



Memorias de mis investigaciones en Astronomía

I.F. Mirabel¹

¹ *Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET–Universidad de Buenos Aires, Argentina*

Contacto / mirabel@iafe.uba.ar; felix.mirabel@cea.fr

Resumen / Presentación oral en ocasión de recibir el Premio a la Trayectoria 2018 otorgado por la Asociación Argentina de Astronomía en reunión conjunta con la Sociedad Chilena de Astronomía.

Abstract / Talk in the occasion of receiving the 2018 Life Achievement Prize awarded by the Argentinean Astronomical Association at a joint meeting with the Chilean Astronomical Society.

Keywords / history and philosophy of astronomy — Galaxy: general — galaxies: active — stars: black holes — intergalactic medium — cosmology

1. Introducción

Para mí es un gran honor y motivo de enorme satisfacción y orgullo recibir el “Premio a la Trayectoria” de la Asociación Argentina de Astronomía (A.A.A.), por lo cual agradezco profundamente a su Comisión Directiva. Según la Comisión este premio se otorga por “los aportes en el descubrimiento y comprensión de las galaxias infrarrojas ultraluminosas, de las galaxias enanas de marea, de la existencia de movimientos aparentemente superlumínicos en la Vía Láctea, y de los microcuásares, campo del que la comunidad internacional lo considera fundador”. Por lo tanto en mi exposición haré eje en el proceso que llevó a estos descubrimientos científicos y sus implicaciones. También haré referencia al aporte principal en gestión científica que de acuerdo a la comisión quizás sea “el aporte más significativo para nuestra comunidad, la concepción y gestión política del Proyecto “Large Latin American Millimeter Array” (LLAMA), del cual fue mentor, y a cuya promoción dedicó más de una década”.

De las incursiones en nuevas áreas de la Astronomía que menciona la Comisión Directiva de nuestra Asociación, permanecen anclados en mi memoria no solo los resultados científicos, los cuales se pueden encontrar fácilmente en las publicaciones. También están presentes en mi memoria las circunstancias del comienzo de cada investigación, la sorpresa ante lo inesperado, la emoción al trascender la frontera de lo conocido para confrontar lo desconocido, la fraternidad forjada en el trabajo de investigación científica con colegas de otras culturas y regiones del mundo. Por ello, en esta presentación recuerdo en forma especial a colegas que han hecho aportes significativos, y con los cuales he compartido las experiencias vividas durante esas investigaciones.

2. Motivación, circunstancias y azar

La palabra “Trayectoria” en este “Premio a la Trayectoria” con el que me honra la A.A.A., podría tácitamente hacer alusión a una trayectoria continua, ordenada, de

acuerdo a una planificación racional. En realidad, mi camino hacia la astronomía y posteriormente dentro de sus subdisciplinas, ha sido desde su comienzo y hasta la actualidad, un camino accidentado, como naturalmente es toda exploración. Por tal razón, más que una trayectoria continua y planificada en un área específica de la astronomía, mi tránsito hacia y en la astronomía ha consistido en un conjunto de diferentes exploraciones.

Mi motivación por el saber en general ha sido sintetizada por Nikos Kazantzakis en un párrafo del “El jardín de las rocas”: “Soy una criatura efímera, pero dentro de mí, siento arremolinarse todas las fuerzas del Universo. Quiero, por un instante, antes de que me quebranquen, abrir los ojos y verlas”. Desde muy temprano sentí curiosidad por conocer los misterios de la existencia y de este mundo, y como adolescente tuve la ilusión de que la Filosofía podría revelar esos misterios, o por lo menos, ayudarme para “abrir los ojos y ver las fuerzas del Universo”, como dice Kazantzakis.

Uruguay, mi país natal, después de la bonanza de la posguerra, entra en recesión en la década de los años '60. Mi padre, ingeniero del politécnico alemán de Dresden, pierde su trabajo, por lo que al finalizar los estudios secundarios debo emigrar a Buenos Aires para trabajar y participar en el sustento familiar. En aquellos años, la Universidad Tecnológica es la única posibilidad, para la gente que trabaja, de realizar estudios nocturnos y gratuitos a nivel terciario. Curso hasta el tercer año de ingeniería industrial. Me maravilla la capacidad de la Física, que por medio de pocas ecuaciones ha podido sintetizar y predecir la enorme diversidad de los fenómenos de la Mecánica y el Electromagnetismo. Me siento profundamente atraído por la racionalidad de la Física, que contrasta con el absurdo y caos de nuestro mundo. Más tarde, cuando los problemas económicos más acuciantes son resueltos, para poder “abrir los ojos y ver las fuerzas del Universo”, ingreso a la Facultad de Filosofía y Letras de la UBA. Siendo la Física el modelo paradigmático del conocimiento, solicito en el departamento de Física equivalencias para continuar los estudios de

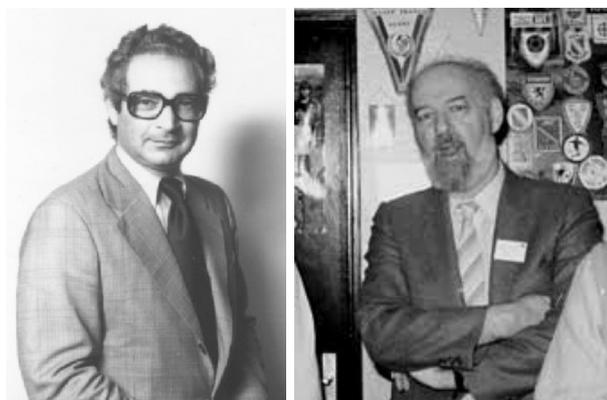


Figura 1: Carlos Varsavsky (izq.) y Carlos Jaschek (der.)



Figura 2: Antenas de 30 m del Instituto Argentino de Radioastronomía.

ciencia. Nunca tuve una respuesta, ni siquiera negativa.

Casualmente, por una publicación de la editorial EU-DEBA de la UBA me entero sobre los sorprendentes descubrimientos en astrofísica y cosmología ocurridos en el siglo XX: la expansión del Universo, su evolución química por reacciones nucleares en el centro de las estrellas, los pulsares, el destino final de las estrellas más masivas como estrellas de neutrones y agujeros negros. Motivado por esa y otras lecturas ingreso como alumno en la Escuela de Astronomía y Geofísica del Observatorio de la Universidad de La Plata (UNLP). Poco tiempo después, la UNLP me otorga una beca que me permite continuar, sin tener que trabajar, estudios simultáneos de Filosofía en la UBA y de Astronomía en la UNLP.

Dos profesores impactan en mi formación. En Filosofía, Saúl Katz, un ayudante de trabajos prácticos de quien aprendo que la Filosofía, además de una disciplina formal, puede ser una forma de vida. Carlos Jaschek (Fig. 1) me introduce en dos aspectos de la investigación astronómica que serán esenciales para mi formación como investigador científico. Por una parte, la elaboración e integración de las observaciones en todo el espectro electromagnético, o sea, la investigación “multifrecuencia”, que actualmente se llama investigación “multimensajera”, porque además de la radiación en todo el espectro electromagnético, integra la emisión de partículas, neutrinos y ondas gravitacionales. Por otra parte, de Jaschek también aprendo la necesidad de la integración multidisciplinaria entre las diferentes áreas de la astrofísica. En aquella época, el astrónomo observacional todavía conserva una relación “artesanal” con el instrumento de observación y cierta empatía con la vastedad del cielo estrellado. Esas enseñanzas anticipan las “observaciones de servicio” de los grandes observatorios, el incremento de grupos numerosos de investigación, y el carácter de empresa cuasi-industrial de la “Gran Ciencia”, y en particular, de los grupos de investigación astronómica en la actualidad.

Al finalizar las carreras de Filosofía en la UBA y de Astronomía en la UNLP, intento realizar una tesis doctoral en Filosofía en la UBA sobre la Teoría del Conocimiento en la “Crítica de la Razón Pura” de Kant. La idea es contrastar esa teoría del conocimiento que tiene como paradigma la Física Clásica, con la Teoría de la Relatividad y la Física Cuántica. Ese proyecto de

tesis doctoral lo podría haber realizado rápidamente, ya que durante los últimos dos años de la carrera de Filosofía estudié con gran dedicación la “Crítica de la Razón Pura”, y a su vez cursé Física Relativista y Física Cuántica en el departamento de Física de la UNLP. Pero el proyecto de tesis doctoral en Filosofía se frustra por el golpe de estado de junio de 1966, que derroca al presidente electo Arturo Illia, y un general llamado Onganía ocupa la presidencia. La UBA es intervenida, y los mejores profesores de la Facultad de Filosofía y Letras renuncian o son expulsados.

Como la astronomía se ocupa de “cuestiones celestiales”, en el contexto político de aquel momento es considerada como una actividad políticamente “inocente”. En ese contexto postulo bajo la dirección de Carlos Varsavsky (Fig. 1) a una beca doctoral del CONICET en astronomía, con lugar de trabajo en el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR, Fig. 2). De hecho, me convierto en el primer egresado de una escuela de astronomía en Argentina que postula para realizar una tesis doctoral en el IAR, el cual había sido concebido y desarrollado por físicos de la UBA, en colaboración con la institución Carnegie de los Estados Unidos. Obtengo la beca, pero ocurre “la noche de los bastones largos”, Varsavsky renuncia como profesor de la UBA y luego es expulsado como director del IAR.

3. Mis investigaciones en áreas establecidas de la Astronomía

3.1. Tesis doctoral: Acreción de hidrógeno atómico hacia la Galaxia (1971–1975)

Ken Turner de la fundación Carnegie, asume la dirección del IAR y de mi tesis doctoral. Inicialmente esta consiste en una búsqueda en la línea de 21 cm del hidrógeno atómico de un “puente de gas” entre las Nubes de Magallanes y la Vía Láctea. Ese gas debería ser sustraído de las Nubes de Magallanes por las fuerzas de marea de la Galaxia sobre las galaxias satélites, y estar actualmente cayendo hacia la Vía Láctea. Por la vastedad de la región del cielo a explorar, las limitaciones en sensibilidad del receptor y falta de automatización del radiotelescopio del IAR, se decide observar las



Figura 3: Celebración con colegas de trabajo del IAR por la defensa de mi tesis doctoral a fines de 1975.

regiones del cielo donde ese gas debería estar ubicado de acuerdo a un modelo del matemático computacional norteamericano Alar Toomre. La primera publicación es sobre los resultados negativos de esa búsqueda (Mirabel & Turner, 1973). Astrónomos australianos con instrumentación más avanzada realizan rápidamente un relevamiento general de todo el cielo Sur y encuentran la llamada “Corriente de Magallanes”, en una región del cielo diferente a la predicha por el modelo de Toomre. A partir de entonces concentro mis investigaciones en la caída de gas atómico hacia la región central de la Galaxia y después de varias publicaciones, en 1975 ingreso a la carrera del investigador científico del CONICET.

Por los trabajos en el IAR establezco relación epistolar con el profesor Rodney Davies del Laboratorio de radioastronomía Jodrell Bank de la Universidad de Manchester, quien me apoya para la obtención de becas postdoctorales del British Council y de la Universidad de Manchester. Por otra parte, Jorge Sahade sugiere que postule a un subsidio de la Unión Astronómica Internacional (UAI) para financiar el costo del viaje, el cual es otorgado. Así puedo continuar mis investigaciones sobre nubes de hidrógeno atómico de alta velocidad en Inglaterra.

Debido a la inminencia de un nuevo golpe de estado militar, solicito poder defender con urgencia la tesis doctoral en diciembre de 1975, la que se organiza en los sótanos del Observatorio de La Plata. Parto hacia Inglaterra el 10 de marzo. Un golpe de estado ocurre dos semanas después (Fig. 4).

3.2. Jodrell Bank. Universidad de Manchester (1976–1978)

Sir Bernard Lovell, director de los laboratorios de radioastronomía de la Universidad de Manchester en Jodrell Bank fue integrante del equipo científico-técnico que concibió, construyó, y puso por primera vez en operación radares en suelo británico durante la segunda guerra mundial. Al llegar a Manchester me sorprende la estima de los ingleses de la región hacia los científicos en general, y en particular, hacia los radioastrónomos de Jodrell Bank. El descubrimiento del radar impactó profundamente en sus vidas, ya que por su operación permitió disminuir los bombardeos alemanes en el noroeste industrial de Inglaterra.



Figura 4: Junta militar toma el poder en Argentina el 24 de marzo de 1976.

3.2.1. Gas en el halo de la Galaxia y en el medio intergaláctico del Grupo Local

En Jodrell Bank realizo investigaciones bajo la dirección del profesor Rodney Davies y en colaboración con Jim Cohen, sobre hidrógeno atómico en el halo y en el Grupo Local de galaxias. Los hallazgos principales en esta área de investigación con los radiotelescopios Mark II (38×25 m) y Lovell de 89 m de diámetro, en ese momento el radiotelescopio *fully steerable* más grande del mundo, son:

- La estructura fina del gas atómico en el halo de la Galaxia, la cual sugiere la existencia de tres fases térmicas del gas en el halo de la Galaxia y medio intergaláctico. De particular importancia es la inferencia de gas intergaláctico ionizado con temperaturas de $\sim 10^5$ K a fin de hacer posible la estabilidad de las nubes de hidrógeno atómico. Ese gas ionizado es difícil de observar directamente y se ha propuesto que puede constituir una fracción importante de la masa bariónica del Universo (Cohen & Mirabel, 1979).
- La observación de nubes de gas neutro en el medio intergaláctico del Grupo Local de galaxias con posible rotación, sin población estelar visible hasta ese entonces (Mirabel & Cohen, 1979).

3.2.2. Cosmología

Como me interesa aprender y trabajar en Cosmología, una disciplina que no se enseñaba en la carrera de astronomía de la UNLP, solicito al profesor Davies colaborar en un proyecto de investigación, lo cual amablemente aceptó. En colaboración con Rodney Davies y Alan Pedlar realizamos una primera búsqueda de hidrógeno atómico en protocúmulos de galaxias a distancias cosmológicas correspondientes a corrimientos al rojo de $z = 3.3$ y 4.9 . Mi contribución consiste en desarrollar un programa de cómputo para identificar interferencias y eliminarlas en forma automática por interpolación de canales adyacentes del espectrómetro. No se detectó ningún protocúmulo de galaxias a esas distancias cosmológicas, pero disfruté la lectura de los trabajos teóricos de Sunyaev & Zeldovich sobre la posible existencia de tales protocúmulos.

Llegando a su fin el financiamiento de la posición postdoctoral debo dejar Inglaterra. Hacia fines de 1978



Figura 5: De izq. a der.: Tomas Gergely, Andrew Wilson y Ricardo Morras.

la información sobre la situación en Argentina en el exterior es muy fragmentaria. En ese contexto y ante la ausencia de posibilidad de obtener otro postdoctorado en Europa, planifico volver a la Argentina. Tomas Gergely (Fig. 5), colega y amigo húngaro-argentino con el que había compartido oficina en el IAR y que en ese momento está en la Universidad de Maryland, me advierte y aconseja no volver a la Argentina en ese momento. Tomas me pone en contacto con Frank Kerr, decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Maryland, el cual me ofrece una posición postdoctoral. Tomas provee una ayuda inestimable para la instalación con mi familia en Estados Unidos.

3.3. Universidad de Maryland, College Park (1978–1979)

En la época de mi primer postdoctorado en el Reino Unido, la investigación científica en ese país tiene una estructura vertical. Las propuestas de investigación solamente son formuladas por “Professors” (jefes de grupo), y la iniciativa de los jóvenes ocupa un rol secundario, son los ejecutores de proyectos concebidos por los “Professors”. Al llegar a Estados Unidos, inmediatamente experimento en la práctica, que Estados Unidos es país de inmigrantes. Por lo menos para mí, después de la estadía en Inglaterra, ofrece muchas más oportunidades.

El salario de mi posición postdoctoral en la Universidad de Maryland proviene de un subsidio de la *National Science Foundation* (NSF) otorgado a Frank Kerr. En la primera entrevista, Kerr me informa que el 50% del tiempo debo dedicarlo a la docencia y a colaborar con el desarrollo de sus proyectos que me explica en detalle. Luego, para mi sorpresa, después de casi tres años en Inglaterra, me pregunta: “¿Qué ideas tiene usted para el 50% restante?”

3.3.1. Acreción de gas hacia la Vía Láctea

Relevamientos preliminares de hidrógeno atómico en la región interior de la Galaxia con el radiotelescopio de 42 m de NRAO, revelan una clara preponderancia de gas con altas velocidades de caída hacia el disco galáctico, a una tasa estimada de $0.2\text{--}1.0 M_{\odot} \text{ a}^{-1}$. Esa tasa de acreción es suficiente para sostener la tasa de formación estelar en la Vía Láctea (de $\sim 1 M_{\odot} \text{ a}^{-1}$). A raíz de este resultado recibo una carta de felicitación del célebre astrónomo holandés Jan Oort, lo cual constituye un estímulo importante. Por estos trabajos, soy invitado por primera vez a presentar un artículo de síntesis so-

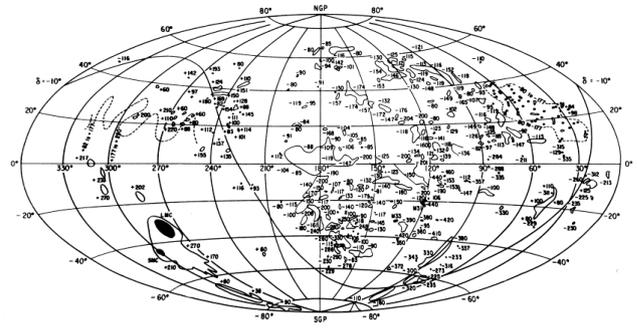


Figura 6: Distribución en coordenadas galácticas de Nubes de H I de Alta Velocidad observadas en la línea de 21 cm. Exposición invitada en la segunda Reunión Regional Latinoamericana de la Unión Astronómica Internacional. Reproducción de Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica. (Mirabel, 1981a).

bre las Nubes de Hidrógeno de Alta Velocidad en un congreso internacional (Fig 6).

3.3.2. Astronomía extragaláctica: galaxias activas

En la Argentina de la década del '70, la Astronomía Extragaláctica, tanto a nivel de docencia como de investigación, es exclusividad del Observatorio de Córdoba. A fin de aprender sobre esta área, le propuse a Andrew Wilson, astrónomo británico de la Universidad de Maryland, colaborar con sus investigaciones. Mi aporte consistió en el conocimiento de las técnicas radioastronómicas de observación que aprendí en el IAR y perfeccioné en Jodrell Bank. Varias publicaciones sobre hidrógeno atómico en galaxias Seyfert y Radio Galaxias fueron realizadas en colaboración con Andrew Wilson, basadas en observaciones iniciadas con el radiotelescopio de 92 m de NRAO, que luego son continuadas con el radiotelescopio de 305 m de Arecibo.

3.3.3. Cosmología: búsqueda de H I en protocúmulos a $z=9$

Esta búsqueda de protocúmulos de galaxias fue realizada con el radiotelescopio de 92 m de NRAO, en colaboración con otros postdoctorados de la Universidad de Maryland, luego continuada en Arecibo. En aquel momento dio resultados negativos, pero en este proyecto cosmológico perfecciono mi conocimiento de técnicas de observación radioastronómicas, y en particular, como sintonizar los receptores para observaciones extragalácticas a distancias cosmológicas. Una presentación corta de estos proyectos se realiza en la Reunión Regional de la Unión Astronómica Internacional (Mirabel, 1981b).

3.3.4. Astronomía galáctica, extragaláctica y cosmología en el Observatorio de Arecibo

Como postdoctorando en la Universidad de Maryland someto varias propuestas de observación en Arecibo para diversos estudios relacionados con la línea de 21 cm

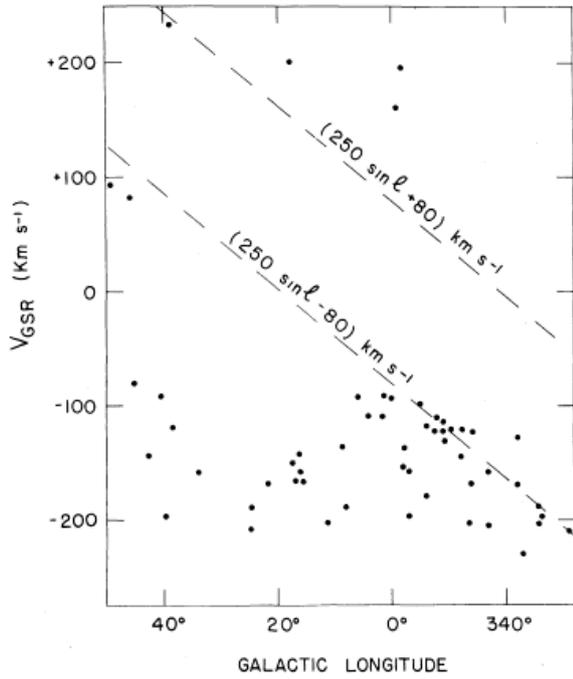


Figura 7: Evidencia del influjo de H I hacia la Galaxia. Velocidades radiales galacto-céntricas de Nubes de NRAO en dirección de la región interior de la Vía Láctea. Reproducción de Astrophysical Journal (Mirabel & Morras, 1984).

del hidrógeno atómico, en astronomía galáctica, galaxias activas, y cosmología. Todas las propuestas son aprobadas. En ese contexto, el decano de la Universidad de Puerto Rico (Estado Libre Asociado de los EEUU), me invita a dar una conferencia en el campus de San Juan. Luego de esa conferencia me ofrecen una posición de profesor “tenure track” en el departamento de Física, un apartamento en el campus de la universidad sin costo de arriendo, y la tramitación de la “Green Card”.

La NSF aprueba un subsidio para financiar las investigaciones en curso con los radiotelescopios de Arecibo y NRAO. Con esos fondos se financia una posición postdoctoral en Puerto Rico de Ricardo Morras y una visita de Marcelo Arnal para colaborar con observaciones en Arecibo. Con Morras (Fig. 5) continuamos un proyecto sobre nubes de alta velocidad de hidrógeno atómico con los radiotelescopios de Arecibo y NRAO.

3.3.5. Acrición de gas atómico en la región central de la Galaxia

Uno de los problemas principales para determinar si existe adquisición de materia hacia la Vía Láctea, radica en la sustracción del movimiento del sistema solar en la determinación de las velocidades radiales, lo cual dificulta la interpretación de las observaciones. Como la componente radial del movimiento del sistema solar en las direcciones del centro y anticentro de la Galaxia es relativamente pequeña, propongo relevamientos profundos de H I en esas dos regiones. En la dirección del centro, con el radiotelescopio de 42 m del Observatorio Nacional de Radioastronomía de los EEUU en West Virginia, y en la dirección del anticentro, con Arecibo. En la

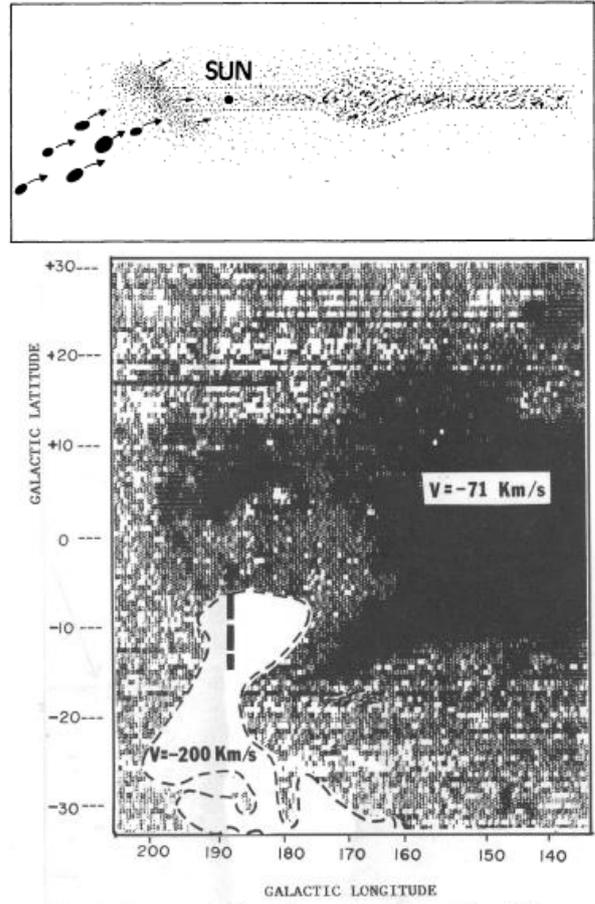


Figura 8: (Arriba): Esquema de la corriente de H I impactando en la región del anticentro de la Vía Láctea; (Abajo): Supercáscara causada por el impacto de esa corriente. Sobre la base de observaciones con el radiotelescopio de 305 m de Arecibo. Reproducciones de Astrophysical Journal (Mirabel & Morras, 1990).

Fig. 7 se ilustra la clara preponderancia de gas cayendo hacia la Vía Láctea en la región del centro galáctico.

3.3.6. Acrición de gas atómico en la región del anticentro de la Galaxia y formación de “supercáscaras”

Sobre la base de observaciones con el radiotelescopio de Arecibo se estima que la acrición de H I en el anticentro es de $4 \times 10^5 M_{\odot}$ a una velocidad de 200 km s^{-1} , lo cual corresponde a una inyección de energía de $2.5 \times 10^{53} \text{ erg}$. Esta energía es equivalente a la de la explosión de centenas de supernovas, y da origen a la supercáscara de H I en el anticentro galáctico. En estos trabajos se concluye que si bien la inyección de energía por acrición de gas atómico, en la totalidad del disco galáctico, es menor a la que inyectan las supernovas, la deposición de energía por acrición de gas extragaláctico puede ser mucho mayor en las regiones donde tienen lugar los impactos de nubes de alta velocidad (Fig. 8).

El 10 de diciembre de 1983 retorna la democracia en Argentina y solicito mi reincorporación al CONICET. El proceso administrativo dura unos dos años. Finalmente

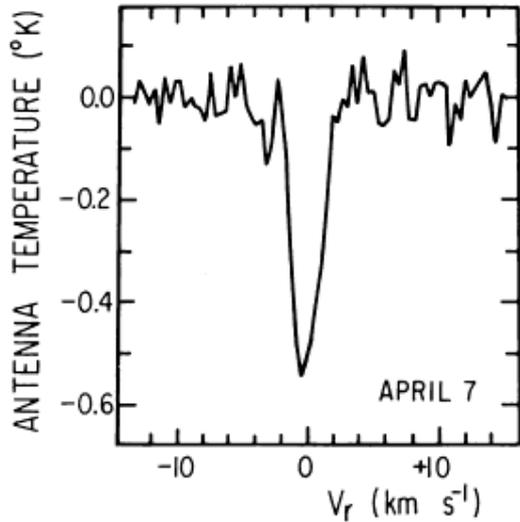


Figura 9: Prototipo de espectros de absorción del radical OH en la línea de 18 cm, observados con la antena del IAR, en la coma del cometa Halley, durante su pasaje frente a fuentes galácticas de radio continuo. Reproducción de la Publicación Especial de la European Space Agency sobre la incursión hacia el interior del sistema solar del cometa Halley en febrero–abril de 1986. Mirabel, Bajaja, Arnal et al. (1986).

soy reincorporado a fines de 1985, a tiempo para involucrarme en observaciones del cometa Halley durante su última incursión en la región central del sistema solar.

3.3.7. Astronomía del Sistema Solar en el IAR: Perihelio del cometa Halley

Para las observaciones del cometa Halley (durante febrero–abril 1986) se obtiene un subsidio de la NSF de los EEUU a fin de determinar la tasa de inyección de gas hacia la coma del cometa por medio de la absorción del radical OH de fuentes de radio continuo en el plano galáctico (Fig. 9). Se observan varias eyecciones discretas a una tasa media de $(4.6 \pm 0.2) \times 10^{29}$ moléculas s^{-1} . El subsidio incluye la donación al IAR del autocorrelador de 1024 canales del observatorio de Arecibo, cuyo costo de construcción había sido estimado en centenas de miles de dólares.

3.3.8. SETI: Búsqueda de señales provenientes de civilizaciones extraterrestres

El primer simposio de la UAI sobre Exobiología en la Universidad de Boston tuvo un carácter interdisciplinario. En el participaron astrónomos, físicos, químicos, biólogos, historiadores, especialistas de la comunicación, etc. Esa reunión internacional fue una de las más motivantes de las que he participado. Para dar un ejemplo, la reflexión sobre cuál debería ser nuestra actitud ante el encuentro con una alteridad tan radical como la de seres extraterrestres con una capacidad científica y tecnológica equivalente o superior a la nuestra, se convirtió en aquel congreso en una reflexión profunda sobre la historia de nuestras propias civilizaciones terrestres, y en particular, sobre las consecuencias de sus múltiples en-

cuentros. En aquella oportunidad adherí como miembro fundador de la comisión 51 de Exobiología de la UAI.

En general se ha supuesto que si existen civilizaciones extraterrestres en nuestra Galaxia los canales de comunicación por medio de radioondas deberían estar en lo que se designa como “pozo de agua”. Esta es la región del espectro electromagnético más cercana a la temperatura del fondo cósmico de microondas, la cual podría servir como canal de comunicación por medio de ondas de radio entre civilizaciones galácticas. Por tal razón, las búsquedas de tales señales han sido cercanas a las frecuencias de 1420 MHz del hidrógeno atómico o entre 1620 y 1720 MHz del radical OH, donde tanto nosotros como las posibles civilizaciones extraterrestres deberían tener sistemas receptores de alta sensibilidad, y transmisores de alta potencia.

Un canal alternativo que no había sido explorado es el de la transición a 4.8 GHz de la molécula de H_2CO (formaldehído), que por un mecanismo antimáser es observada en absorción contra el fondo de microondas de 2.7 K. Esto hace que ese pozo de absorción sería el canal más “frío” para las comunicaciones por radioondas entre civilizaciones. Por tal razón envíé una propuesta al Observatorio Nacional de Radioastronomía de los EEUU para realizar observaciones durante una semana con el radiotelescopio de 42 m en West Virginia, en la dirección de un conjunto de estrellas de tipo espectral similar al sol. Los cuatro evaluadores acuerdan que la idea es original, dos están a favor de conceder el tiempo de observación solicitado, pero los otros dos están en contra. Estos últimos argumentan que no se debe utilizar una facilidad nacional sobresubscripta para un *shoot in the dark*, con tan baja probabilidad de detección. Pero el director del observatorio toma la decisión de conceder una semana entera de observación.

En las últimas horas de observación, observando una de las estrellas del programa se registra una posible señal con forma de delta de Dirac, solamente en uno de los canales. Eso podría ser el llamado de atención esperado, ya que concentrando toda la energía del sistema transmisor en el rango más estrecho posible de frecuencias, y en el menor intervalo de tiempo posible, se obtiene la mayor potencia de transmisión. Cuando el director ve el registro de esa señal sugiere conceder tiempo de observación discrecional, aconsejándome permanecer por el resto de mi vida observando esa estrella. Cambio la reserva de los vuelos de regreso para poder continuar con las observaciones unos días más y, mientras tanto, exploro el bosque circundante. Repentinamente me pregunto si en las adyacencias de la delta de Dirac se pueden observar los armónicos producidos por el sistema de recepción, lo cual confirmaría que la señal realmente provino del exterior del sistema receptor. Vuelvo rápidamente, tomo la cinta magnética de respaldo y al leer los datos registrados en el otro edificio del observatorio, la señal no está. En Argentina promuevo SETI mediante la organización de un simposio en la UBA, se publican entrevistas en periódicos y revistas y un artículo corto en Revista Astronómica (Mirabel, 1984).

3.3.9. Flujos bipolares en regiones de formación estelar

El estudio de flujos bipolares se lleva a cabo con la antena de Arecibo y el VLA observando transiciones de H I y OH en ondas centimétricas, y con varios telescopios milimétricos (CO, CS, NH₃) en colaboración con Luis F. Rodríguez y Jorge Cantó de la Universidad Nacional Autónoma de México. La integración de estas observaciones multifrecuencia, que se muestra en la Fig. 10, es presentada en varios congresos y publicada en Mirabel et al. (1985) y Rodríguez et al. (1989).

4. Apertura de nuevas áreas en Astronomía

4.1. Galaxias infrarrojas ultraluminosas

4.1.1. El descubrimiento

Quizás por haber desarrollado la tesis doctoral en Argentina, lejos de los principales centros de investigación del mundo, durante los primeros años de formación como investigador científico no pude participar en ningún congreso internacional. Siendo consciente de que la ciencia es una actividad social, desde un comienzo adquiero el hábito de leer y disfrutar la lectura de publicaciones en revistas de astronomía, durante una o dos horas diarias. Esta disciplina de lector la fui adquiriendo no solo respecto a publicaciones directamente relacionadas a mis investigaciones, ya que desde temprano tuve la convicción del carácter interdisciplinario de la investigación científica, y de la importancia de transitar hacia nuevas áreas con nuevas preguntas, sin los prejuicios preestablecidos en las mismas.

A comienzos de la década del '80, leo en "The Astrophysical Journal" que astrónomos del NRAO de los EEUU habían encontrado, por medio de observaciones en el continuo de radio, un tipo de galaxias que designan como "Radio Bright Spiral Galaxies". Esas galaxias llaman mi atención, ya que la emisión intensa en radioondas no proviene mayoritariamente de la región nuclear como en las galaxias con núcleos activos (AGN, por sus siglas en inglés). Contrariamente a lo habitual en galaxias activas, la emisión intensa de radio es tan extendida como la población estelar del disco. Ese tipo de galaxias muy prominentes en el continuo de radioondas son tenues en el óptico, por lo que en su gran mayoría hasta entonces habían pasado desapercibidas. Observaciones de esos objetos con los telescopios más grandes tanto en la línea de 21 cm del H I como en transiciones del gas molecular eran inexistentes.

Mi hipótesis fue que se puede tratar de galaxias con brotes muy intensos de formación de estrellas masivas con una alta tasa de explosión de supernovas, lo que produce emisión sincrotrón en radioondas extendida en todo el disco estelar. Paradójicamente, ahora pienso que quizás los agujeros negros y estrellas de neutrones en sistemas binarios de alta masa pueden producir un flujo mayor en radioondas que las supernovas. Cuestión a explorar. Obviamente, solo puede haber intensos brotes de formación de estrellas masivas si hay disponibles grandes cantidades de gas atómico y molecular. Sobre la base de esa hipótesis simple, someto propuestas para obser-

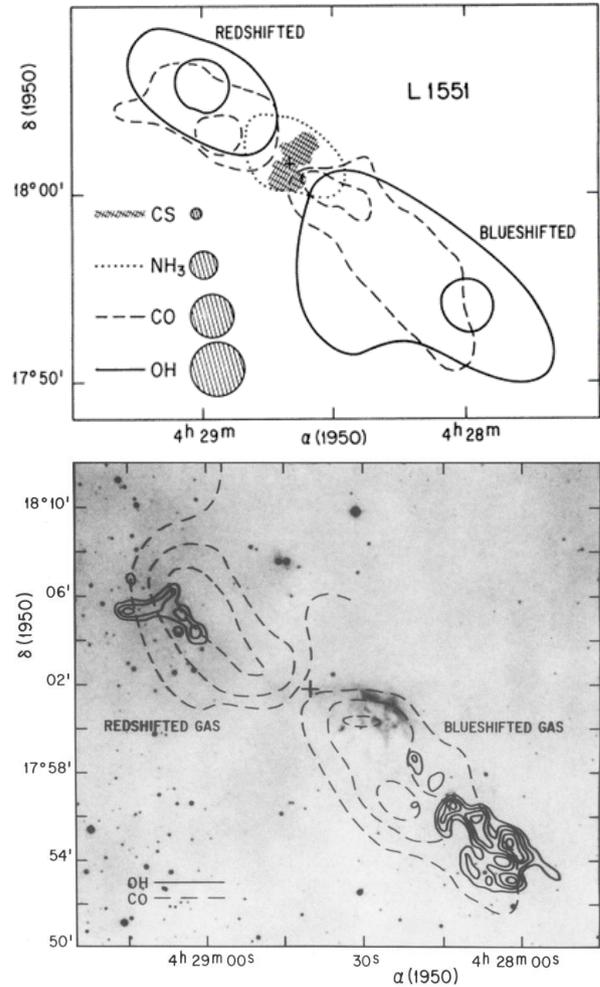


Figura 10: *Arriba*: Superposición de las transiciones de 1667 y 1665 MHz del radical OH observadas con el radiotelescopio de 305 m de Arecibo, sobre diferentes transiciones moleculares en el flujo bipolar de la región de formación estelar L1551. La absorción del OH representa la parte más tenue de flujo bipolar de alta velocidad. Reproducción de *Astrophysical Journal Letters*, Mirabel, Rodríguez, Cantó et al. (1985). *Abajo*: Radical OH de alta velocidad observado con el VLA de NRAO en absorción (línea continua) superpuesto sobre un mapa del CO de alta velocidad (línea a trazos) en el flujo bipolar de la región de formación estelar L 1551. El OH es producido en las extremidades del flujo molecular por disociación de H₂O debida a la radiación estelar en el medio interestelar. Reproducción de *Astrophysical Journal*, Rodríguez, Mirabel, Cantó, et al. (1989).

var una veintena de estas "radio bright spiral galaxies" en la línea de 21 cm con el radiotelescopio de 305 m de Arecibo, y en la transición CO(1-0) de la molécula de monóxido de carbono en la longitud de onda de 3 mm con la antena de 12 m del NRAO en Arizona.

Las observaciones en H I revelan espectros sorprendentes, nunca vistos, muy complejos. En algunos casos con completa y profunda absorción en H I, como es el caso de Arp 220/IC 4553 (Mirabel, 1982). La propuesta para las observaciones de CO(1-0) con la antena del NRAO es aprobada para todo el tiempo solicitado, pero diferida por un año debido al cambio ya programado de la superficie del radiotelescopio.

Para estas observaciones de gas molecular necesitaría la colaboración de un experto en observaciones milimétricas. Asisto a un simposio de la UAI en Amsterdam, Países Bajos, sobre los resultados de la radioastronomía del medio interestelar en la Vía Láctea, y en particular, sobre la incipiente radioastronomía milimétrica, cuya técnica de observación desconozco, ya que difiere en varios aspectos de la técnica de observación en ondas centimétricas y métricas.

En la sala de embarque para el vuelo de retorno a los Estados Unidos identifiqué a Dave Sanders (Fig. 11), quien en el congreso realizó una exposición sobre nubes gigantes de gas molecular en la Vía Láctea, que me había llamado la atención. En aquel entonces, Dave era astrónomo postdoctorado en la Universidad de Massachusetts, especialista en observaciones milimétricas de gas molecular en la Vía Láctea. Al ver que se cerraba el vuelo y el número escaso de pasajeros permitiría solicitar asientos adyacentes, luego de consultar con Dave, cambio de asiento para poder explicarle durante el vuelo transatlántico, la propuesta ya aceptada sobre observaciones de gas molecular en las “radio bright spiral galaxies”. Dave no conoce ese tipo de galaxias y tampoco ha leído mi trabajo sobre las observaciones de H I en Arecibo.

Hasta ese momento las observaciones de transiciones moleculares en ondas milimétricas se habían limitado a la Vía Láctea y recién se comenzaba a realizar observaciones de las galaxias más próximas como Andrómeda o Messier 81. En este contexto se establece una nueva colaboración, donde Dave contribuye con su conocimiento de las técnicas de observación en ondas milimétricas, yo con la lista de galaxias a observar, y en particular, con las precauciones que se deben tomar cuando se sintonizan los receptores de radioondas para observaciones de galaxias lejanas. De hecho, por mis investigaciones en cosmología y galaxias activas aprendí que en los observatorios radioastronómicos no se usa la definición óptica del corrimiento al rojo para calcular la frecuencia de “sintonía del cielo”.

La conjugación de ambas experiencias es la clave para la primera detección exitosa de todas las galaxias observadas. Por el contrario, los primeros intentos de detección de transiciones moleculares de este tipo de galaxias lejanas por parte de grupos de investigación de Estados Unidos, Europa y Japón utilizando otros radiotelescopios milimétricos resultan infructuosos. Simplemente porque sintonizan los receptores a frecuencias equivocadas, ya que utilizan la definición radioastronómica del corrimiento al rojo óptico inserta en el software de todos los radio observatorios, en lugar de utilizar la definición óptica del mismo. Por esa razón, dejan la emisión molecular de las galaxias lejanas fuera del rango de frecuencias del espectrómetro.

En 1984 debo repentinamente limitar mi participación en las misiones de observación ya programadas sobre galaxias infrarrojas luminosas en observatorios de Estados Unidos, América del Sur, Europa y Japón. A pesar de la productividad en investigación científica, reconocida por distinciones y subsidios de la NSF, debo reducir mis ausencias de la Universidad para poder cumplir con una dedicación docente de tres cursos de Física



Figura 11: Equipo de trabajo sobre la relación entre Galaxias Infrarrojas Ultraluminosas (ULIRGs) y Galaxias con Núcleos Activos (AGN). De izquierda a derecha: Dick Sramek (NRAO), Peter Barthel (U. de Groningen), Félix Mirabel, Dave Sanders (Caltech), Rick Edelson (U. de Maryland). Frente al Museo de Arte de China en Taiwan a mediados de los años '90.

por semestre. En este contexto, propongo a Dave Sanders que él tome el liderazgo en la continuación de esta área de investigación. Ese mismo año, Dave pasa a ocupar una nueva posición postdoctoral en Caltech, donde tiene acceso directo a los datos del satélite *IRAS*. Las observaciones de este satélite revelan que esas galaxias son tan luminosas en el infrarrojo como los cuásares. Inmediatamente realizamos la primera publicación sobre las Galaxias Infrarrojas Ultraluminosas (ULIRGs, por sus siglas en inglés), y la relación en este tipo de galaxias entre el contenido de gas molecular, continuo de radioondas y emisión en el infrarrojo por el polvo (Sanders & Mirabel, 1985).

Para profundizar las investigaciones sobre esta nueva clase de galaxias me otorgan la beca Guggenheim para trabajar dos años en el California Institute of Technology (Caltech), donde conozco la práctica de la investigación de frontera en astrofísica.

Además de realizar estudios en diferentes longitudes de onda de las listas de galaxias luminosas provenientes de las observaciones con *IRAS*, también se estudia en forma integral casos individuales paradigmáticos de estas galaxias luminosas en el infrarrojo. Para ello se deben realizar observaciones en el rango óptico y en el infrarrojo cercano a $2 \mu\text{m}$, por lo que solicito colaboración a José Maza, profesor de astronomía de la Universidad de Chile para las observaciones espectroscópicas en el óptico, y a Dieter Lutz del Instituto Max Planck en Garching Bei München, para las observaciones de las imágenes ópticas y del infrarrojo cercano. La Superantena, prototipo de ULIRG, es llamada así porque entre las extremidades de las colas de marea hay una distancia de 350 kpc. En la Fig. 12 se muestra un núcleo Seyfert y un núcleo *starburst* de dos galaxias en estado de fusión avanzada. Los núcleos se encuentran a una distancia entre sí de solo 10 kpc. La publicación Mirabel et al. (1991) será mencionada en un News & Views de la revista Nature.

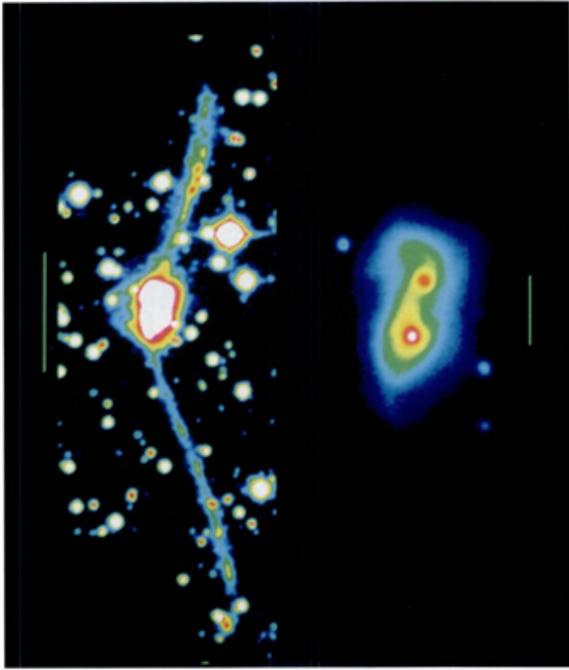


Figura 12: La Superantena, prototipo de galaxia ultraluminosa en radiación infrarroja ($> 10^{12} L_{\odot}$). Esta galaxia consiste en la colisión de dos galaxias espirales, como Andrómeda y la Vía Láctea, que por acción de marea han eyectado materia hasta distancias, entre sus extremidades, de 350 kpc. En la derecha se muestra una imagen de la zona central con un núcleo activo (Seyfert) y un núcleo con brote de formación estelar (*starburst*), que se han aproximado entre sí a una distancia de 10 kpc. Reproducción de *Astronomy & Astrophysics*. Mirabel, Lutz & Maza (1991).

Diferentes proyectos de investigación son realizados sobre esta nueva clase de galaxias con *IRAS*, Arecibo, VLA y varios radiotelescopios milimétricos: ver por ejemplo: OH Megamasers in Luminous IRAS Galaxies (Mirabel & Sanders, 1987); SEST observations of CO(1–0) in ultraluminous infrared galaxies (Mirabel et al., 1988); NTT images of ultraluminous infrared galaxies (Melnick & Mirabel, 1990).

Del conjunto de estas y otras investigaciones se concluye que las ULIRGs son galaxias ricas en gas y polvo que se encuentran en estado de fusión avanzada. Estas galaxias producen en el infrarrojo tanta energía como los cuásares ($> 10^{12} L_{\odot}$). Esa radiación infrarroja es emisión térmica de polvo calentado por la energía generada en intensos brotes de formación estelar y acreción hacia agujeros negros supermasivos.

De hecho, algunas de las galaxias infrarrojas más cercanas se encuentran en el “Atlas and Catalog of Interacting Galaxies” (Vorontsov-Velyaminov, 1959) y en el “Atlas of Peculiar Galaxies” (Arp, 1966), publicado siete años después. Para planificar observaciones ópticas e infrarrojas de las galaxias de *IRAS* con telescopios de 4 m encuentro fácilmente el catálogo de Arp, pero no el de Vorontsov-Velyaminov, que finalmente hallo en una noche nublada durante un proyecto de observaciones en la biblioteca del observatorio de Monte Palomar. Para mi sorpresa, en esa publicación se representa la morfología de las galaxias interactuantes dibujadas a mano!



Figura 13: Catherine Cesarsky y Laurent Vigroux.

Años después, durante la Perestroika que impulsa Mijail Gorbachov soy invitado a participar en un simposio en el Instituto Sternberg de Moscú, donde encuentro a Vorontsov-Velyaminov. En la conversación me cuenta las limitaciones que ha tenido para desarrollar sus investigaciones científicas, carencia de placas fotográficas, carencia de *reprints* de su trabajo original, falta de fotocopiadora, y otras muchas más, que en varios aspectos hallo análogas a las dificultades encontradas durante mi trabajo de tesis doctoral en Argentina.

En un simposio de la UAI en Kentucky doy una conferencia invitada sobre las ULIRGs. Geoffrey Burbidge, editor de *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* (ARAA) escucha mi exposición sentado en primera fila. Pero cuando comienzo a exponer mi interpretación de las superantenas como originadas por interacción de marea entre dos galaxias en colisión, súbitamente me interrumpe y me demanda en voz alta una justificación de la misma. De hecho, Burbidge conjuntamente con Arp desarrollaron una interpretación de las galaxias que se encuentran en el plano del cielo alrededor de cuásares, como objetos eyectados desde los cuásares. No sé si mi explicación lo convenció. De todas maneras, luego de mi disertación, Burbidge me invita a escribir un artículo para ARAA, y yo a su vez invito a Dave Sanders como colaborador. Hasta la fecha el trabajo, Sanders & Mirabel (1996), ha sido citado en más de 2300 publicaciones.

4.2. Continuación de investigaciones extragalácticas con el Infrared Space Observatory

Cuando la beca Guggenheim en Caltech llega a su término, mi colega francés Ilya Kazès me cuenta que en la Comisión de Energías Atómica y Alternativas de Paris-Saclay se abre una nueva posición *tenure track*. Postulo a esa posición, ya que me daría la posibilidad de continuar la línea de investigación sobre ULIRGs. De hecho, se solicita un investigador confirmado para trabajar en el programa extragaláctico de tiempo garantido con la cámara para imágenes infrarrojas ISOCAM (Investigadora principal: Catherine Cesarsky; Director técnico: Laurent Vigroux; Fig. 13) del “Infrared Space Observatory” (*ISO*) de la Agencia Espacial Europea. En el Departamento de Astrofísica de CEA-Saclay-Paris que es dirigido por Cesarsky y luego lo será por Vigroux, encuentro la libertad y condiciones ideales para desarrollar investigación científica.

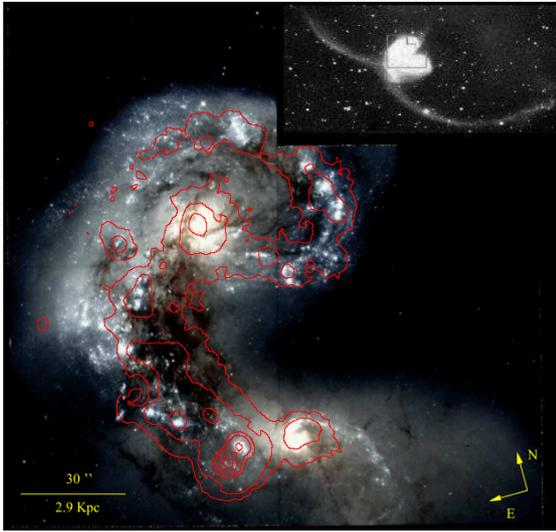


Figura 14: Superposición de la emisión en el infrarrojo intermedio (12–17 μm , contornos en rojo) de Las Antenas obtenida con ISOCAM del *Infrared Space Observatory*, sobre la imagen compuesta en los filtros V (5252 \AA) e I (8269 \AA) de la base de datos del HST. La emisión infrarroja más intensa proviene de una región marginalmente visible en el óptico. La formación estelar más intensa en estas galaxias en colisión tiene lugar en regiones ópticamente oscuras, todavía envueltas en grandes cantidades de polvo y gas. Reproducción de *Astronomy & Astrophysics*, Mirabel, Vigroux, Charmandaris et al. (1998b).

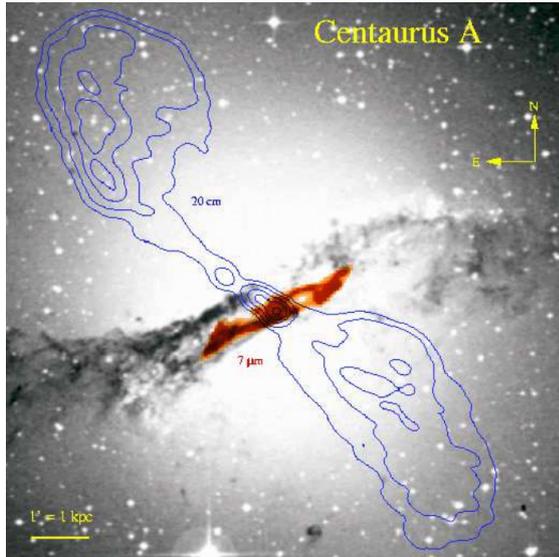


Figura 15: Imagen obtenida con ISOCAM en 7 μm (color rojo) y emisión en el continuo en 20 cm de los archivos de NRAO-VLA (contornos azules), superpuestas sobre una imagen óptica (negro y blanco) del *Palomar Sky Survey*. Mientras el gas asociado a la espiral bicónica en la región central rota a una velocidad radial máxima de 250 km s^{-1} , la componente estelar elipsoidal rota lentamente, aproximadamente en dirección perpendicular al plano que contiene la estructura espiral de polvo. Reproducción de *Astronomy & Astrophysics*, Mirabel, Laurent, Sanders et al. (1999).

Contrariamente a lo que supongo antes de llegar a Saclay, la sensibilidad de ISOCAM no es suficiente para



Figura 16: Horacio Dottori, Dieter Lutz, y Pierre-Alain Duc.

estudiar galaxias infrarrojas muy lejanas. Sin embargo, es un instrumento adecuado para estudiar regiones de formación estelar inmersas en polvo en galaxias cercanas. Tal es el caso de la región más intensa de formación estelar en la región ópticamente oscura, donde tiene lugar la colisión de los discos de dos galaxias espirales Sc en Las Antenas (Fig. 14), y de la estructura espiral del polvo y gas molecular en Centauro A (Fig. 15).

4.3. Galaxias enanas de marea

La primera evidencia firme sobre la formación de esta nueva clase de galaxias enanas se obtiene por las observaciones con el telescopio de 3.6 m del observatorio La Silla, ESO, Chile, en colaboración con Horacio Dottori de la Universidad de Rio Grande do Sud, Brasil, y Dieter Lutz del Instituto Max Planck en Garching Bei München, Alemania (Fig. 16). Las Antenas son galaxias espirales Sc en colisión, y las propiedades del objeto en la extremidad de la cola de marea son comparables a las propiedades de las galaxias enanas IC 1604 y NGC 6822 del Grupo Local. La primera confirmación observacional sobre la existencia de esta clase de objetos se encuentra en la Fig. 17.

Cuando el manuscrito de esa publicación aún estaba siendo evaluado por los árbitros, propongo una búsqueda sistemática de este tipo de objetos como proyecto de tesis doctoral. Para el comité encargado de decidir sobre el financiamiento del proyecto, el tema parece riesgoso, inusual y de resultado incierto para una tesis doctoral. Por ello en primera instancia recibo un cuestionamiento. Pero finalmente, quizás por la reputación de trabajos anteriores, se otorga el financiamiento de la beca doctoral. Pierre-Alain Duc es seleccionado como becario y pasa a liderar esa área de investigación. En su tesis doctoral y trabajos posteriores como post-doc en Cambridge, Inglaterra, encuentra una diversidad de galaxias enanas de marea, empezando por Arp 105: “La Guitarra” (Fig. 18). Actualmente, Pierre-Alain es director del Observatorio de Estrasburgo.

Cuestiones de actualidad en esta área: 1) ¿Son las galaxias enanas de marea sistemas gravitacionalmente estables?; 2) Si son estables, ¿esto quiere decir que se pueden formar galaxias sin materia oscura?; 3) ¿Qué fracción de las galaxias enanas irregulares pueden haberse formado como galaxias enanas de marea?

4.4. Microcuásares en astrofísica de altas energías y cosmología

Los microcuásares son objetos de la astrofísica de altas energías relacionados a dos aspectos de la Física Rela-

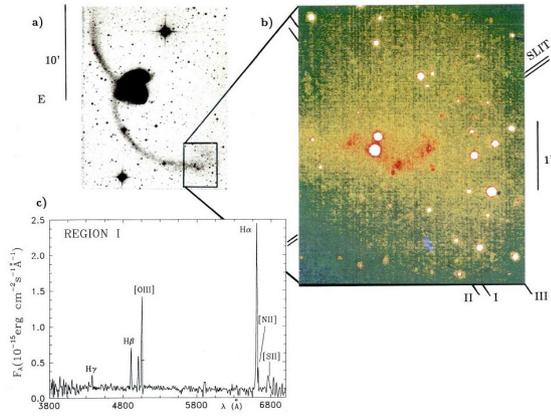


Figura 17: Galaxia Enana de Marea en Las Antenas. Imagen óptica del extremo sur de las Antenas obtenida con el telescopio de 3.6 m de ESO. Esta imagen en colores artificiales muestra en rojo una cadena de regiones H II, los círculos en color blanco son estrellas de la Vía Láctea. Las regiones H II se encuentran inmersas en un fondo difuso de emisión estelar. La región H II más luminosa alcanza a tener una luminosidad equivalente a 300 veces la luminosidad de la región H II de Orión en la Vía Láctea. Las estrellas ionizantes tienen edades menores a 2×10^6 a, las cuales son inferidas a partir del espectro de la región. Estas observaciones muestran que a 100 kpc de las galaxias NGC 4038/39, se forma un objeto similar a las galaxias enanas irregulares como IC 1604 y NGC 6822, a partir de los desechos de la colisión expulsados por acción de marea. Reproducción de *Astronomy & Astrophysics*, Mirabel, Dottori & Lutz. (1992a).

tivista: los agujeros negros y jets relativistas. La primera detección de jets relativistas en la Galaxia fue en la binaria compacta de alta masa SS 433 (Margon et al., 1979), donde se observan variaciones Doppler periódicas en las frecuencias de líneas espectrales ópticas, debidas a la precesión de jets con velocidades de $0.26c$. Varios años después, a partir de los '90, a partir de observaciones en ondas de radio de las fuentes compactas de radiación X descubiertas por satélites espaciales, se comienza a identificar nuevas fuentes de jets relativistas en la Vía Láctea llamados microcuásares. Estos son laboratorios cercanos que sirven para el estudio de los jets relativistas y fenómenos de alta energía que se observan en todo el universo, convirtiéndose en una nueva área de la astrofísica de altas energías. Desde entonces ha habido diez congresos internacionales sobre microcuásares, siendo uno de los temas principales de un simposio de la UAI sobre jets en el universo que tuvo lugar en Buenos Aires en el año 2010.

4.4.1. El descubrimiento de los microcuásares

En diciembre de 1989 una colaboración entre la Unión Soviética, Francia y Dinamarca pone en órbita el satélite *GRANAT* para la observación de fuentes de radiación X dura y radiación gamma. Contrariamente a lo esperado, se encuentra que la fuente más intensa de radiación de altas energías en la región del centro galáctico no es Sgr A*, sino una fuente previamente descubierta por el satélite *Einstein* llamada 1E 1740.7-2942. Inmediatamente se sospecha que esta es la fuente responsable de

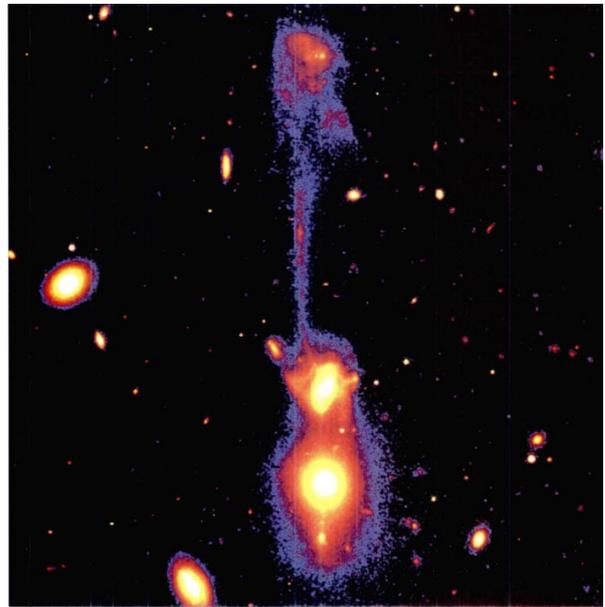


Figura 18: Galaxias enanas de Marea en Arp 105. Imagen CCD en banda V con el Canada-France-Hawaii Telescope. Arp 105, es una galaxia espiral que está siendo descuartizada por una galaxia elíptica gigante en la región central del cúmulo de galaxias Abel 1185. En los extremos de las colas de marea se encuentran una galaxia enana compacta y una galaxia irregular que se asemeja a las nubes de Magallanes. Se propone que estas galaxias enanas son objetos reciclados a partir de los desechos expulsados hacia el espacio intergaláctico por acción de mareas sobre la galaxia espiral. La dimensión de la imagen corresponde a un tamaño físico de 190×190 kpc². Reproducción de *Astronomy & Astrophysics*, Duc & Mirabel (1994).

una emisión variable en 511 keV tentativamente reportada por experimentos con globos de la NASA, la cual es atribuida a la aniquilación de materia y antimateria ($e^- e^+$). Por tal razón, esta fuente es bautizada por una editorial de la revista *Physics Today* como “El Gran Aniquilador de materia y antimateria”. La posición precisa y naturaleza de la fuente es aún desconocida.

Razono que una fuente de fotones de alta energía como el “Gran Aniquilador” también debe ser fuente de partículas de altas energías, que en interacción con campos magnéticos producen emisión sincrotrón en radioondas. A fin de localizar la posición en el cielo del “Gran Aniquilador” 1E 1740.7-2942 con una precisión mejor que un segundo de arco, se me ocurre realizar observaciones en radioondas con el interferómetro VLA, simultáneamente con observaciones del satélite *GRANAT*. Jacques Paul, Stephane Corbel y François Lebrun de CEA-Saclay, Francia, proveen la información sobre las observaciones con *GRANAT*. Para las observaciones con el VLA propongo a Luis Felipe Rodríguez colaborar en este proyecto. Luis Felipe es especialista en observaciones con el VLA, con el cual ya había colaborado en estudios de flujos bipolares en regiones de formación estelar utilizando Arecibo y el VLA (ver Sec. 3.3.9.). Entonces, enviamos nuevamente una propuesta al VLA, esta vez para monitorear el círculo de error de la emisión de altas energías del “Gran Aniquilador” observado con



Figura 19: (*izq a der.*) Mirabel, Rodríguez, Cordier et al. (1992b); Rodríguez & Mirabel (Saclay 1998); Mirabel & Rodríguez (1994).

GRANAT.

En primer lugar, el monitoreo simultáneo en radioondas y radiación X y gamma mostró que las variaciones de una fuente de radio compacta observada con el VLA están correlacionadas con variaciones de la fuente de alta energía observada con GRANAT, lo cual permitió confirmar que 1E 1740.7–2942 es la fuente de emisión gamma y localizar la posición del “Gran Aniquilador” con una precisión mejor a un segundo de arco.

En segundo lugar, a medida que vamos adicionando los datos del monitoreo con el VLA, para nuestra sorpresa, aparecen condensaciones de emisión alineadas a ambos lados de la fuente compacta, las cuales se asemejan a los jets observados en los cuásares y radio galaxias. Al consultar los archivos del VLA vemos que existen observaciones de 1E 1740.7–2942 (P.I. Shri Kulkarni) de dominio público, ya que tenían más de dos años de antigüedad. De todas maneras solicitamos y obtenemos permiso de Kulkarni para la utilización de esas observaciones, que se incorporan a las de nuestro monitoreo para producir la imagen de 1E 1740.7–2942, como fuente compacta en el centro de los jets que se muestran en la tapa de la revista Nature (Fig. 19; Mirabel et al., 1992b). Además, en la misma tapa la editorial reproduce el término *microquasar* que se menciona en el texto.

El término “microcuásar” sugiere una analogía más que morfológica, o sea, una analogía conceptual basada en la universalidad de la Física en el entorno de los agujeros negros. Propone implícitamente que la fenomenología en las inmediaciones de los agujeros negros puede ser descripta por un único sistema de ecuaciones, independientemente de las masas de los agujeros negros, con la salvedad que las escalas de espacio y de tiempo son proporcionales a las masas de los agujeros negros. Esta idea será desarrollada más explícitamente en otra publicación en Nature (Fig. 21; Mirabel & Rodríguez, 1998), una vez confirmada por observaciones adicionales que la fenomenología de la acreción-eyección es análoga en microcuásares y cuásares, tal como se sugiere en la publicación de 1992.

El descubrimiento de los microcuásares y la constitu-

ción de esta nueva área de investigación, en su comienzo fue motivado por observaciones con globos de la NASA desde la alta atmósfera de una posible variación de la intensidad global de la línea de aniquilación electrón-positrón de 511 keV proveniente de la región del centro galáctico. La búsqueda del “Gran Aniquilador”, o sea, de la fuente compacta responsable de esa supuesta variación nos llevó a 1E 1740.7–2942, que si bien es una fuente variable de emisión en ese rango de energías, no puede dar cuenta de la intensa variación global detectada por las observaciones con globos. De hecho, el satélite *INTEGRAL*, sucesor de *GRANAT*, tampoco ha detectado dicha variabilidad. Por una suposición que resultó ser errónea, se encuentra y constituye un nuevo territorio de investigación. Esto muestra que en ciencia experimental/observacional, a partir de suposiciones erróneas se pueden encontrar nuevas verdades. En ciencia, y quizás también en la vida, el miedo al error es miedo a la verdad.

4.5. Movimientos superlumínicos aparentes en la Galaxia

Si la analogía microcuásar-cuásar es correcta, con Luis Felipe Rodríguez nos preguntamos, en 1992, si los microcuásares podrían producir jets con movimientos aparentes superlumínicos, tal como se observan en los cuásares y radiogalaxias, con velocidades aparentes de hasta decenas de veces la velocidad de la luz. Hasta ese momento, en los cuásares se detectan jets solamente de un lado de la fuente compacta, lo cual no permite determinar con certeza los parámetros físicos de los jets relativistas, como ser, la velocidad intrínseca y la potencia de los jets.

Una noche, colegas franceses de la misión *GRANAT* me informan en Saclay sobre el descubrimiento de un objeto en el plano galáctico que, repentinamente, había comenzado a producir radiación X y gamma intensa. Esa fuente se llama GRS 1915+105 (“GR”=GRANAT; “S”=Source; 1915+105=coordenadas ecuatoriales). Sospechando que esa radiación de alta energía puede estar asociada a la génesis de potentes jets

relativistas, suponemos que GRS 1915+105 puede ser el candidato esperado para la detección de movimientos aparentes superlumínicos en la Galaxia. Comienzo a escribir una propuesta para monitorear GRS 1915+105 con el VLA de NRAO, pero descubrí que en unas horas más, a medianoche del uso horario en el Este de los Estados Unidos, a las cinco de la mañana del día siguiente correspondiente al uso horario europeo, se cumple el tiempo límite para la recepción de propuestas de observación con el VLA de NRAO. Rápidamente escribo la propuesta de observación para este nuevo “blanco de oportunidad” (*target of opportunity*). Afortunadamente, la propuesta entra a tiempo en el fax de la oficina de NRAO en Charlottesville, estado de Virginia. Sin embargo, me llama la atención que días después no recibo acuso de recepción de la propuesta.

A comienzos de los años '90 los observatorios ópticos-infrarrojos y radioastronómicos todavía no estaban habituados a realizar las observaciones de blancos de oportunidad necesarias para una comprensión integral de las fuentes cósmicas de altas energías, que en general se caracterizan por ser altamente variables. En aquel tiempo, yo ya había comenzado a realizar ese tipo de observaciones, primero con Arecibo, y luego con el radiotelescopio milimétrico de 30 m de IRAM en la Sierra Nevada de Andalucía. GRS 1915+105 además de ser monitoreado con *GRANAT*, también lo es con el satélite de NASA llamado Rossi X-Ray Timing Explorer (*RXTE*), de radiación X en cuatro bandas y de gran campo. *RXTE* provee información sobre las observaciones en tiempo casi real. Por el análisis de los datos que vamos analizando de *GRANAT* y *RXTE*, se comienza a intuir con cierta anticipación, por los cambios de intensidad e índice espectral de la radiación X, cuando se producirá una nueva eyección de potentes jets.

Algunos meses después llega el momento en que se anticipa la posibilidad de una nueva erupción, por lo que solicito la utilización del tiempo de observación de la propuesta. Sin embargo, el director de operaciones del VLA responde que no han recibido ninguna propuesta para justificar la ejecución de las observaciones que solicito. Llamo a la oficina de NRAO en Charlottesville y la secretaria recuerda muy bien haber recibido el fax de la propuesta y haberlo reenviado a la oficina de recepción de propuestas en Socorro, Nuevo México. En realidad yo había enviado por error el fax de la propuesta a la oficina en Virginia en vez de enviarla a la oficina de NRAO en Socorro. Llamo por teléfono a Miller Goss, director de operaciones del VLA, constata la recepción de la propuesta a tiempo y concede en forma discrecional el tiempo de observación. A partir de ese momento, por un tiempo permanecemos al acecho de un brote de alta energía y de una intensa emisión en radioondas proveniente de GRS 1915+105. Por azar se producen circunstancias favorables para el proyecto. En ese momento, Luis Felipe Rodríguez está en año sabático en el sitio del VLA, en el estado de Nuevo México, a fin de instalar receptores de 7 mm en diez antenas. Por lo tanto quedan disponibles para otros proyectos las 17 antenas restantes. Observaciones de archivo con el VLA de la región del cielo que contiene GRS 1915+105 en diferentes épocas, y observaciones de monitoreo en el

contexto de nuestra propuesta, muestran la aparición y desaparición de fragmentos de emisión en radioondas alrededor de la fuente. Aun no se puede saber si esos fragmentos se deben a emisiones isotrópicas análogas a “fuegos artificiales”, distribuidas aleatoriamente alrededor de la fuente compacta, o a eyecciones colimadas de jets relativistas.

Un fin de semana, Luis Felipe me comunica que la fuente compacta de radioondas había aparecido por primera vez con gran intensidad y con forma ligeramente ovalada. Además, la atmósfera tenía un nivel de humedad alto, por lo que las observaciones en 7 mm son interrumpidas y, consecuentemente, las 17 antenas restantes se pueden utilizar para las observaciones en 3.6 cm de nuestro proyecto. Unos días después aparecen un par de condensaciones que se han desprendido de la fuente compacta y manifiestan asimetría en brillo y velocidad. Esto es inmediatamente interpretado como debido a *Doppler boosting* relativista. La condensación del lado “izquierdo”, que se mueve más rápido y es más brillante, se mueve hacia el observador, y la condensación menos luminosa, que parece moverse más lentamente hacia el lado derecho, se debe a *de-boosting* porque se aleja del observador (Fig. 19, 1994).

Esto confirma que se trata de una eyección relativista antisimétrica de nubes de plasma gemelas hacia ambos lados de la fuente central. Es la primera vez que se observan jets relativistas hacia ambos lados de una fuente, con velocidades aparentes mayores que la velocidad de la luz. En ese momento saco pasaje de avión para Socorro, en Nuevo México, a fin de seguir las observaciones del movimiento de los jets, hasta su desaparición un mes y medio después. Luis Felipe se encarga de hacer una exposición de este descubrimiento en el instituto de NRAO. Al terminar la exposición, el director Miller Goss declara que este es el descubrimiento más importante realizado con el VLA de NRAO.

Las asimetrías aparentes en brillo y velocidad de los jets son explicadas en términos de una eyección antisimétrica de jets gemelos a una velocidad de 95 % de la velocidad de la luz (c), a lo largo de una dirección que forma un ángulo de 70° con la línea de la visual. Si la velocidad de la eyección es de $0.95c$ y suponiendo que en las eyecciones hay un protón por cada electrón, los cuales deben tener factores de Lorentz de 10^3 para producir emisión sincrotrón, se infiere que la energía cinética de la eyección es enorme, de 3×10^{46} erg, equivalente a la energía cinética de un tercio de la masa de la Luna moviéndose al 95 % de la velocidad de la luz.

Comprender cabalmente las observaciones en términos de la relatividad restringida nos lleva varios días. Luego nos enteramos que este es el primer problema formulado en las Olimpiadas Internacionales de Física que tienen lugar en Suecia, unos meses después de la publicación Mirabel & Rodríguez (Fig. 19; 1994). En la competencia olímpica los jóvenes deben resolver este mismo problema en algunas decenas de minutos, cuando a nosotros nos llevó días, lo cual nos llamó la atención. Pero pensándolo bien, una cosa es resolver un problema dado, y otra es llegar a formular el problema para luego resolverlo.

Mirabel & Rodríguez (1994) proponen un nuevo

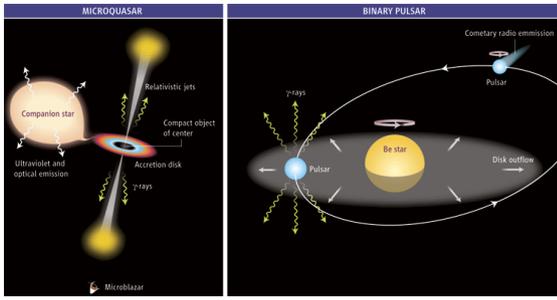


Figura 20: Microcuásares y pulsares en sistemas binarios de alta masa, son fuentes de radiación de alta energía (GeV y TeV). Reproducción de Science. Mirabel (2006).

método para la determinación de distancias de las fuentes de eyecciones relativistas en el Universo. Este método es correcto desde el punto de vista teórico pero actualmente difícil de implementar en la práctica. Si hay protones en las eyecciones, es factible la producción de líneas espectrales provenientes de iones, las que combinadas con los movimientos propios, permitirían determinar las distancias a las que se encuentran las fuentes de eyecciones relativistas. Por ello, en el mismo momento en que aparece la publicación, el 1 de septiembre de 1994, ya estoy en el observatorio de Mauna Kea, Hawaii, realizando la búsqueda de líneas espectrales provenientes de los jets de GRS 1915+105. Esta búsqueda resulta infructuosa por dos razones posibles: o los jets son puramente leptónicos y no hay iones en los jets para observar líneas espectrales de recombinación, o si las hay, las líneas espectrales quizás son tan anchas en frecuencia que desbordan el rango de detección del espectrómetro. Quizás vale la pena intentar nuevamente usando el nuevo espectrómetro X-SHOOTER de ESO, que tiene un ancho de banda que cubre longitudes de onda de UV-ópticas-infrarrojas (300–2500 nm). Mirabel & Rodríguez (1994) ha sido citado en más de 940 publicaciones.

Mientras estoy intentando la detección de esas posibles líneas espectrales a 4200 m s.n.m., en el telescopio UKIRT en Mauna Kea, Hawaii, periodistas del diario Clarín, el de mayor tiraje en Argentina, intentan contactarme sin éxito para una nota sobre los movimientos superlumínicos aparentes. Al no poder localizarme, la editorial de ese diario simula en una publicación a dos carillas completas, una entrevista insertando una foto de archivo. En esa publicación se anuncia que “un astrónomo argentino destrona la teoría de la relatividad de Einstein”, ya que ha encontrado velocidades superiores a la de la luz... Averiguo que la especialidad periodística del que ha hecho la nota es el fútbol. A partir de aquel momento, en el año 1994, descubrí que Clarín no es un periódico serio, y que (al menos en este caso), con el fin de lograr sensacionalismo, falsea la realidad.

Más adelante, con el desarrollo de la astrofísica observacional para radiación de altas energías por medio de satélites y de observatorios Cherenkov, se detecta emisión en GeV y TeV proveniente de objetos compactos (agujeros negros y estrellas de neutrones) en sistemas binarios de alta masa (Fig. 20 Mirabel, 2006, 2012).

4.6. Acreción y génesis de jets relativistas en agujeros negros

Como la escala de tiempo de los fenómenos en el entorno de agujeros negros es proporcional a la masa del agujero negro, en el lapso de una hora se puede observar en una binaria X con un agujero negro de $10 M_{\odot}$ como GRS 1915+105, la relación entre las inestabilidades en el disco de acreción asociadas a la génesis de jets relativistas (Fig. 21). En dicha figura se muestran las observaciones simultáneas con *RXTE* en radiación X (color negro), con UKIRT en Hawaii en el IR a $2.2 \mu\text{m}$ (color rojo), y en radio a 3.6 cm (color azul) con el VLA. La emisión en X proviene del disco de acreción que después de amplias inestabilidades, decrece súbitamente en energías equivalentes a $10^6 L_{\odot}$, al mismo tiempo que el índice espectral cambia en radiación X del estado *low-hard* a *high-soft*. Durante algunos minutos permanece en este estado hasta que un pico de emisión en la radiación X asociado a una reversión del índice espectral, marca el inicio de una eyección que primero se observa como emisión sincrotrón a $2 \mu\text{m}$, y luego, con un retardo de ~ 15 minutos se observa con el VLA a 3.6 cm. Estas son las primeras observaciones simultáneas multifrecuencia (en X, IR y radio) de un fenómeno de acreción-eyección en el entorno de un agujero negro. Este resultado se obtiene luego de más de una decena de intentos, con una tasa de fracasos mayor al 90%. Para estas observaciones es necesario coordinar la disponibilidad simultánea de los tres instrumentos en observatorios diferentes. Además, una vez que se obtiene la disponibilidad simultánea para obtener las observaciones en los tres dominios de longitud de onda, la fuente debe “colaborar”, es decir, debe generar una eyección en el preciso momento en que las condiciones de observación están dadas.

La interpretación de estas observaciones es la siguiente: el disco de acreción entra en un proceso de fuertes inestabilidades, y súbitamente la parte interior del mismo desaparece más allá del horizonte hacia el agujero negro. Luego, la parte interior del disco de acreción comienza a rellenarse hasta que 5 minutos después, asociado a la inversión del índice espectral, se produce un pico en radiación X, que marca la iniciación del jet. Este consiste en un plasma denso que a medida que se expande adiabáticamente deviene progresivamente transparente para longitudes de onda cada vez mayores, primero en radiación X “soft”, luego la emisión sincrotrón a $2 \mu\text{m}$, y con un tiempo de retardo de 15 min en ondas centimétricas. Es interesante señalar que el tiempo de retardo observado entre el pico de emisión en onda de radio a 3.6 cm, respecto al pico de la emisión en el IR a $2 \mu\text{m}$, es el mismo que se infiere utilizando ecuaciones formuladas en el año 1966 para eyecciones relativistas en cuásares, suponiendo expansión adiabática de los jets (van der Laan, 1966). Por otra parte, una relación análoga entre inestabilidades en el disco de acreción y la eyección de jets relativistas en el cuásar 3C 120, son publicadas cuatro años más tarde, pero en intervalos de años en vez de minutos (Marscher et al., 2002), como predice la analogía cuásar–microcuásar (Fig. 21 centro). Estos trabajos teóricos previos y observaciones posteriores confirman definitivamente la analogía cuásar–microcuásar

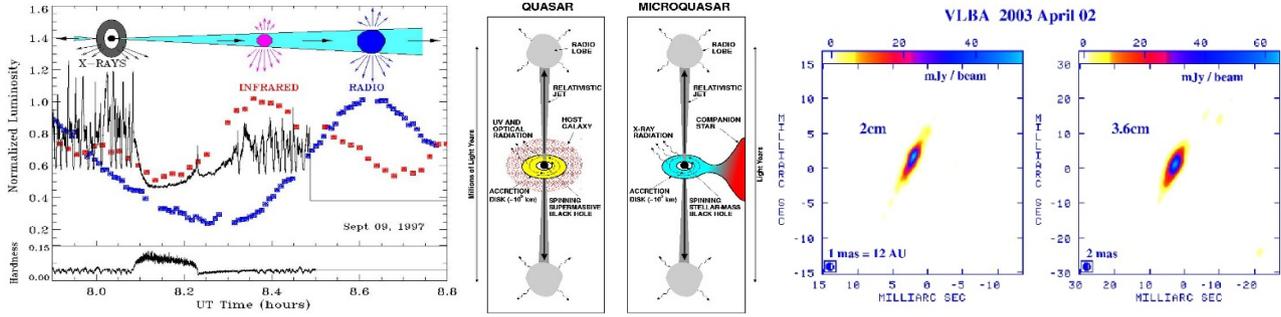


Figura 21: De izquierda a derecha: Curvas de luminosidad en X con RXTE (color negro), IR con UKIRT (rojo) y radio con el VLA (azul) del microcuásar GRS 1915+105. Reproducción de *Astronomy & Astrophysics*: Mirabel, Dhawan, Chaty et al. (Mirabel et al., 1998a). Representación esquemática de la analogía de la analogía Cuásar–Microcuásar. Reproducción de *Nature* (Mirabel & Rodríguez, 1998). Jets compactos en el microcuásar GRS 1915+105 con tamaños de unas pocas centenas de unidades astronómicas. Reproducción de *Astrophysical Journal*, Dhawan, Mirabel & Rodríguez (2000).

propuesta por Mirabel & Rodríguez (1998).

En el extremo derecho de la Fig. 21 se muestran imágenes de los jets generados durante las minieyecciones. Estas imágenes fueron obtenidas con el interferómetro VLBA de NRAO, que consiste en diez antenas distribuidas en territorio de los EEUU, entre Hawaii y las Islas Vírgenes en el mar Caribe. Estos jets son compactos, de tamaños de algunas pocas centenas de unidades astronómicas, colimados en la misma dirección de las potentes eyecciones del tipo que se muestra en la Fig. 19 (panel derecho). Las investigaciones sobre microcuásares hasta el año 1998 han sido sintetizadas en la revista *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* (Mirabel & Rodríguez, 1999), que hasta la fecha ha sido mencionada en 730 publicaciones.

4.7. Formación de agujeros negros estelares

En colaboración con Irapuan Rodrigues (Fig. 22), doctorado en la Universidad de Rio Grande do Sul, actualmente profesor en la Universidad do Vale do Paraíba en el estado de San Pablo, iniciamos el análisis de observaciones de agujeros negros en sistemas binarios de radiación X, para determinar su cinemática e inferir el mecanismo de formación de agujeros negros estelares. Una de las cuestiones a dilucidar consiste en saber si los agujeros negros estelares se forman como remanentes de estrellas masivas que terminan su vida explotando como supernovas energéticas, tal como habitualmente se supone. De ser así, los agujeros negros en sistemas binarios de radiación X deberían ser despedidos de su lugar de formación, y observar que se mueven con velocidades espaciales anómalas respecto al medio circundante.

Para obtener la velocidad espacial en tres dimensiones utilizamos los jets compactos observados en los microcuásares para determinar los movimientos propios, las velocidades radiales determinadas a partir de espectros de las estrellas compañeras, y las distancias determinadas por diferentes medios. Los datos disponibles nos permitieron inferir las velocidades espaciales para solo cinco sistemas con agujeros negros. La conclusión tentativa a partir de esta pequeña muestra es que los agujeros negros con masas $\geq 10 M_{\odot}$ se forman por implosión total o casi total, sin supernovas energéticas, co-

mo es el caso del agujero negro de $\sim 15 M_{\odot}$ en Cygnus X-1, el cual ha permanecido anclado y se mueve conjuntamente con su asociación estelar de origen Cygnus OB3 (Fig. 22 Mirabel & Rodrigues, 2003).

Es posible que agujeros negros con masas $< 10 M_{\odot}$ se formen a través de explosiones de supernovas, como es el caso de las estrellas de neutrones. Un ejemplo de ello podría ser XTE J1118+480 (Fig. 22), el primer agujero negro en una binaria X identificado en el halo de nuestra Galaxia. Se ha propuesto que este sistema habría sido catapultado desde el disco hacia el halo galáctico por la explosión de una supernova. Sin embargo, no se puede excluir que el agujero negro en XTE J1118+480 haya sido eyectado por interacción dinámica de una región de alta densidad estelar en un cúmulo globular, atrapan-do una pequeña estrella para su largo viaje por el halo galáctico. La contribución de Vivek Dhawan (Fig. 22), de origen indio, y en aquel entonces *Project manager* del VLBA de NRAO, ha sido esencial para la programación, ejecución y análisis de las observaciones con el VLBA.

Actualmente, esta línea de investigación iniciada con Irapuan Rodrigues y Vivek Dahwan es desarrollada por diferentes grupos de investigación. Utilizando observaciones VLBI de los jets compactos en radioondas, y más recientemente con los datos de creciente precisión que se están obteniendo con *GAIA* en el óptico, se pueden determinar paralajes trigonométricas y movimientos propios con mayor precisión. Nuestra conclusión tentativa sobre la formación por implosión de agujeros negros de más de $10 M_{\odot}$ (Cygnus X-1 y GRS 1915+105), ha sido confirmada por diferentes grupos de investigación utilizando nuevas observaciones. En Mirabel (2017) se presenta una síntesis de los resultados de esta línea de investigación sobre la formación de agujeros negros estelares en binarias X y agujeros negros binarios.

4.8. Agujeros negros estelares en el albor del Universo

En el año 2010 recibí una invitación para asistir a una reunión en la Universidad de Maryland a fin de realizar una exposición general sobre microcuásares. En esa oportunidad presenté una nueva hipótesis: en los albores

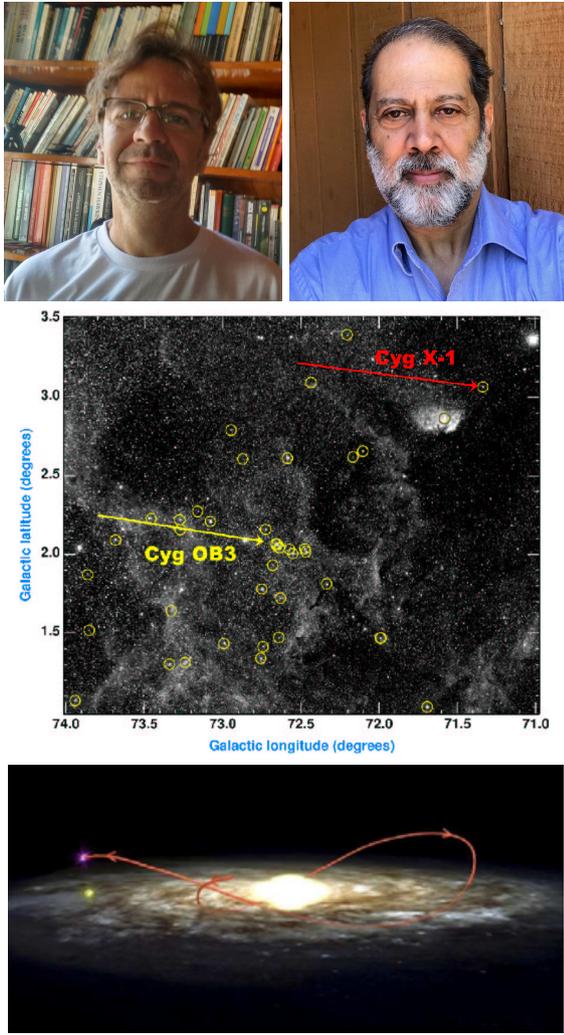


Figura 22: (*Arriba*): Izq. Irupuan Rodrigues, der. Vivek Dhawan; (*centro*): Imagen óptica del cielo que contiene a Cygnus X-1 y la asociación de estrellas masivas Cygnus OB3. Las flechas roja y amarilla muestran las magnitudes y direcciones de los movimientos en el plano del cielo de la contraparte de radio de Cygnus X-1 y el movimiento promedio de Cygnus OB3, respectivamente, durante los últimos 0.5 Ma. Luego de la formación del agujero negro, Cygnus X-1 permaneció anclado en la asociación estelar madre Cygnus OB3, de lo cual se infiere que el agujero negro se formó por implosión de una estrella de $40 M_{\odot}$. Reproducción de Science, Mirabel & Rodrigues (2003); (*abajo*): Representación esquemática de la órbita de XTE J1118+480 (curva roja) durante los últimos 240 Ma, lo que corresponde al periodo orbital del sistema solar (curva amarilla) alrededor del centro galáctico. Reproducción de Nature, Mirabel, Dhawan, Mignani et al. (2001).

del Universo deberían haberse formado en forma prolífica, a partir de las estrellas masivas de primera generación, agujeros negros estelares en sistemas binarios de alta masa. Por su retroacción en radiación X y jets relativistas deberían impactar en la física del medio interestelar en la época oscura y de reionización que tuvo lugar entre los primeros 400 000 y 1000 Ma del Universo (Fig. 23)

Esta hipótesis surge a partir de las observaciones que sustentan la formación de agujeros negros por colapso

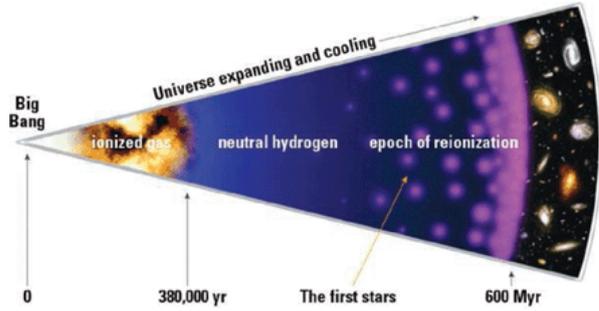


Figura 23: Evolución cósmica durante los primeros 800 Ma. Crédito WMAP. A partir de resultados teóricos y observacionales en diferente áreas de la astrofísica, se propone que los agujeros negros en sistemas estelares múltiples de alta masa tienen un impacto importante en la era de reionización del universo, y en la formación de agujeros negros binarios detectados por LIGO (Mirabel, 2019).

directo de estrellas masivas, sin explosión de supernovas energéticas. Esto implica que los remanentes de binarias estelares con masas mayores a unas $18 M_{\odot}$ deberían permanecer gravitacionalmente ligados. Esta hipótesis la voy desarrollando con la incorporación y síntesis de resultados teóricos y observacionales en otras áreas de la astrofísica. Como ser, que más del 80 % de las estrellas masivas se forman en sistemas múltiples, el aumento de la pérdida de masa en estrellas masivas con el aumento de la metalicidad, lo que implica la formación de agujeros negros más masivos y más frecuente en épocas tempranas del Universo, la observación de una alta tasa de formación de binarias compactas de alta masa en galaxias enanas irregulares del universo local. En este contexto propongo que, además de la radiación UV de las estrellas masivas de las primeras generaciones, la radiación X y jets relativistas de los remanentes de estrellas masivas en el albor del universo, o sea, agujeros negros en binarias X de alta masa, también deberían impactar en épocas tempranas del Universo.

En la pausa de café de aquella reunión en Maryland, Avi Loeb de origen israelí (Fig. 24), director del Departamento de Astrofísica Teórica de Harvard, manifiesta interés por esta hipótesis. Luego de una breve conversación ofrece su colaboración para el desarrollo teórico, con participación de sus investigadores post-doctorales, Mark Diskra, de origen holandés y actualmente profesor en la Universidad de Oslo, y Jonathan Pritchard, de origen inglés, actualmente *lecturer* en el Imperial College de Londres (Fig. 24). Por mi parte, invito a participar en esta colaboración a Philippe Laurent de origen francés y miembro de APC-Universidad de Paris y CEA-Saclay. Philippe contribuye con su conocimiento de Cygnus X-1. Mark con la formulación de las ecuaciones que comparan el calentamiento e ionización del medio intergaláctico por la radiación X de las binarias compactas, con la radiación ultravioleta de las estrellas progenitoras. Jonathan contribuye con el cálculo de la evolución térmica del medio intergaláctico y temperatura de brillo de la transición de 21 cm del hidrógeno atómico, incorporando la retroacción de los agujeros negros en binarias X de alta masa (BH-HMXBs).

Este trabajo interdisciplinario, que incorpora nuevos



Figura 24: Colaboradores en el trabajo "Agujeros negros estelares en el albor del universo" publicado en *Astronomy & Astrophysics* (Mirabel et al. 2011) que motiva un *News and Views in Nature*. De izq. a der.: Avi Loeb, Mark Diskra, Philippe Laurent y Jonathan Pritchard.

resultados de diferentes áreas de la astrofísica en una de las cuestiones de frontera en la cosmología actual, es publicado en Mirabel et al. (2011), y motiva un *News & Views in Nature* (Haiman, 2011). Las predicciones derivadas de este trabajo podrán ser contrastadas por los muchos experimentos destinados a revelar las propiedades de la emisión en 21 cm del hidrógeno atómico en la era de pre-reionización y reionización, con las configuraciones de radiotelescopios como LOFAR, SKA, HERA, y los experimentos con dipolo único destinados a observar la señal global de 21 cm, como DARE, EDGES, LEDA. Recientemente, he propuesto que si la absorción de hidrógeno atómico reportada por EDGES* (Bowman et al., 2018) a $z=17$ es confirmada, esta observación sería la primera indicación cuasidirecta de la existencia de numerosas poblaciones de BH-HMXB-Microcuásares, entre los primeros 200 y 260 Ma después del Big Bang (Mirabel, 2019).

4.9. Agujeros negros binarios y fuentes de ondas gravitacionales

La formación de agujeros negros binarios (BBHs) es una cuestión de suma actualidad para la incipiente astrofísica de ondas gravitacionales. BBHs en fusión son las primeras fuentes cósmicas detectadas en ondas gravitacionales. Estas ondas gravitacionales fueron predichas por Einstein hace un siglo, y han sido recientemente detectadas por la colaboración LIGO-Virgo. En la Fig. 25 se muestra uno de los dos posibles canales de formación de BBHs, a partir de binarias estelares masivas y a través de la fase intermedia de BH-HMXB. El canal alternativo propuesto para la formación de BBHs es por interacción dinámica en cúmulos estelares de alta densidad (Mirabel, 2017). Las altas masas de hasta $40 M_{\odot}$ de los agujeros negros descubiertos por medio de ondas gravitacionales, en relación a las masas de los agujeros negros identificados en el universo local a partir de la radiación X que producen, y las altas tasas de fusión de agujeros negros encontrada por la colaboración LIGO-Virgo, son naturalmente explicadas en el contexto de la hipótesis de una alta tasa de formación de BH-HMXBs en el albor del Universo, formulada por primera vez por Mirabel et al. (2011).

*Experiment to Detect the Global EoR Signature.

5. Gestión y difusión de la Astronomía en América del Sur

Durante mi trayectoria científica he realizado múltiples tareas para la difusión y gestión de la astronomía y de la ciencia en general. En cuanto a difusión en América del Sur, y en Argentina en particular, cabe mencionar conferencias en el Planetario de la ciudad de Buenos Aires y la Universidad de Buenos Aires; la iniciación en colaboración con la periodista Nora Bar de Cafés Científicos en el Tortoni de Buenos Aires, auspiciados por la Academia Nacional de Matemáticas y Ciencias Físicas y Naturales de Argentina; la iniciación de los Cafés Científicos en las ciudades de Santiago y Antofagasta, y la organización de la Primera Escuela Latinoamericana de Astrofísica en Santiago de Chile, con la participación de más de 300 jóvenes provenientes de más de diez países de América del Sur, Central y el Caribe, durante mi gestión como Representante y Director de la Oficina de Ciencias del Observatorio Europeo Austral (ESO).

En cuanto a la gestión, cabe mencionar: la donación al IAR del autocorrelador del Observatorio de Arecibo en el contexto de un subsidio de la NSF, y la exploración realizada en los '80 y '90 por iniciativa individual en las provincias de Salta y Jujuy para la posible instalación de instrumentos astronómicos. En la atribución de este premio a la trayectoria, la Comisión Directiva de la Asociación Argentina de Astronomía menciona el "incansable trabajo en pos de insertar a la Argentina en proyectos astronómicos internacionales de primer nivel, como el *Cherenkov Telescope Array*. Quizás su aporte más significativo a nuestra comunidad sea la concepción y gestión política del Proyecto *Large Latin American Millimeter Array* (LLAMA), del cual fue mentor, y a cuya promoción dedicó más de una década".

5.1. Proyecto LLAMA

El territorio argentino puede ser de interés internacional para la instalación de proyectos astronómicos en el hemisferio sur que no requieren atmósfera de baja turbulencia, ya que el Norte de Chile ofrece los mejores sitios para observaciones en los rangos de longitudes de onda óptica e infrarrojo cercano. Por tal razón, en la década del 90 comencé a explorar la Puna Salteña para la posible instalación de facilidades astronómicas a más de 3800 m s.n.m.

Por iniciativa personal realicé una primera búsqueda de sitio para el proyecto europeo Large Submillimeter

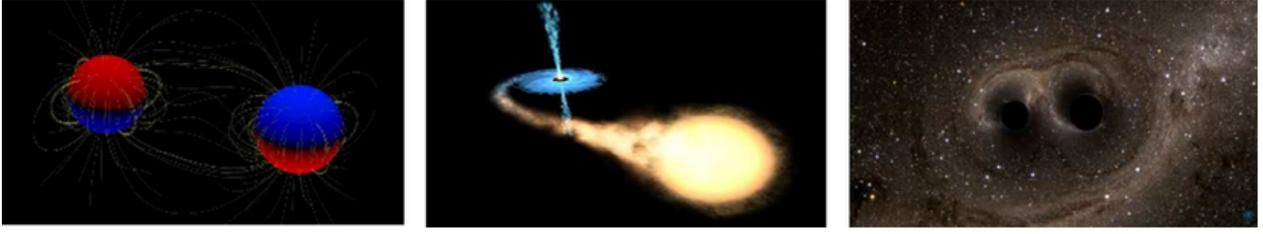


Figura 25: Formación de agujeros negros binarios a partir de sistemas binarios de estrellas masivas. Reproducción de *New Astronomy Reviews*, Mirabel (2017).

Array (LSA). Este proyecto consiste en un arreglo de radiotelescopios de ~ 20 m capaces de observar galaxias como la Vía Láctea a corrimientos al rojo $z > 6$, cuando el Universo tenía menos de un billón de años. Como el sitio debe consistir en un área plana y extensa en alturas a 3500–4000 m, durante diez días realizo una búsqueda a lo largo de la vía del Tren de las Nubes, hasta cercanías de la frontera con Chile, e incluso en la provincia de Catamarca. Para ello el gobernador de Salta provee un vehículo 4x4 con un conductor y un geólogo, conocedores de la Puna.

En esta primera exploración se identifican diferentes sitios posibles para el LSA, como ser el llano al pie de Macón. Un informe completo sobre los sitios posibles es enviado al Instituto de Radioastronomía Milimétrica europeo (IRAM), que lidera LSA. Sin embargo, por una combinación del liderazgo norteamericano en astronomía milimétrica y razones políticas, los europeos deciden plegarse al proyecto americano Millimeter Array (MMA), y desarrollar conjuntamente con EEUU y Japón el proyecto ALMA (Atacama Large Millimeter Array), en Chajnantor (Chile) a 5200 m s.n.m. Este proyecto requiere una inversión de $\sim 1.4 \times 10^9$ USD para su construcción, y para su operación posterior $\sim 10\%$ anual de esa inversión inicial. Si bien ALMA es un observatorio que ha producido resultados científicos de gran impacto, en la decisión de construir ALMA en Chajnantor a 5200 m en lugar de desarrollar este proyecto en alturas menores, han prevalecido razones científicas y políticas.

En el periodo 2004–2009 desempeño funciones en el Observatorio Europeo del Sur (ESO): Representante y Director de la oficina de Ciencias de ESO en Chile. La primera función incluye la responsabilidad como Ejecutivo por ESO en el proyecto ALMA. En 2004 comienzo a concebir LLAMA para integrar la astronomía en Argentina a la ciencia de frontera generada por ALMA. La instalación de dos antenas en la Puna, a ~ 180 km de ALMA hará posible incrementar la resolución angular de las observaciones con ALMA en un orden de magnitud, lo cual será una necesidad futura para la continuación de proyectos científicos en diferentes áreas de la astrofísica desarrollados con ALMA. De este modo se podrá intervenir en la ciencia con ALMA, a un costo relativamente bajo, respecto al costo que implica entrar formalmente como país miembro de las organizaciones internacionales que financian ALMA.

En 2007 presento un manuscrito sobre la idea de LLAMA a Thijs de Graauw, director de ALMA, el cual me recomienda implementar la idea. La misma semana de la creación del Ministerio de Ciencia, Tecnología

e Innovación Productiva (MinCyT), presento el manuscrito al Dr. Charreaux, presidente del CONICET, y al flamante ministro Lino Barañao. En el contexto de integración regional de aquella época, Barañao recomienda desarrollar LLAMA en colaboración con Brasil, por lo que propongo esa colaboración a Jacques Lepine de la Universidad de San Pablo. Se firma un convenio entre MinCyT y la fundación FAPESP del estado de San Pablo, donde se toma el compromiso de una inversión equivalente por cada una de esas dos instituciones. En la asamblea de la A.A.A. de 2008 LLAMA es definido como proyecto prioritario de la astronomía en Argentina y también es considerado prioritario en la hoja de ruta del MinCyT. El año siguiente organizamos con Marcelo Arnal y Ricardo Morras por Argentina, y Jacques Lepine, Zulema Abraham y Bete Gouveira Dal Pino por Brasil, un *workshop* sobre LLAMA en la Asamblea General de la UAI en Río de Janeiro, donde LLAMA es presentado como una ventana de oportunidad para la astronomía en Sudamérica (Fig. 26).

Hasta la fecha (abril de 2019) se ha construido el camino hasta el sitio de la primera antena en Alto Chorrillos, Salta, a 4850 m.s.n.m. Todos los componentes de la antena se encuentran en ese sitio, excepto una pieza dañada por accidente durante su transporte, que es repuesta a nueva por la aseguradora. Además, se ha finalizado la construcción del edificio en San Antonio de los Cobres cuya función será la de servir como base de operaciones. El costo total estimado de construcción es de 20×10^6 USD. Hasta marzo de 2019 se ha invertido un total estimado de $\sim 15 \times 10^6$ USD (10×10^6 por FAPESP-Brasil, 1×10^6 por la provincia de Salta y 3.5×10^6 por MinCyT). Lamentablemente, en 2018 el MinCyT es degradado a la categoría de Secretaría, y hasta abril de 2019 el financiamiento por parte de la Secretaría de Ciencia y Técnica de Argentina para este proyecto se encuentra demorado desde 2017.

Si LLAMA hubiera estado operacional en 2017 podría haber integrado el Event Horizon Telescope (EHT), colaboración internacional que incluye ALMA, y que ha logrado obtener la primera imagen de un agujero negro supermasivo (Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019). Aunque el avance del proyecto LLAMA se encuentra demorado, este constituye una ventana de oportunidad única para el futuro de la astronomía argentina. Tarde o temprano primará la razón y LLAMA será realidad.

A WINDOW OF OPPORTUNITY FOR SOUTH AMERICAN ASTRONOMY

The possibility of installing two radio telescopes for millimeter and sub-millimeter wavelengths, in the Argentinean side of the Atacama desert at distances of 180-200 km from Chajnantu (the site of ALMA), and altitudes greater than 4700 meters, has been discussed among astronomers in Argentina and Brazil.

The support to this idea has been granted in September 2008 by the Argentinean Astronomical Assembly. In Brazil, it is being studied as one of the possible key science goals of the recently approved Astrophysics National Science Institute by the Brazilian National Council of Research - CNPq. Top authorities of Science and Technology in Argentina informed that in the context of regional integration, funds may be available for original projects on basic sciences, with technology transfer components.

The initial US\$ 20 million investment of LLAMA would allow Argentine and Brazilian scientists to develop millimeter and sub-millimeter single dish ra-

dio astronomy, as well as integration in global experiments with Very Long Baseline Interferometer networks. Of particular interest may be VLBI with already existing radio telescopes in Chajnantu (APEX and APEX), and in the long run with elements of the ALMA array. Site testing in Argentina has been carried out for three years in Marón (4600m, 180km SE of ALMA) with equipment provided by UNAM (México), and further site testing started at other site 180 km SE of Chajnantu (see attached map). A proposal for initial funding to carry on the in depth study of this project will be submitted by December 2009.

We invite you for an open meeting on this project that will take place on Tuesday August 11 at 17:30 in room 2.11.



LOCATION OF CHAJNANTU, MARÓN AND CHAJNANTU. THE YELLOW LINE SHOWS THE BORDER BETWEEN ARGENTINA AND CHILE. THE BLACK LINE IS THE HIGHWAY THAT LINKS SALTATA, ARGENTINA.

Figura 26: LLAMA: una ventana de oportunidad para la Astronomía en América del Sur. Diario de la UAI en la Asamblea General de la UAI en Río de Janeiro, 2009.

6. Epílogo

En el casi medio siglo de mi trabajo como investigador científico he sido testigo de dos transformaciones en la investigación astronómica: 1) la emergencia progresiva y arrolladora de lo que se llama “Gran Ciencia”; y 2) el incremento del trabajo interdisciplinario en la investigación astronómica, a través de la síntesis de observaciones multifrecuencia del espectro electromagnético, y recientemente, por la integración de nuevas ventanas multimensajeras.

La “Gran Ciencia” se ha desarrollado de modo espectacular en las últimas décadas. Esta consiste en la ejecución de proyectos científicos a través de organizaciones y colaboraciones científico–tecnológicas formadas por equipos numerosos, de hasta centenas y en algunos casos, miles de científicos, ingenieros y técnicos. Esta tendencia es consecuencia de la creciente complejidad de las cuestiones científicas, cuya resolución requiere grandes colaboraciones interdisciplinarias entre especialistas en diferentes dominios de la ciencia y tecnología. La “Gran Ciencia” es necesaria para ejecutar proyectos de gran complejidad, de fuerte carácter industrial, única manera de dar respuesta a ciertas cuestiones fundamentales de las ciencias.

Sin embargo, la “Gran Ciencia” ha llegado acompañada con un significativo detractamiento financiero de las actividades científicas de investigadores solitarios y pequeños grupos, lo cual es cuestionable. Las nuevas ideas tienen origen en soledad y usualmente son concretadas a través de pequeños grupos de investigadores. Además, usualmente las nuevas ideas requieren ser contrastadas observacional/experimentalmente a costos relativamente bajos, por lo que cierto equilibrio entre el financiamiento de la “Gran Ciencia” y la ciencia que podríamos llamar “artesanal” es importante.

En el momento de esta disertación (4/11/2018) el futuro del desarrollo científico en Argentina se ha tornado oscuro. El MinCyT ha sido degradado a Secretaría, y en el caso particular de LLAMA, su continuidad se ha tornado incierta, a pesar de haber sido definido como prioritario para el desarrollo de la astronomía en Argentina, con una inversión ya realizada de 15×10^6 de dólares, en el contexto de un acuerdo internacional con Brasil.

No obstante las dificultades, invertir tiempo y esfuer-

zo en investigación científica y educación es uno de los mejores legados para el futuro de Argentina. Mi experiencia personal ha sido que la investigación científica consiste en una vida profesional apasionante, gestando a través del trabajo, amistad con colegas provenientes de diversas culturas y regiones del mundo.

Agradecimientos: A todos los colegas y amigos con los que he colaborado y compartido las emociones de la investigación científica. A Roberto Gamem, editor del Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, por la lectura crítica, paciente ayuda, y excelente trabajo de incorporación de la versión original del manuscrito en el formato del Boletín.

Referencias

- Arp H., 1966, *Atlas of peculiar galaxies*
- Bowman J.D., et al., 2018, *Nature*, 555, 67
- Cohen R.J., Mirabel I.F., 1979, *MNRAS*, 186, 217
- Dhawani V., Mirabel I.F., Rodríguez L.F., 2000, *ApJ*, 543, 373
- Duc P.A., Mirabel I.F., 1994, *A&A*, 289, 83
- Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2019, *ApJL*, 875, L1
- Haiman Z., 2011, *Nature*, 472, 47
- Margon B., et al., 1979, *ApJ*, 230, L41
- Marscher A.P., et al., 2002, *Nature*, 417, 625
- Melnick J., Mirabel I.F., 1990, *A&A*, 231, L19
- Mirabel I.F., 1981a, *RMxAA*, 6, 245
- Mirabel I.F., 1981b, *RMxAA*, 6, 7
- Mirabel I.F., 1982, *ApJ*, 260, 75
- Mirabel I.F., 1984, *Revista Astronómica, Órgano de la Asociación Argentina Amigos de la Astronomía*, 56, 2
- Mirabel I.F., 2006, *Science*, 312, 1759
- Mirabel I.F., 2012, *Science*, 335, 175
- Mirabel I.F., 2017, *NewAR*, 78, 1
- Mirabel I.F., 2019, *arXiv e-prints*
- Mirabel I.F., Cohen R.J., 1979, *MNRAS*, 188, 219
- Mirabel I.F., Dottori H., Lutz D., 1992a, *A&A*, 256, L19
- Mirabel I.F., Lutz D., Maza J., 1991, *A&A*, 243, 367
- Mirabel I.F., Morras R., 1984, *ApJ*, 279, 86
- Mirabel I.F., Morras R., 1990, *ApJ*, 356, 130
- Mirabel I.F., Rodrigues I., 2003, *Science*, 300, 1119
- Mirabel I.F., Rodríguez L.F., 1994, *Nature*, 371, 46
- Mirabel I.F., Rodríguez L.F., 1998, *Nature*, 392, 673
- Mirabel I.F., Rodríguez L.F., 1999, *ARA&A*, 37, 409
- Mirabel I.F., Sanders D.B., 1987, *ApJ*, 322, 688
- Mirabel I.F., Turner K.C., 1973, *A&A*, 22, 437
- Mirabel I.F., et al., 1985, *ApJL*, 294, L39
- Mirabel I.F., et al., 1986, B. Battrick, E.J. Rolfe, R. Reinhard (Eds.), *ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet, ESA Special Publication*, vol. 250
- Mirabel I.F., et al., 1988, *A&A*, 206, L20
- Mirabel I.F., et al., 1992b, *Nature*, 358, 215
- Mirabel I.F., et al., 1998a, *A&A*, 330, L9
- Mirabel I.F., et al., 1998b, *A&A*, 333, L1
- Mirabel I.F., et al., 1999, *A&A*, 341, 667
- Mirabel I.F., et al., 2001, *Nature*, 413, 139
- Mirabel I.F., et al., 2011, *A&A*, 528, A149
- Rodríguez L.F., et al., 1989, *ApJ*, 337, 712
- Sanders D.B., Mirabel I.F., 1985, *ApJL*, 298, L31
- Sanders D.B., Mirabel I.F., 1996, *ARA&A*, 34, 749
- van der Laan H., 1966, *Nature*, 211, 1131
- Vorontsov-Velyaminov B.A., 1959, *Atlas and catalog of interacting galaxies (1959)*