencia tecnológica que se abren, la importancia de este proyecto para la Astronomía Argentina en particular, y Latinoamericana en general.

1. Introducción

El proyecto LLAMA (acrónimo de *Large Latin American Millimeter Array*) es un emprendimiento conjunto argentino-brasileño, cuya finalidad es la instalación y puesta en funcionamiento de una antena de 12 metros de diámetro en el noreste de Argentina, en un sitio ubicado por encima de los 4.500 metros de altura sobre el nivel del mar. Dicho telescopio trabajaría en la banda de frecuencias comprendida entre los 90 GHz y los 700 GHz y contaría con receptores extremadamente sensibles y sistemas de mando, control y procesamiento de datos. Aunque inicialmente el instrumento funcionaría como un telescopio independiente, uno de los objetivos perseguidos por este proyecto es que el mismo constituya el primer elemento de una serie de antenas que conformarán la primera red de interferometría VLBI en Latinoamérica. Este modo de funcionamiento permitirá abrir una plétora de posibilidades para realizar investigaciones que requieran elevada resolución angular en las bandas milimétricas y submilimétricas.

La astrofísica moderna, para avanzar en el conocimiento del Universo, requiere del análisis e interpretación de datos que puedan ser obtenidos en distintas frecuencias a lo largo de todo el espectro electromagnético. Por una variedad de razones técnicas, hasta hace pocas décadas atrás, la única posibilidad de escudriñar el Universo se encontraba restringida a la denominada ventana óptica. A mediados del siglo pasado, los avances tecnológicos producidos en la Segunda Guerra Mundial abrieron nuevas perspectivas para estudiar el Universo. En efecto, en la década de 1950 los astrónomos pudieron estudiar por primera vez el Universo en frecuencias que caen dentro del extremo inferior de la denominada *ventana de radio* del espectro electromagnético. El desarrollo de la era espacial también abrió nuevos horizontes en la investigación astronómica y, mediante el uso de satélites, pudo obtenerse información en regiones del espectro electromagnético hasta entonces vedadas para un observador situado sobre la superficie de nuestro planeta. Así se sumaron a las regiones del espectro electromagnético ya accesibles para la investigación científica, las regiones correspondientes a las bandas de altas energías (rayos γ y rayos X), al ultravioleta, y al cercano y lejano infrarrojo. Las ventanas milimétrica/submilimétrica forman un puente entre la astronomía del infrarrojo lejano y la radioastronomía a frecuencias bajas. Los problemas y desafíos técnicos a resolver en estas bandas han sido complejos y variados, siendo éste el motivo que hizo que las observaciones astronómicas en ese rango de longitudes de onda fuesen las últimas ventanas del espectro electromagnético, en el reino de las microondas, en abrirse a la investigación astronómica.

Uno de los resultados más importantes en los últimos 20 años en el área de la radioastronomía ha sido la detección e identificación de distintas especies moleculares en el espacio, y la interpretación de sus distribuciones, abundancias y anomalías isotópicas. Si bien en otra sección de esta presentación se mencionarán, resumidamente, diversas líneas de investigación que podrían beneficiarse con la disponibilidad de un instrumento como el esbozado, resulta oportuno mencionar brevemente que el estudio de estas especies moleculares ha tenido un profundo impacto en líneas de investigación tan variadas como las de evolución estelar, nucleosíntesis, química del Universo, estructura y dinámica de las galaxias, y bioastronomía. Las tradicionales observaciones ópticas y en el rango de las frecuencias más bajas dentro de la ventana de radio, pueden aportar da-

tos muy limitados a las líneas de investigación anteriormente mencionadas, pues la mayor parte de la información proveniente de las emisiones moleculares sólo puede ser observada en las denominadas ventanas milimétrica y submilimétrica del espectro electromagnético.

Como fuera mencionado al inicio de esta Introducción, LLAMA podría funcionar como un instrumento autónomo, o como parte de una red de VLBI que en una primera etapa podría estar constituida por algunas de las antenas del gigantesco emprendimiento denominado Atacama Large Millimeter Array (ALMA). La construcción de ALMA finalizará hacia fines del año 2012 y está siendo financiada por un consorcio integrado por los Estados Unidos, la Comunidad Económica Europea y la contribución de Japón y Taiwan; con el instrumento Atacama Pathfinder EXperiment (APEX), que ha construido el Observatorio Europeo Austral (ESO en inglés); y/o el radiotelescopio Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE), construido mediante una cooperación entre el Observatorio Nacional de Japón, las universidades japonesas de Tokio, Nagoya y Osaka y la Universidad Nacional de Chile. El radiotelescopio LLAMA, al suministrar las líneas de bases más extensas, permitiría incrementar en un factor cercano a 10 la resolución angular alcanzada por el interferómetro ALMA.

Las inversiones de capital necesarias para la construcción de grandes instrumentos, no pueden surgir de los presupuestos normales de las agencias (CONICET, ANPCyT) que financian las actividades de Ciencia y Técnica del país. El proyecto LLAMA posee varios aspectos de importancia que justifican una inversión de capital inicial por parte del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de Argentina, a los fines de dar el impulso necesario para concretar la realización de este proyecto. Entre los mismos, cabe mencionar que el proyecto LLAMA:

- 1) Constituirá para Argentina y Brasil, que actualmente no forman parte del consorcio ALMA, una oportunidad de tomar la iniciativa en un proyecto científico-tecnológico original y de gran impacto a nivel mundial.
- 2) Colocará, tanto a la Argentina como a Brasil, en una posición ventajosa para participar en una versión extendida del proyecto ALMA, con una inversión de sólo el 1 % de la inversión total demandada por ALMA.
- 3) Permitirá reafirmar y profundizar la integración científico-tecnológica entre los países más importantes del bloque MERCOSUR.
- 4) Ofrecerá, al involucrar nuevas tecnologías en varias ramas de la Ingeniería de grandes estructuras y de diversos campos de la Ingeniería digital, excelentes oportunidades para la formación de recursos humanos altamente capacitados en áreas consideradas de vacancia y/o estratégicas para el quehacer nacional.
- 5) Permitirá, al hacer uso de recursos humanos capacitados en el uso de tecnologías consideradas nuevas, la constitución de grupos-semilla que lleven a cabo actividades de transferencia tecnológica desde el sector científico-tecnológico hacia diversos campos de la actividad económica del país.
- 6) Impulsará la colaboración académico-tecnológica a nivel nacional entre diversas Facultades de las Universidades Nacionales de Salta y Jujuy, con

sus similares de Universidades Nacionales con tradición académica en el campo de la Astronomía (Universidades Nacionales de La Plata, Córdoba, Buenos Aires y San Juan).

- 7) Representará oportunidades para incrementar las colaboraciones internacionales. La colaboración científico-tecnológica de las principales instituciones astronómicas de Argentina y Brasil, producirán en el contexto del proyecto LLAMA, un equipo técnico altamente capacitado. Este aspecto abrirá las puertas a colaboraciones internacionales sin precedentes, tanto en el campo científico como en el área tecnológica.
- 8) Abrirá en la región del noroeste de Argentina nuevas oportunidades de trabajo, debido a la necesidad de cubrir puestos laborales, directa e indirectamente, vinculados al proyecto LLAMA
- 9) Representará una oportunidad para la participación de la industria y empresas, tanto argentinas como brasileñas, en los contratos de todas las obras de infraestructura inherentes al proyecto propuesto, con el consiguiente impacto socio-económico para la región.

2. Objetivos científicos

Hay dos preguntas fundamentales que se formulan los astrónomos: (1) ¿Cómo se ha formado el Universo? (2) ¿Cómo se forman las estrellas? Es entendible que se formulen estas preguntas pues el hombre, en su sentido más amplio, siempre ha sentido curiosidad por saber cómo se ha formado el Universo que contemplamos hoy día, con sus galaxias, el Sol, la Tierra (¡con el hombre incluido!) y cuál ha sido y es su evolución. En última instancia, la curiosidad del hombre es lo que motoriza lo que denominamos el *progreso humano*.

Un radiotelescopio milimétrico/submilimétrico instalado en un sitio que se encuentre en el noroeste de Argentina, a una altura superior a los 4.500 metros, podría ser usado para investigaciones en todas las áreas de la Astronomía, o sea, para estudios del sistema solar, evolución estelar, medio interestelar, astronomía extragaláctica, etc. Como parte de un interferómetro asociado a ALMA, alcanzaría una de las resoluciones angulares más elevadas que puedan lograrse hoy día en Astronomía, del orden de 1 microsegundo de arco en longitudes de onda de 1 milímetro. Como tal, podría ser utilizado -entre otros- para los siguientes proyectos:

a) *Estudios del Sol*

- Estructura de la atmósfera Solar baja
- Filamentos activos y quiescentes
- Fulguraciones solares
- Estudio de la dinámica de la cromósfera y de su campo magnético

b) *Planetas*

- Estudios de planetas extrasolares cercanos al Sol

- Estudio de discos proto-planetarios cercanos al Sol
- Estudio de objetos cercanos a la Tierra

c) *Objetos estelares*

- Estudio de regiones de formación estelar, de núcleos pre-estelares, de objetos estelares jóvenes, y de los mecanismos de formación estelar
- Estudio de procesos no-térmicos en magnetósferas estelares
- Estudio de la interacción de estrellas y de remanentes de supernovas con su medio interestelar

d) *Chorros astrofísicos y emisión máser*

- Estudios de chorros astrofísicos en general
- Estudio del fenómeno máser en líneas de recombinación emitidas en la banda de radio por el átomo de hidrógeno
- Estudio de la emisión máser en regiones de formación estelar
- Estudio de la emisión máser en envolturas estelares de estrellas tardías

e) *Medio interestelar galáctico e intergaláctico*

- Estudio de radiación del continuo del polvo frío extragaláctico
- Estudio del material molecular en la dirección de distintos objetos estelares
- Estudio del medio intergaláctico mediante la detección de líneas de absorción moleculares en la dirección de cuasáres
- Estudios del fondo cósmico de radiación

f) *Galaxias en General*

- Búsqueda de CO en galaxias con elevados corrimientos al rojo
- Estudios de abundancia molecular
- Núcleos de galaxias activas
- Estudios de la variación de las constantes fundamentales mediante lentes gravitacionales
- Estudios a altos corrimientos al rojo, de regiones con elevadísima tasa de formación estelar
- Estudio de proto-cúmulos de galaxias
- Estudios de la distorsión espacio-temporal producida por agujeros negros de gran masa

g) *Altas energías*

- Búsqueda de contrapartidas de fuentes de rayos γ detectadas con el futuro arreglo CTA de telescopios Cerenkov.

3. Transferencia tecnológica

A partir de los recursos humanos y técnicos necesarios para la ejecución de este proyecto, se generarán desarrollos tecnológicos que harán uso de las nuevas tecnologías disponibles en el mercado, las que podrían ser transferidas a las siguientes áreas del quehacer nacional:

- Comunicaciones: Capacitación y entrenamiento de ingenieros en microondas de alta frecuencia.
- Recursos naturales: Seguimiento de satélites usando microondas de alta frecuencia.
- Ingeniería y Ciencia de materiales: Tecnología en fibras de carbono.
- Electrónica: Construcción de radiómetros y receptores en altas frecuencias.
- Administración empresarial a nivel regional.
- Procesamiento de señales y reconstrucción de imágenes
- Metrología, control y operación remota de antenas de gran porte

4. Posibles sitios en el noroeste Argentino

Durante los últimos tres años, el IAR ha llevado a cabo, en forma casi ininterrumpida, campañas de monitoreo de la transparencia de la atmósfera, a una frecuencia de 210 GHz, en dos lugares ubicados en la región noroeste de Argentina. Uno de los sitios estudiados se encuentra a 4.604 metros sobre el nivel de mar, a 180 kilómetros al sureste de la Puna Salteña. El instrumento utilizado para las mediciones de la transparencia, ha sido provisto por la Universidad Autónoma de México (UNAM). Los datos obtenidos muestran que el 80 % del tiempo durante las estaciones de otoño, invierno y primavera, la atmósfera es altamente transparente (opacidades atmosférica al cenit inferiores a 0.2). Esto implica que a la frecuencia de 210 GHz, casi el 82 % de la radiación que incide sobre la atmósfera llega a la superficie. Extrapolando, mediante el uso de modelos atmosféricos, la opacidad observada a 210 GHz a frecuencias más elevadas, puede concluirse que este lugar es adecuado para llevar a cabo observaciones en las bandas milimétrica y submilimétrica del espectro electromagnético. Aunque existen variaciones estacionales (en los meses de verano la atmósfera posee mayor opacidad), las mismas en ningún momento constituyen un obstáculo para la realización de observaciones milimétricas.

Simultáneamente a las observaciones de opacidad atmosférica llevadas a cabo por el IAR, un grupo de investigadores de la Universidad de Córdoba (Argentina), ha estado llevado a cabo, en la misma zona, mediciones para caracterizar el lugar a longitudes de onda correspondientes a las ventanas óptica e infrarroja. De esa base de datos, amablemente puesta a nuestra disposición, se ha podido determinar las variaciones de la temperatura, y las fluctuaciones en la dirección y velocidad del viento. Esta última variable es de gran importancia para decidir la instalación de un radiotelescopio en un sitio dado, pues es la que determina si es

aconsejable o no, la instalación del mismo. Si bien la velocidad del viento medida en Macón no impediría el funcionamiento del telescopio, su valor promedio se encuentra demasiado cerca del límite superior considerado como razonable. Los datos disponibles recomiendan la búsqueda, en la zona, de regiones cuyos vientos posean menores velocidades. Modelados de la velocidad del viento llevados a cabo por el grupo de colegas cordobeses, indican que es posible hallar regiones ubicadas en las cercanías de Macón, donde la velocidad del viento debería ser ostensiblemente inferior. Otra región del noroeste argentino cuya transparencia atmosférica a ondas milimétricas comenzó a monitorearse a fines del mes de julio del corriente año, se encuentra en las cercanías de Altos de Chorrillos. Este lugar se ubica a 4.755 metros de altura y a unos 16 km de distancia de la localidad de San Antonio de los Cobres. Los pocos datos disponibles hasta el momento, indican que dicho sitio es también de muy buena calidad.

5. Organización general del proyecto

El proyecto LLAMA se encuentra en una fase muy preliminar como para discutir en detalle la estructura que se daría al manejo del mismo. Sin embargo, puede adelantarse que durante la fase de construcción e instalación de la antena, Argentina y Brasil participarían de la misma manera en base a una inversión igualitaria de ambos países. Del lado de Argentina, el personal del IAR participaría mayoritariamente en los distintos aspectos del proyecto que corresponda llevar adelante a nuestro país.

Durante la última Asamblea de la UAI celebrada en Río de Janeiro, Brasil, en agosto del corriente año, entre los investigadores de ambos países que impulsan este proyecto, se acordó que:

- La compra de la antena sería realizada por las agencias de financiamiento de Brasil.
- La construcción de las obras de infraestructura necesarias para la instalación de la antena en el sitio seleccionado, y las obras de infraestructura que demande la construcción del complejo que posea las facilidades técnicas mínimas requeridas, serían financiadas por las agencias de Argentina.
- Los costos de mantenimiento de la facilidad instrumental serían afrontados sobre una base igualitaria (50 % por Argentina y 50 % por Brasil).
- En el caso de que las inversiones indicadas en los primeros dos ítems no resultasen comparables, el país que haya realizado una menor inversión se haría cargo de una mayor parte de los costos de mantenimiento mencionados en el ítem anterior, a los efectos de equiparar las inversiones totales en un lapso de 10 años.

El transporte, ensamblaje, instalación y medidas preliminares de la performance del telescopio serían llevado a cabo por personal especializado de la compañía encargada de construir la antena. Personal técnico y científico de Argentina y Brasil participarían de dichas actividades.

Los grupos de Argentina y Brasil directamente involucrados en el proyecto LLAMA, serían responsables de definir la instrumentación necesaria para el telescopio y tendrían a su cargo el mantenimiento técnico general del instrumento.

Cuando el telescopio sea completado, se espera que un número mínimo (a definir) de personal técnico y científico que se encuentre en el sitio sea responsable del manejo del mismo, en coordinación con el Director de la facilidad. Este último debería ser elegido por concurso.

El tiempo de observación en el nuevo telescopio debería ser asignado por un Comité de Programación, constituido por representantes de las instituciones involucradas de ambos países, cuyo número relativo inicial debería reflejar la contribución relativa de cada país a la compra de la antena, a la construcción de la infraestructura necesaria, a su instrumentación y a las inversiones en su mantenimiento. Se espera que la distribución de tiempo sea aproximadamente igual entre los investigadores de los dos países. Durante los primeros años de funcionamiento, sería deseable que una fracción apreciable del tiempo total de observación disponible, fuese asignado a proyectos de interés común para los investigadores de ambos países.

En el caso de Argentina, se contempla que los miembros del Comité de Programación sean astrónomos destacados. Las propuestas serían evaluadas en base al mérito científico de las mismas, a la viabilidad de su ejecución, y a la contribución a la formación de recursos humanos, entre otros criterios. El tiempo de observación estaría abierto a las comunidades astronómicas de cada país. Se prevé que los astrónomos de otros países que deseen usar el telescopio, lo podrían hacer por medio de colaboraciones con astrónomos que trabajen en Argentina y/o Brasil. Se espera recibir propuestas de colaboradores extranjeros que incluyan, tanto el uso de instrumentos existentes en LLAMA, como el de posibles instrumentos visitantes que complementarían los inicialmente planeados para LLAMA.

6. Importancia nacional y regional del proyecto

En el año 1962, el Directorio del recientemente creado CONICET y los máximos cuerpos colegiados de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires, de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), y de la Universidad de Buenos Aires (UBA), tomaron la decisión política de impulsar la creación de una institución cuya finalidad fuese el estudio del Universo mediante el uso de microondas. En esa decisión de política científica se originó el único radio observatorio que tiene nuestro país: el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR). A lo largo de sus cuarenta y dos años de existencia, el IAR ha llevado a cabo una amplia tarea de formación de recursos humanos, tanto en el campo científico como en el tecnológico. Hoy en día es claro que la decisión de crear el IAR fue acertada desde lo científico, ya que abrió nuevos horizontes y posibilidades para la investigación de nuestro Universo. El correr del tiempo también le dió la razón a los visionarios que al promover su creación esgrimieron, como uno de los argumentos de mayor peso, el hecho de que los instrumentos que se emplearían para llevar a cabo las investigaciones harían uso de tecnologías que podrían ser de suma importancia en otros campos de la actividad económica y social del país. En efecto, la actividad de transferencia



Figura 1. Ubicación relativa de dos de los posibles sitios para instalar la antena del proyecto LLAMA, respecto del interferómetro ALMA. Las distancia norte-sur y este-oeste entre los sitios y ALMA se encuentran indicadas.

de tecnología, basada en el conocimiento adquirido por los ingenieros que se formaron en el IAR, hacia el programa espacial de Argentina, por medio de convenios suscritos entre la Comisión Nacional de Asuntos Espaciales (CONAE) y el CONICET, ha enfatizado la importancia estratégica avizorada en la creación del IAR. Estas actividades han permitido al erario público, no sólo ahorrar millones de dólares estadounidenses en divisas, sino también consolidar un grupo de recursos humanos con profundo conocimiento de los conceptos (teóricos y prácticos) en campos de punta del desarrollo tecnológico.

Ciertamente el proyecto LLAMA abrirá un enorme abanico de posibilidades para la investigación astronómica en el mundo de las microondas, pero al mismo tiempo promoverá la formación de recursos humanos en la aplicación de los adelantos tecnológicos que forman parte del instrumental disponible en radiotelescopios que trabajan en las bandas milimétrica y submilimétrica.

Las aplicaciones y ramificaciones que puedan lograrse con la aplicación de este conocimiento, a priori sólo pueden evaluarse como de mucha importancia.

Así como sucedió con la creación del IAR, la importancia de impulsar el proyecto LLAMA no sólo radica en su aspecto científico, sino también en su futura contribución a sectores del quehacer nacional considerados estratégicos.

7. Conclusiones

A modo de resumen, puede decirse que el proyecto LLAMA ofrece las siguientes ventajas:

- El tomar la iniciativa en un proyecto global, que aunque la mayoría de los países con tradición en actividades científico- tecnológico (Australia, países de la Comunidad Económica Europea, Canadá, EEUU y el consorcio Japón/Taiwan), asignan extrema importancia a la construcción de una red de VLBI en el Cono Sur, recién hacia fines de 2015 estarían en condiciones de comenzar a financiarlo. Este proyecto colocaría a los países de la región en una posición ventajosa para participar en una versión extendida del proyecto ALMA original, desplegando sus roles técnicos e intelectuales en el progreso de la astronomía austral.
- Es un proyecto científico-tecnológico totalmente original en uno de sus modos de operación (VLBI).
- Permitiría testear y corregir la integración científico-tecnológica regional, paso por paso y de forma progresiva, sobre todo teniendo en cuenta que en una fase ulterior de su construcción, la red de VLBI podría requerir de la instalación de antenas en otros países de la región (por ejemplo, Bolivia y Perú).
- El proyecto brinda un contexto ideal para entrenar recursos humanos en ingeniería de materiales y tecnología en microondas, con aplicación en telecomunicaciones, relevamiento de recursos naturales, microelectrónica y administración empresarial a un nivel nacional y regional.
- En un contexto geopolítico más ambicioso, es un proyecto que promueve la integración científica y tecnológica de Latinoamérica, ya que grupos de científicos de Bolivia, Chile, Colombia, México, Perú, Uruguay y Venezuela, han manifestado su interés de participar en el mismo.

Agradecimientos. Agradecemos el apoyo explícito brindado por la comunidad argentina a este proyecto en la Asamblea de la Asociación Argentina de Astronomía celebrada en la ciudad de San Juan en el año 2008. En dicha reunión se presentó por primera vez este proyecto a los astrónomos profesionales de nuestro país. También deseamos agradecer la colaboración y sugerencias que nos han hecho llegar diversos colegas, en relación a la elaboración del manuscrito del proyecto que en breve será elevado al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva.