

**LA INVESTIGACIÓN SOBRE
EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS
EN EL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA
DE CANARIAS**

Discurso leído en el acto de su recepción como
Académico Correspondiente en Tenerife por

Dr. D. Rafael Rebolo López

el día 11 de julio de 2009

**LA INVESTIGACIÓN SOBRE
EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS EN EL
INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS**

Depósito Legal: M-28254-2009

Imprime:
Gráficas Loureiro, S.L.

LA INVESTIGACIÓN SOBRE EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS EN EL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

Discurso leído en el acto de su recepción como
Académico Correspondiente en Tenerife por
Dr. D. Rafael Rebolo López
el día 11 de julio de 2009

Arrecife (Lanzarote), Hotel Lancelot

Excmo. Señor Presidente,
Señora y Sres Académicos,
Señoras y Señores:

Se cumplen veinticinco años del comienzo de las investigaciones sobre el Fondo Cósmico de Microondas en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Desde 1984, hemos realizado numerosos experimentos en el Observatorio del Teide con la intención de medir propiedades de esta tenue radiación cuyo origen está asociado con las primeras etapas en la historia del Universo. El primero de ellos fue el llamado “Experimento Tenerife” que se desarrolló en el marco de una colaboración entre las Universidades de Manchester, Cambridge y el IAC, liderada por el Prof. Rod Davies de la Universidad de Manchester quien años más tarde sería director del prestigioso Radio Observatorio de Jodrell Bank. Mi incorporación al IAC en octubre de 1984 como investigador de doctorado, justo cuando este experimento empezaba su andadura, permitió mi acercamiento a este apasionante campo de investigación y que pudiera participar en el estudio de las propiedades de este fondo de radiación junto a un equipo de primera línea. Todavía hoy desarrollo varios proyectos de investigación con los investigadores de aquel primer experimento y mantengo una excelente relación con ellos.

Con el tiempo, esa colaboración llevaría a la creación de un grupo de investigación en el IAC sobre el Fondo Cósmico de Microondas que habría de desarrollar muchos otros experimentos, llevar a cabo investigaciones de carácter teórico y también participar de forma sustancial en una de las misiones espaciales más complejas desarrolladas hasta la fecha por la Agencia Espacial Europea (ESA), el satélite Planck que recientemente ha sido lanzado con éxito y lleva a bordo los instrumentos más sofisticados que se han construido nunca para investigar el Fondo Cósmico de Microondas.

Durante todos estos años hemos tenido el privilegio de ver avances extraordinarios en la determinación de las propiedades del Fondo Cósmico de Microondas y también de comprobar cómo se consolidaba la comprensión teórica de los fenómenos asociados con esas propiedades. Gracias al esfuerzo, empeño y contribuciones de muchos equipos de investigación dedicados al estudio del Fondo Cósmico de Microondas, podemos decir hoy que la Cosmología ha entrado en lo que se considera una era de alta precisión.

El grupo del IAC en La Laguna impulsó la creación del Laboratorio del Fondo Cósmico de Microondas en el Observatorio del Teide que ha acogido a la mayor parte de los experimentos europeos desde tierra, y ha contribuido significativamente a los avances producidos en este campo. La determinación del espectro de potencias angular del fondo de microondas en escalas que van desde unos pocos grados hasta varios minutos de arco ha centrado buena parte del esfuerzo de nuestro equipo de investigación. A continuación describiré algunos de los experimentos desarrollados por nuestro grupo y nuestra participación en la misión Planck. Destacaré aquellos resultados que considero más relevantes de cuantos hemos obtenido en estos años y ofreceré una breve perspectiva de las investigaciones que pretendemos realizar en un futuro cercano que principalmente se centrarán en el estudio de la polarización de la radiación por la información que podría aportar sobre la existencia de ondas gravitacionales en el Big Bang.

El Fondo Cósmico de Microondas

En la primera mitad de los años 60 tuvo lugar uno de los descubrimientos de mayor impacto en Cosmología. Con una antena de la compañía telefónica Bell en Estados Unidos, Penzias y Wilson encontraron clara evidencia de una señal de microondas que se detectaba en cualquier dirección, concluyeron que estamos inmersos en un baño de radiación de microondas muy tenue y uniforme: el Fondo Cósmico de Microondas. Se trata de un débil fondo muy homogéneo de radiación electromagnética de temperatura 2.73 grados por encima del cero absoluto cuya distribución energética corresponde a la de un cuerpo en perfecto equilibrio térmico a esa temperatura (ver Figura 1). El descubrimiento de Penzias y Wilson fue pronto interpretado como la radiación que Gamow y sus colaboradores habían predicho en los años 40 como remanente de los estados iniciales del Universo, un

vestigio del Big Bang. Por este descubrimiento recibirían años después el Premio Nobel de Física.

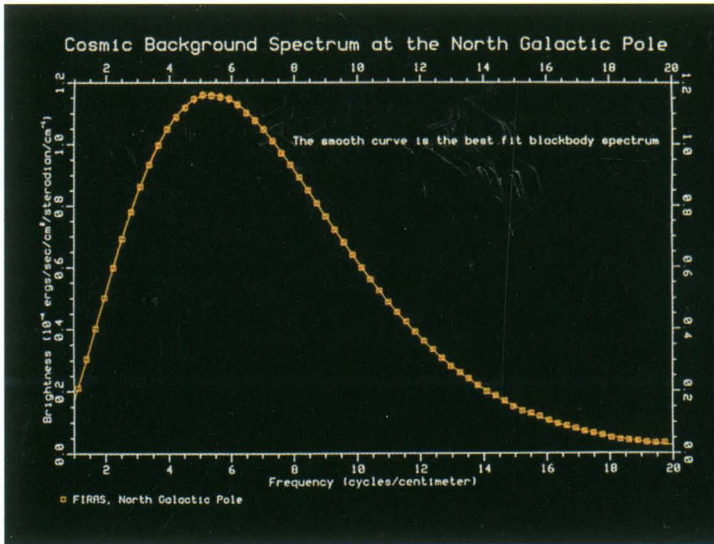


Fig. 1. Distribución espectral de energía del Fondo Cósmico de Microondas. Medidas del satélite COBE de la NASA.

Algunas de las principales características del Fondo Cósmico de Microondas resultan como consecuencia de procesos que tuvieron lugar unos trescientos ochenta mil años después del instante inicial, cuando la temperatura del plasma primordial en expansión se habría reducido a unos 3000 grados y los electrones ya no poseen suficiente energía para resistir la atracción de los protones. Los electrones, que hasta entonces habían estado libres en el plasma, pudieron adoptar órbitas estables alrededor de los protones y la materia del Universo pasó a un estado eléctricamente neutro cuyo principal componente son los átomos de hidrógeno. Desde entonces, los fotones del fondo de microondas habrían viajado hasta nosotros sin interactuar significativamente con la materia, transportando información privilegiada de aquella época remota. Hoy son detectados en longitudes de onda milimétricas y centimétricas, pero en el origen del Universo ésta fue una radiación extraordinariamente energética dada la elevada temperatura del medio primigenio. La expansión del Universo es responsable de que estos fotones se hayan enfriado progresivamente hasta su temperatura actual.

Las variaciones espaciales de la intensidad del fondo de microondas transportan información sobre cómo fueron las semillas de lo que hoy es la estructura del Universo a gran escala, de cómo se originaron los cúmulos y supercúmulos, e incluso del origen de las galaxias. Las irregularidades en el plasma primordial que habrían de crecer amplificadas por la fuerza de la gravedad hasta dar lugar a todas estas estructuras dejaron su huella en esta radiación siendo esencialmente preservadas hasta nuestros días. En esas huellas se encuentra valiosa información sobre importantes parámetros cosmológicos: la densidad total de materia y energía en el Universo, el ritmo actual de expansión del Universo, la densidad de energía en forma de neutrinos, la densidad de materia ordinaria, de materia y de energía oscura, la curvatura del Universo y muchos otros más.

Aunque en una primera inspección el fondo de microondas resulta ser muy uniforme como se puede ver en las medidas realizadas sobre toda la bóveda celeste cuya proyección aparece representada en el panel superior de la Figura 2, con medidas de mayor sensibilidad se pudo comprobar que la intensidad de esta radiación (medida por su temperatura) era mayor que el promedio en una cierta región de la bóveda celeste e inferior al promedio en la dirección opuesta. La amplitud de esta variación a gran escala, que recibe el nombre de anisotropía dipolar, es de sólo unas 3 milésimas de K, y refleja esencialmente el movimiento de nuestra Galaxia en el medio intergaláctico. El mapa central de la Figura 2 muestra esta anisotropía dipolar con una región de mayor intensidad de la radiación, zona de la bóveda celeste hacia la que nuestra Galaxia se está dirigiendo (color rojo) y otra de menor intensidad (color azul) que apunta a la región de la que nos alejamos. En la primera mitad de la década de los 90, tuvo lugar la detección de anisotropías de origen cosmológico en el Fondo Cósmico de Microondas, con un nivel de una parte en cien mil. Aparecen reflejadas en el panel inferior de la Figura 2. Este descubrimiento fue realizado con los datos obtenidos por los radiómetros del satélite COBE (Cosmic Background Explorer) de la NASA y fue pronto corroborado por experimentos desde tierra como el de Tenerife que comentaremos en detalle más adelante. No hay dudas de que las fluctuaciones espaciales de la temperatura detectadas por estos experimentos a escalas de 5 a 8 grados tienen un origen cosmológico que nos transporta a etapas muy primitivas del Universo. El satélite COBE encontró las primeras evidencias estadísticas de las deseadas huellas de las semillas de la estructura del Universo con una amplitud de unas treinta millonésimas de grado, es decir, un nivel de anisotropía de una parte en cien mil (Smoot et al. 1992, *Astrophysical Journal*). Por este resultado George Smoot, in-

investigador principal del instrumento DRM del satélite COBE, recibió el Premio Nobel de Física en el año 2006. El experimento de Tenerife, tras confirmar muy pronto el resultado del COBE, localizó de manera directa regiones en el cielo con estas huellas de origen cosmológico (Hancock et al. 1994, Nature).

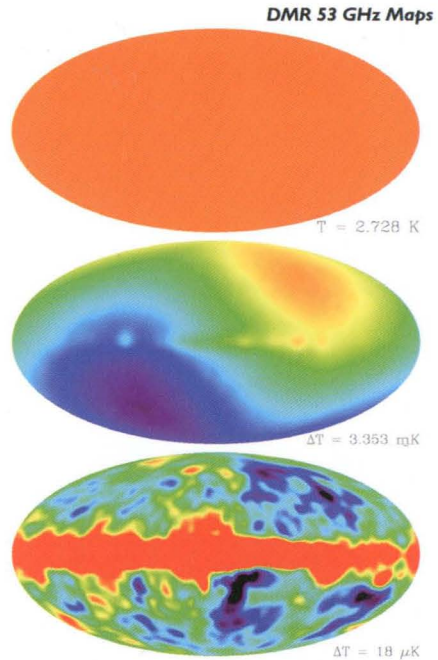


Fig. 2. El satélite COBE y mapas del Fondo Cósmico de Microondas obtenidos por él. A la derecha, el panel superior muestra la uniformidad de la intensidad de la radiación. Cuando se sustrae su valor medio se aprecia en el panel central la anisotropía dipolar de una amplitud de 3 mK. Cuando se sustrae esta anisotropía dipolar aparece en el panel inferior la emisión del disco de nuestra Galaxia, mancha roja en el centro y fuera de esta región pequeñas manchas que muestran fluctuaciones en temperatura de decenas de microK y que tendrían un origen cosmológico.

El experimento Tenerife

Los estudios del FCM empezaron en el Observatorio del Teide a mediados de 1980 como resultado de una colaboración entre el Nuffield Radio Astronomy Laboratories (Jodrell Bank Observatory) de la Universidad de Manchester y el Instituto de Astrofísica de Canarias, con participación de investigadores del Cavendish Laboratory de la Universidad de Cambridge. Un conjunto de tres instrumentos, designados como “Experimento Tenerife del Fondo Cósmico de Microondas”, fueron instalados entre 1984 y 1990 para medir sus anisotropías (variaciones en la intensidad del fondo de radiación según la dirección de observación) en el rango de frecuencias 10-33 GHz con una resolución angular de unos 5 grados.

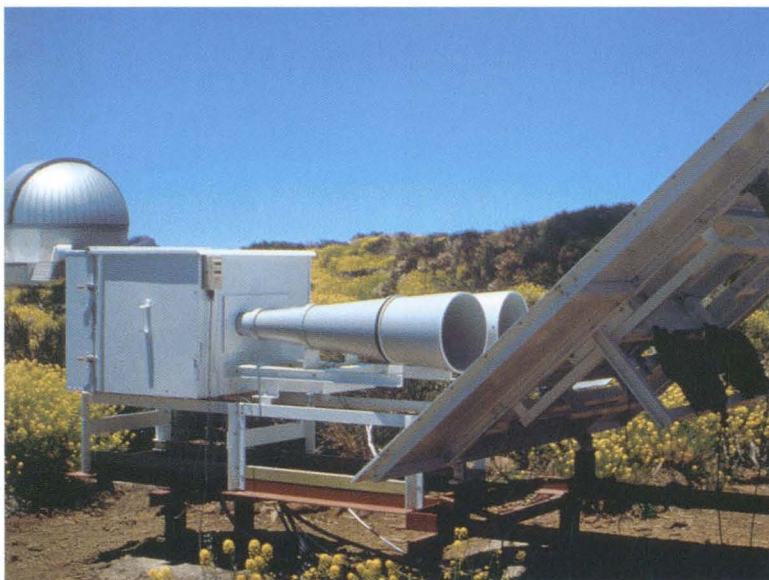


Fig. 3. Uno de los radiómetros diferenciales del experimento de Tenerife en su emplazamiento del Observatorio del Teide.

En sus comienzos el experimento consistió de un único radiómetro diferencial a 10 GHz que fue operado principalmente por Robert Watson, actualmente investigador de la Universidad de Manchester y entonces estudiante de doctorado

del Prof. Rod Davies. Fueron años difíciles donde el apoyo logístico en el Observatorio del Teide no estaba tan desarrollado como ahora. Los resultados de este primer radiómetro fueron alentadores y pronto se instalaría un segundo radiómetro a 15 GHz y años más tarde se construyó e instaló el radiómetro de 33 GHz que sería esencial para alcanzar el objetivo clave del experimento: la detección de las variaciones espaciales en la intensidad de la radiación de microondas de origen cosmológico. Los datos de estos tres radiómetros fueron analizados principalmente por R. Watson y R. Davies en Manchester, A. Lasenby y S. Hancock en Cambridge y C. Gutiérrez y R. Rebolo en el IAC. Durante cierto tiempo, al principio del proyecto, también contamos con la inestimable colaboración de J. Sánchez y J. Beckman en el IAC.

Hasta 1992, el experimento Tenerife era el más avanzado en la búsqueda de anisotropías del fondo de microondas a escalas angulares de más de 5 grados. Las cotas que establecimos en los artículos que publicamos en Nature en 1987 (Davies et al.) y en 1992 (Watson et al.) así lo reflejan. Nuestra técnica consistía en repetir barridos de la misma región de cielo con cada uno de los radiómetros manteniéndolos a declinación constante y alineados con el meridiano del lugar. La rotación de la Tierra ocasionaba a lo largo del día y la noche un registro de la señal de microondas para cada ascensión recta. Los receptores que utilizábamos basados en amplificadores de bajo ruido de tipo HEMT (de alta movilidad electrónica), los más avanzados del momento, eran enfriados en criostatos a temperaturas próximas a unos 250 °C bajo cero para minimizar el ruido. Aun así era necesario repetir las medidas varios cientos de veces para poder eliminar las fuentes de ruido asociadas con el sistema de detección y también con las fluctuaciones introducidas por el vapor de agua atmosférico.

En Abril de 1992 el satélite COBE que la NASA había lanzado a finales de los 80 con tres radiómetros a bordo operando a 30, 50 y 90 GHz anunciaba el descubrimiento de variaciones en la intensidad del fondo cósmico de origen cosmológico. La sensibilidad de estos radiómetros no era mejor que la de los nuestros, sin embargo, fuera de la atmósfera la señal de microondas que registran los radiómetros está libre de distorsión por el vapor de agua, lo que sí era un factor limitante del experimento Tenerife, a pesar de encontrarnos en uno de los mejores observatorios del mundo. A los pocos meses de este anuncio, los datos que nosotros teníamos en una región de cielo bastante más pequeña que la observada por COBE confirmaban la amplitud de las fluctuaciones de origen cosmológico que G. Smoot y su equipo habían descubierto. Nuestro experimento fue el primero

que de manera independiente aportó datos que corroboraban los resultados obtenidos por el satélite COBE.

El experimento Tenerife continuó su rastreo del cielo en microondas produciendo uno de los mapas más extensos y de mayor sensibilidad del fondo cósmico (Gutiérrez et al. 2000, *Astrophysical Journal*) hasta el advenimiento del satélite WMAP de la NASA. Las variaciones en la intensidad de la señal registrada en esos mapas, predominantemente de origen cosmológico, son de unas pocas decenas de millonésima de grado. En el mapa de la figura 4 se compara la radiación procedente de regiones que distan de nosotros unos quince mil millones de años luz, y que nunca estuvieron en contacto causal según el modelo estándar del Big Bang, es decir, no hubo posibilidad de que existiera intercambio de información de unas regiones a otras. Resulta cuando menos sorprendente que ahora se nos presenten con semejante grado de uniformidad, con variaciones de tan sólo una parte en cien mil entre ellas, y es improbable que estas diferencias fueran establecidas como condiciones iniciales del Universo con precisión tan exquisita.

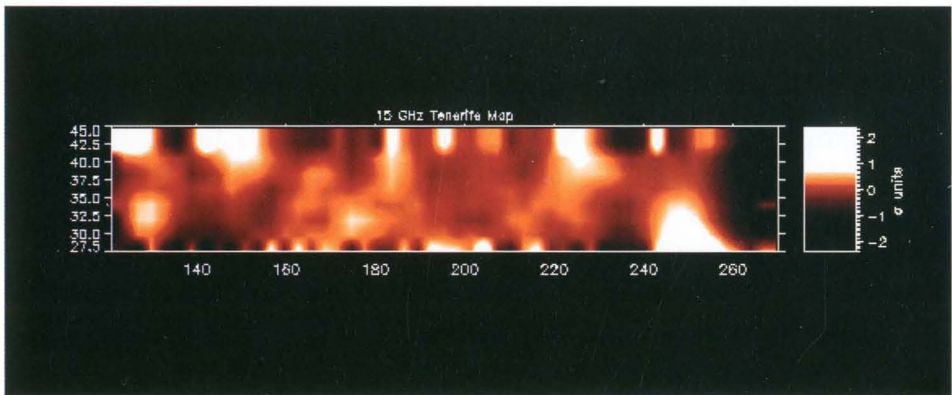


Fig. 4. Mapa de la anisotropía del Fondo Cósmico de Microondas obtenido por el experimento Tenerife. En el eje vertical representamos declinaciones, y en el horizontal ascensión recta. La escala de contrastes está normalizada a la desviación estadística de la señal en el mapa.

Una posible explicación alternativa fue sugerida por las teorías inflacionarias según las cuales las fluctuaciones en la densidad del plasma primordial habrían existido desde prácticamente el instante inicial como resultado de los campos escalares asociados a la unificación de las fuerzas de la naturaleza. La

violenta expansión que cambiaría el tamaño del Universo exponencialmente en el pequeñísimo intervalo de tiempo entre 10^{-43} y 10^{-30} segundos de la singularidad inicial, la Inflación, habría llevado a la uniformidad de las fluctuaciones iniciales, al igual que las rugosidades en la superficie de un globo resultan alisadas conforme éste se va hinchando. A energías fuera del alcance de cualquier acelerador que podamos prever llegar a construir, la interacción fuerte y la interacción electrodébil cabe esperar que se unifiquen y que esta unificación haya dejado también su huella en el universo primitivo. Un mejor conocimiento de la amplitud de las fluctuaciones en la intensidad del fondo de microondas a todas las escalas posibles permitiría obtener información sobre cuál fue el espectro de las fluctuaciones en la densidad del plasma primordial que habría de actuar como semilla para la estructura del Universo.

Aunque la gran homogeneidad del fondo de microondas es en principio consistente con la de la distribución de galaxias a muy gran escala, el Universo actual no es tan homogéneo. Las galaxias, los cúmulos de galaxias, los vacíos galácticos y demás superestructuras nos muestran irregularidades en la densidad de materia que han debido originarse tiempo atrás y que se han desarrollado bajo el implacable rigor de la fuerza de la gravedad. Las ideas más plausibles sobre el origen de las galaxias y su agrupación en cúmulos y supercúmulos exigen cierto grado de irregularidad en el plasma primordial desde las etapas más tempranas del Universo, es decir debieron existir pequeñas variaciones en la densidad del plasma de unas regiones a otras. Esas fluctuaciones primordiales en la densidad fueron las semillas a partir de las cuales habrían de crecer las estructuras que hoy observamos. La intensa interacción que sostuvieron la radiación y la materia durante los primeros cientos de miles de años del Universo, habrían establecido en la radiación una clara huella que hoy se pondría de manifiesto como variaciones de la intensidad del fondo cósmico de microondas según la dirección de observación. No hay un consenso general en cómo las pequeñas fluctuaciones necesitadas por la teoría para explicar la formación de las galaxias puede ser conjugada con la gran homogeneidad del Universo a gran escala, así que la medida precisa del grado de la anisotropía en el fondo de microondas es una pista muy valiosa para entender el mecanismo en cuestión, depende, por ejemplo de cómo fueron los procesos cuántico-gravitatorios en los instantes iniciales y de cómo es nuestro Universo ahora, del valor de su densidad, de cuál es la contribución relativa de la materia normal y la materia oscura a la materia total, del valor de la componente de energía oscura y de cuál es el ritmo actual de expansión.

Experimentos milimétricos

En la primera mitad de los años 90 resultaba obvia la necesidad de desarrollar experimentos de anisotropía en escalas angulares más pequeñas y con mucha mayor sensibilidad para así poder investigar las cuestiones que se han mencionado. Decidimos entonces desarrollar un nuevo experimento en un rango de frecuencias mucho más alto que el del experimento de Tenerife. Entre 90 y 300 GHz la intensidad del fondo cósmico es mucho mayor y por tanto puede permitir medidas más precisas de sus propiedades. El inconveniente para la observación desde tierra reside en la mucho mayor contaminación por señales indeseables producidas por varios tipos de moléculas presentes en la atmósfera. En conversaciones con Lucio Piccirillo, investigador del Instituto Bartol en Delaware (USA) actualmente en la Universidad de Manchester, llegamos a la conclusión de que con un sistema rápido de modulación de señal podría ser factible controlar las fluctuaciones en la intensidad de la señal astronómica que introduce la atmósfera. Especialmente si teníamos un canal de muy alta frecuencia que nos permitiese monitorizar estas fluctuaciones en una banda donde la señal atmosférica es muy intensa.

Nuestro objetivo principal era poner a prueba la predicción teórica de que en el plasma primordial existieron oscilaciones acústicas que dejaron una huella en el Fondo Cósmico de Microondas con una amplitud máxima en escalas angulares de 1 a 2 grados. El experimento Bartol-IAC usó bolómetros como detectores. Son dispositivos que esencialmente convierten radiación en calor. Estos detectores son mucho más sensibles que los HEMTS y los disponibles en aquel momento funcionaban muy bien a frecuencias entre 90 y 300 GHz, por tanto, ofrecían justo lo que deseábamos tener. El inconveniente es que su máxima sensibilidad se alcanza a temperaturas muy próximas al cero absoluto (-273 °C) y por tanto teníamos que utilizar técnicas criogénicas muy sofisticadas que emplean helio líquido. Nuestra experiencia en el observatorio con el experimento Tenerife se había limitado a sistemas criogénicos con ciclos cerrados de helio gaseoso, así que nos enfrentamos a un nuevo desafío que afortunadamente, gracias a la gran profesionalidad del equipo del Prof. Piccirillo (y especialmente a Michele Limone, investigador que después sería miembro del equipo del satélite WMAP) pudimos llevar a cabo una serie de experimentos con notable éxito, ver Figura 5. Estos experimentos sirvieron para que Bruno Femenía desarrollara su tesis doctoral (Femenía et al. 1998 *Astrophysical Journal*) en el IAC, al igual que años

antes el experimento de Tenerife había servido para que Carlos Gutiérrez realizara la suya, ambos bajo mi dirección. Serían éstas las primeras tesis doctorales en España sobre experimentos del Fondo Cósmico de Microondas.

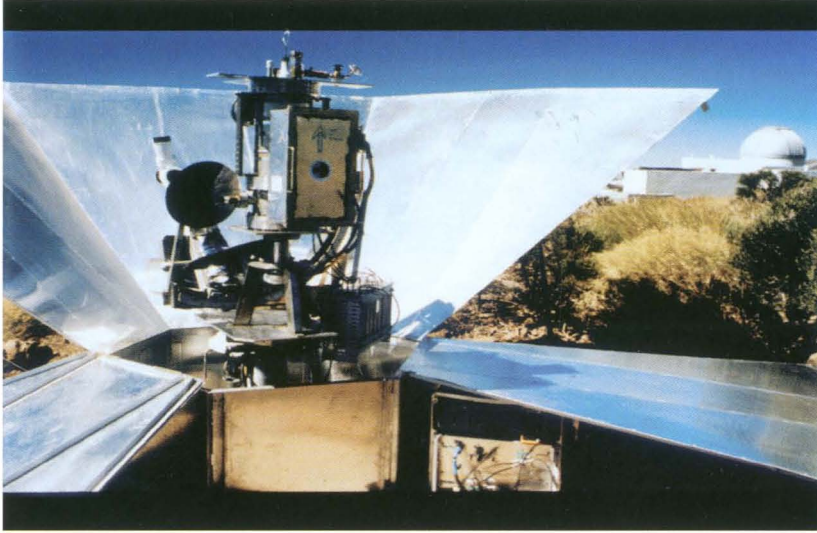


Fig. 5. Experimento milimétrico Bartol-IAC. Rodeado por un apantallamiento de aluminio.

Los resultados de nuestro experimento milimétrico mostraron evidencias de que efectivamente las fluctuaciones en la intensidad del fondo de microondas eran bastante mayores a escalas de un par de grados que a escalas de 5 a 10 grados. Otros experimentos en globos estratosféricos y desde la Antártida también encontraron resultados similares pero obtener una prueba contundente de que el escenario cosmológico propuesto por la teoría de la Inflación podía ser correcto tendría que esperar unos años más.

COSMOSOMAS

A mediados de los años 90 coincidí en varias ocasiones con el Dr. George Smoot, y tras varias conversaciones acordamos la conveniencia de llevar a cabo un estudio a gran escala de las emisiones de microondas de nuestra Galaxia a fre-

cuencias tan cercanas a las del DRM como fuera posible pero con una resolución al menos 10 veces mejor que la del satélite COBE. Nos preocupaba poder determinar correctamente la emisión sincrotrón de la Galaxia y también la emisión de microondas de los procesos de interacción libre-libre. Desde tierra preveíamos que en el rango 5 a 15 GHz esto podría llevarse a cabo con una antena de unos pocos metros situada en un buen observatorio. Vimos que podríamos tratar de utilizar una antena de 5 m y varios receptores propiedad de la Universidad de California en Berkeley y decidimos instalarla en el Observatorio del Teide donde habíamos mostrado con el experimento Tenerife que este tipo de estudios podía ser llevado adelante. Esta antena que llamábamos GEM fue transportada e instalada en el Observatorio y debía estar girando constantemente y tomar datos durante varios años para alcanzar su objetivo. Desafortunadamente, el diseño mecánico de la antena era frágil para una operación en condiciones a veces extremas como las que se presentan en el observatorio y la sensibilidad de los receptores no era la esperada así que finalmente abandonamos este proyecto.

La idea básica era sin embargo válida así que nuestro grupo comenzó a explorar la posibilidad de desarrollar un experimento dedicado a medir la emisión de la Galaxia con resolución angular de 1 grado a frecuencias entre 10 y 20 GHz que fuese muy robusto desde el punto de vista mecánico y electrónico para poder operar durante años en el Observatorio del Teide. Así fue como surgió el experimento COSMOSOMAS (“COSMOlogical Structures On Medium Angular Scales) que fue íntegramente construido en el IAC bajo la inestimable supervisión técnica de Roger Hoyland, el ingeniero de microondas de nuestro grupo que además personalmente construyó los receptores del experimento empleando amplificadores Berkshire. El experimento consistió de dos conjuntos de antenas, COSMO11 y COSMO15 que estaban dotadas de sistemas de recepción criogénicos a 11, 13, 15 y 17 GHz. El sistema estaba ideado para realizar mapas de las estructuras cosmológicas en escalas angulares intermedias, y también de la emisión difusa de nuestra galaxia. Ambos instrumentos observaron el cielo mediante una técnica de barrido circular, creada por el movimiento rotatorio de un espejo plano circular a 60 rpm que dirigía la radiación recibida del cielo hacia una antena parabólica colocada fuera de eje (ver Figura 6), cuyo tamaño era de 1.8 m en el caso de COSMO15 y de 2.4 m en el de COSMO11.

Estas antenas concentraban la radiación en sendos receptores enfriados criogénicamente, basados en transistores de alta movilidad electrónica. La temperatura de operaciones era de 20 K (-253 °C) y el rango de frecuencias obser-

vado es de 10-12 GHz en COSMO11 y de 12-18 GHz en COSMO15. En el instrumento COSMO15, la señal se separaba mediante tres filtros, permitiendo observar simultáneamente a 13, 15 y 17 GHz.



Fig. 6. Uno de los experimentos del proyecto COSMOSOMAS. El plato circular refleja la radiación en la antena que a su vez la focaliza en el receptor enfriado criogénicamente.

De esta manera, se obtenían diariamente cuatro mapas de una resolución de aproximadamente 1 grado completos en ascensión recta que cubrían una franja de 20 grados en declinación en cada una de estas frecuencias.

Este proyecto fue financiado íntegramente por el Ministerio de Educación y Ciencia y el IAC entre el año 1998 y 2008. En el análisis de los datos conté con la muy valiosa colaboración de los investigadores del IAC S. Hildebrandt, C. Gutiérrez, J.A. Rubiño, J. Gallegos, E. Battistelli y S. Fernández-Cerezo, quien realizó su tesis doctoral con este experimento, además de R. Watson. Conseguimos cientos de mapas a cada frecuencia que permitieron lograr en los mapas finales una sensibilidad mejor que 50 microK en escalas de un grado. Algo que todavía hoy no ha sido superado por ningún otro experimento a estas frecuencias

y escala angular. El satélite WMAP de la NASA ha alcanzado mayor sensibilidad a frecuencias más altas. Nuestros datos son comparados con los de este satélite en el artículo de Hildebrandt et al. (2007, MNRAS).

De todos los resultados obtenidos por COSMOSOMAS quisiera destacar que en el año 2005 este experimento logró aportar la más clara evidencia de la existencia de un nuevo proceso de emisión de microondas denominado “emisión anómala” (también “Foreground X”) en nuestra Galaxia, concretamente en el complejo molecular de Perseo (Watson et al. 2005 *Astrophysical Journal*). Los datos obtenidos por el experimento en esta región pueden verse en la Figura 7.

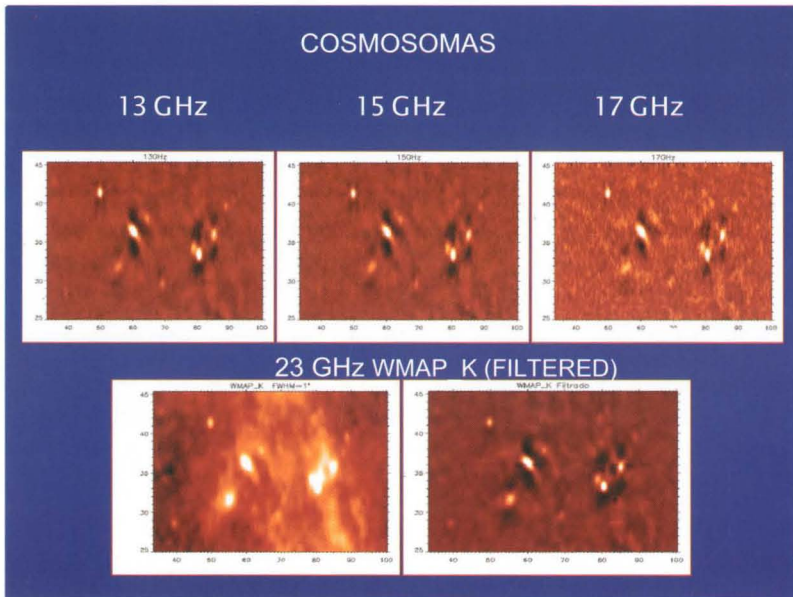


Fig. 7. Mapas obtenidos por COSMOSOMAS en la región de Perseus-Taurus-Auriga, parte superior. En la parte inferior izquierda se reproduce el mapa del satélite WMAP a 23 GHz en la misma zona de cielo. A la derecha ese mapa aparece filtrado con la técnica de COSMOSOMAS para su comparación.

Un año más tarde, publicamos la primera medida que se puede encontrar en la literatura del grado de polarización de esta emisión anómala de microondas. Este resultó ser muy bajo (Battistelli et al. 2006, *Astrophys. Journal*). Todavía hoy no sabemos a ciencia cierta cuál es el origen de esta emisión. Draine y Lazarian en

la Universidad de Princeton han postulado que podría tratarse de emisión dipolar eléctrica de hidrocarburos en el espacio interestelar. Una investigación que Susana Iglesias Groth en el IAC ha extendido proponiendo a los fullerenes, moléculas esféricas de carbono con hidrogenación, como potenciales responsables.

Interferómetros de Microondas

A finales de los años 90 estaba muy claro que los avances en este campo pasaban por determinar con gran precisión el espectro de potencias angular de las fluctuaciones primordiales, es decir, establecer la amplitud de las fluctuaciones espaciales en intensidad a diversas resoluciones angulares para tratar de acotar el mayor número de parámetros cosmológicos posible. Las técnicas basadas en bolómetros que habíamos empleado en el experimento milimétrico Bartol-IAC exigían una compleja operación en el observatorio y llevaban asociado un costo muy elevado para experimentos de larga duración. Así que el consorcio científico que había llevado a cabo el experimento Tenerife decidió que la mejor técnica que podíamos desarrollar para alcanzar nuestro objetivo era la interferometría de microondas. El grupo del Laboratorio Cavendish era pionero en interferometría aplicada a radioastronomía en longitudes de onda más largas y no parecía difícil poder desarrollar conjuntamente un nuevo experimento en el Observatorio del Teide que nos permitiese explorar el Fondo Cósmico de Microondas con gran sensibilidad a diversas escalas angulares utilizando esa técnica. Decidimos establecer una nueva colaboración entre los grupos de las Universidades de Manchester, Cambridge y del IAC que conduciría a dos nuevos experimentos interferométricos en el Observatorio del Teide, ambos operando a 33 GHz (~1 cm de longitud de onda).

El primero fue un pequeño interferómetro con dos antenas denominado interferómetro JBO-IAC (ver Figura 8) que habría de permitir poner a prueba nuestras capacidades instrumentales en un nuevo dominio y también probar la bondad de la atmósfera del observatorio para observaciones mucho más precisas que queríamos hacer del fondo de microondas a 33 GHz. Un interferómetro es un dispositivo formado por dos o más antenas que correlacionando la señal que llega a cada una de ellas logra una resolución mayor que la de una antena individual. El interferómetro de dos elementos dio muy buenos resultados en poco tiempo convenciéndonos del enorme potencial que tenía esta técnica. Tanto S. Dicker y

D. Harrison en Reino Unido como J. A. Rubiño en España realizaron parte de sus investigaciones de doctorado con este instrumento que permitió también encontrar evidencia de una mayor amplitud de las fluctuaciones primordiales en escalas de 1 o 2 grados en comparación con las medidas de COBE y Tenerife a escalas más grandes (Harrison et al. 2000, MNRAS).



Fig. 8. Interferómetro de dos elementos JBO-IAC.

Los experimentos en globos estratosféricos, realizados por científicos italianos y norteamericanos, BOOMERANG y MAXIMA mostraron en el año 2000 y 2001 que la amplitud de las fluctuaciones cambia drásticamente con la resolución angular de la observación y alcanza un máximo a escalas de ~ 1 grado. En la Figura 9 se presenta el mapa obtenido por un experimento en globo estratosférico que muestra cómo las fluctuaciones en la intensidad del fondo de microondas tienen su máxima amplitud en escalas angulares de un grado. Este resultado fue interpretado como evidencia de que nuestro Universo responde a lo llama-

mos una geometría plana y de que su densidad de materia y energía es justamente la densidad crítica que se necesita para una expansión indefinida.

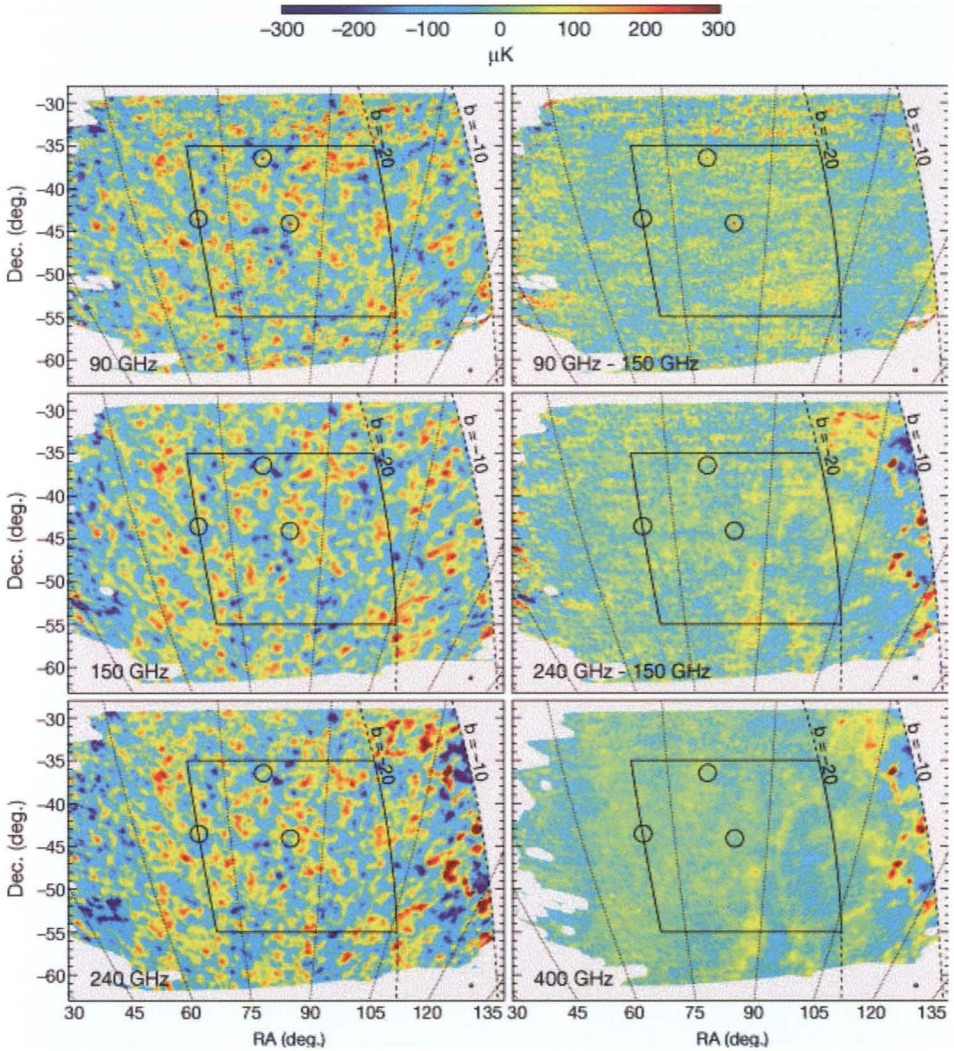


Fig. 9. Mapas obtenidos por el experimento BOOMERANG que muestran variaciones espaciales en la intensidad del Fondo Cósmico de Microondas entre 90 y 240 GHz.

El VSA

Otros experimentos llevados a cabo en el año 2000 y 2001 confirmaron los resultados de los globos estratosféricos. Entre ellos el experimento interferométrico del Observatorio del Teide denominado “Very Small Array” (VSA) que fue desarrollado conjuntamente por las Universidades de Cambridge y Manchester del Reino Unido y el IAC. El experimento sería liderado por M. Hobson de la Univ. de Cambridge y tendría como responsables a Richard Davis en Jodrell Bank y a mí en el IAC. Se instaló en el Observatorio del Teide y estuvo operativo desde el año 2000 hasta el 2008. Su objetivo principal era estudiar la estructura del Fondo Cósmico de microondas en escalas que van desde unos 10 minutos de arco hasta unos 2 grados para acotar los principales parámetros del modelo cosmológico. También realizó múltiples observaciones del efecto Sunyaev-Zeldovich, que es como se conoce la interacción Compton inversa del plasma electrónico de los cúmulos de galaxias con los fotones del Fondo Cósmico de Microondas.

El VSA estaba formado por dos sistemas de antenas. El primero, denominado “Conjunto principal” estaba constituido por 14 antenas con amplificadores tipo HEMT que operaban en un rango de frecuencias entre 26 y 36 GHz. Las antenas se encuentran montadas sobre una tabla de 3 x 3 m² orientada al meridiano del lugar (ver Figura 10). La tabla se podía inclinar en elevación entre 0



Fig. 10. El conjunto principal de antenas del Very Small Array en su emplazamiento del Observatorio del Teide. Podemos ver la configuración extendida.

y 70 grados. La disposición y las características de las antenas del VSA fueron modificadas a lo largo del tiempo en función de los objetivos científicos del experimento. Esa gran versatilidad permitió realizar entre los años 2000 y 2008, observaciones punteras del Fondo Cósmico de Microondas en escalas angulares que iban desde 6 minutos de arco a unos pocos grados. Dos tesis doctorales se realizaron en nuestro grupo con este experimento, la de José Alberto Rubiño Martín y la de Ricardo Génova Santos.

El segundo subsistema del VSA fue denominado “Point source substractor” (Eliminador de fuentes puntuales) y se trataba de un interferómetro formado por dos antenas de 3.7 m de diámetro separadas por una línea de base de 9 m y equipadas con el mismo tipo de receptores que las del conjunto principal (ver Figura 11). La resolución de este sistema era de unos 4 minutos de arco y por tanto era especialmente sensible a la emisión de radiogalaxias. Su objetivo fue medir esta emisión para todas las galaxias que pudieran contaminar los mapas obtenidos con el conjunto principal de antenas del VSA, de forma que pudiéramos descontaminar esos mapas de estas señales.



Fig. 11. Una de las dos antenas de 3.7 m de diámetro que conforman el interferómetro corrector de emisión de radiogalaxias del experimento Very Small Array.

El objetivo principal del VSA era obtener mapas de muy alta precisión cuyo detallado estudio pudiera arrojar luz sobre el contenido material y energético del Universo, incluyendo las componentes de materia y energía oscura. Y también indagar sobre las características de la etapa inflacionaria.

La Figura 12 muestra algunos de estos mapas de alta sensibilidad que llegaron a cubrir una región de unos 100 grados cuadrados de cielo. Las estructuras que aparecen en ellos son de origen cosmológico ya que previamente hemos corregido la emisión de radiogalaxias como expliqué anteriormente y se puede descartar que la contaminación de nuestra Galaxia sea significativa a esta frecuencia y escala angular.

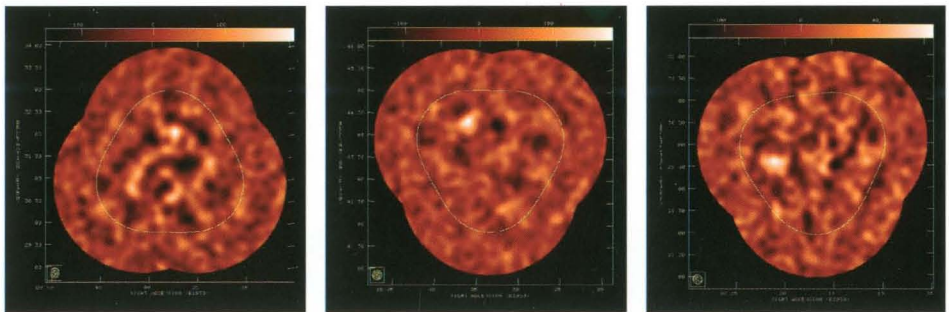


Fig. 12. Algunos de los mapas del Fondo Cósmico de Microondas obtenidos por el VSA.

En la Figura 13 representamos el espectro de potencias angular que se obtuvo de estos y otros mapas del VSA. La confrontación con una red de millones de modelos cosmológicos que generamos en el IAC se pudo realizar con técnicas estadísticas que se conocen con el nombre de cadenas de Markov y Monte-Carlo. Esto permitió acotar los valores de los parámetros cosmológicos más importantes. Los resultados fueron publicados en la revista MNRAS (Rubiño-Martín et al. 2003 y Rebolo et al. 2004). Confirmamos que el Universo presenta una geometría a gran escala compatible con la euclídea y que los valores más probables para la densidad de materia ordinaria rondan el 5% del contenido total de materia y energía del Universo. Ni la naturaleza de la “materia oscura” con un 25% ni la de la energía oscura con un 70% de ese total, han sido probadas de manera directa pero hay evidencias adicionales de su existencia que las hacen objeto central de muchas de las investigaciones que se están desarrollando ahora. Desde luego, es imprescindible descubrir la partícula elemental responsable de la materia oscura,

y comprender mucho más profundamente la naturaleza de la energía en el Universo. Mientras estos importantes ingredientes de nuestra cosmología permanezcan sin resolver, no tendremos una visión plenamente satisfactoria del Cosmos.

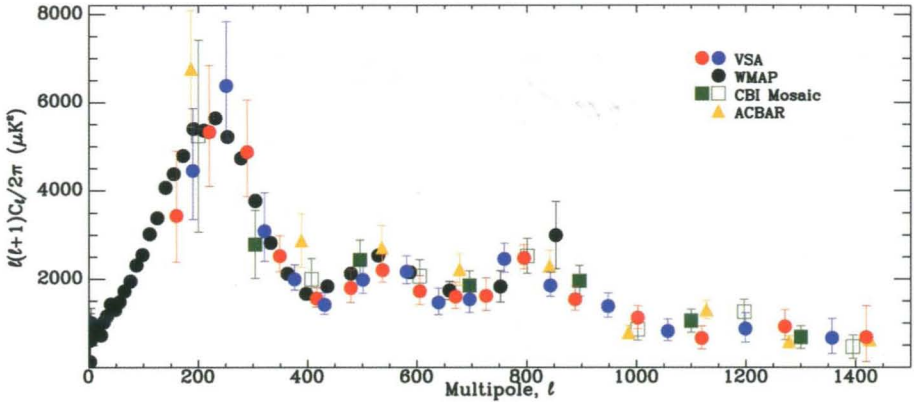


Fig. 13. Espectro de potencias angular obtenido por el VSA (puntos azules y rojos mostrando dos diferentes agrupamientos). Se compara con datos del satélite WMAP (puntos negros) y de los interferómetros CBI (verdes y blancos) y ACBAR (triángulos amarillos).

El VSA no sólo obtuvo datos de gran valor cosmológico, también ha permitido detectar el efecto Sunyaev-Zeldovich en un buen número de cúmulos de galaxias y por primera vez en un supercúmulo de galaxias. Comentaré a continuación algunos aspectos de este último estudio que fue liderado por nuestro equipo de investigación en el IAC. En el año 2002 decidimos poner a prueba la hipótesis de que buena parte de la materia ordinaria en el Universo pudiese residir en el espacio intergaláctico de las estructuras más grandes que conocemos en la actualidad. Estas estructuras son denominadas supercúmulos de galaxias y contienen varios cúmulos de galaxias que a su vez están formados por miles de galaxias. Los supercúmulos de galaxias pueden albergar decenas de miles de éstas y también mucho material en forma de plasma intergaláctico. En los interiores de los cúmulos medidas de la emisión de rayos X y el efecto Sunyaev-Zeldovich habían demostrado que efectivamente éste era el caso. Pero en la primera mitad de la década actual todavía no sabíamos si existía o no plasma en grandes cantidades en los espacios intercumulares de los supercúmulos. Probar esto fue nuestro ob-

jetivo y con el VSA rastreamos con tanto detalle como pudimos el supercúmulo de la Corona Boreal. Tras realizar un examen detallado de las propiedades de los supercúmulos conocidos, trabajo que realizamos con el profesor visitante Nelson Falcón de la Universidad de Carabobo (Venezuela), elegí este supercúmulo por ser uno de los más densos y mejor situados para la observación desde la latitud de Canarias. Nuestras medidas con el VSA en su configuración extendida desveló pronto un decremento muy intenso del Fondo Cósmico de Microondas justo en el centro geométrico del supercúmulo, en una región donde no había cúmulo de galaxias conocido (Génova-Santos et al. 2005, MNRAS). Era la primera vez que se detectaba algo parecido y por tanto la confirmación era muy importante. En colaboración con el grupo de Marco de Petris de la Universidad “La Sapienza”

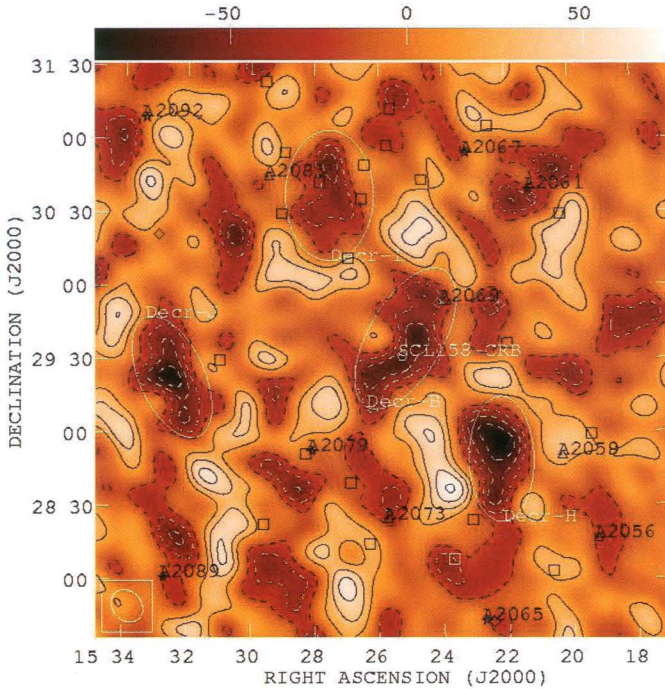


Fig. 14. Mapa obtenido con el VSA (configuración extendida) en la región del supercúmulo de la Corona Boreal. La mancha más oscura denotada como CrB-H aparece entre los cúmulos Abell 2059 y Abell 2073 en una región donde no se conocían cúmulos de galaxias y puede indicar la presencia de plasma intercumular.

en Roma, llevamos a cabo medidas con el telescopio MITO en el norte de Italia que confirmaron el resultado (Battistelli et al. 2006), y unos años después confirmamos plenamente la existencia de este decremento con nuevas observaciones de mayor resolución utilizando VSA (ver Figura 14) en su configuración superextendida (Génova-Santos et al. 2008, MNRAS).

El responsable último del extraordinario decremento en la señal del Fondo Cósmico de Microondas en el supercúmulo de la Corona Boreal todavía no está identificado, actualmente las investigadoras Carmen Padilla e Inés Flores desarrollan sus tesis doctorales en el IAC sobre la distribución espacial de las galaxias en esa región y sobre las propiedades de las simulaciones hidrodinámicas de estructuras en el Universo realizadas con el superordenador Mare Nostrum de Barcelona para tratar de encontrar una explicación. En mi opinión, no se puede descartar una singular combinación de fenómenos que involucrase un efecto de lente gravitatoria, un efecto Rees-Sciama asociado con la evolución temporal del potencial gravitatorio de la superestructura y por supuesto al efecto Sunyaev-Zeldovich, todos ellos podrían estar vinculados con la presencia de este gran supercúmulo de la Corona Boreal o con estructuras más lejanas en esa dirección que todavía no hemos descubierto.

El satélite Planck

En el año 1992, tras el impresionante resultado del satélite COBE, varios científicos europeos interesados en el Fondo Cósmico de Microondas nos propusimos llevar a cabo un experimento europeo desde el espacio que fuese mucho más ambicioso en sus objetivos que los experimentos que razonablemente podríamos realizar desde tierra o con globos estratosféricos. A aquella primera reunión de Bolonia asistimos relativamente pocos, una docena de personas, pero de allí surgió el proyecto COBRAS para la Agencia Espacial Europea. En paralelo, en Francia se reunía un número similar de investigadores que habrían de diseñar el experimento SAMBA también para el espacio. Tras una competición para ver cuál de los dos se llevaba a cabo, se formó un consorcio combinando los intereses de ambos experimentos que habría de dar lugar a lo que hoy es el observatorio Planck (Figura 15), con más de trescientos científicos involucrados en el desarrollo y explotación de sus dos instrumentos de a bordo: uno de baja

frecuencia llamado “Low Frequency Instrument” (LFI) y otro de alta llamado “High Frequency Instrument” (HFI).



Fig. 15. El satélite Planck de la Agencia Espacial Europea (crédito figura: ESA).

El satélite Planck consta esencialmente de estos dos instrumentos que son alimentados por una pareja de antenas, que forman lo que llamamos el telescopio, y un módulo de servicios que contiene todos los subsistemas necesarios para control del satélite y su comunicación con la Tierra así como la electrónica y los ordenadores de los instrumentos científicos. El telescopio que capta la radiación de microondas consiste de un espejo primario de $1.9 \times 1.5 \text{ m}^2$ de tamaño que operará a una temperatura de 40 K y de uno secundario de menor tamaño. Están hechos de fibra de carbono reforzada por una delgada capa de material plástico

que a su vez está recubierta por una capa de aluminio para proporcionar gran reflectividad.

El instrumento de alta frecuencia permite realizar medidas entre 84 GHz y 1 THz. Consiste de un conjunto de 52 detectores bolométricos situados en el plano focal del telescopio y enfriados a una temperatura de 0.1 K. Ha sido desarrollado por un consorcio de más de 20 instituciones científicas liderado por el Institut d'Astrophysique Spatiale in Orsay (Francia).

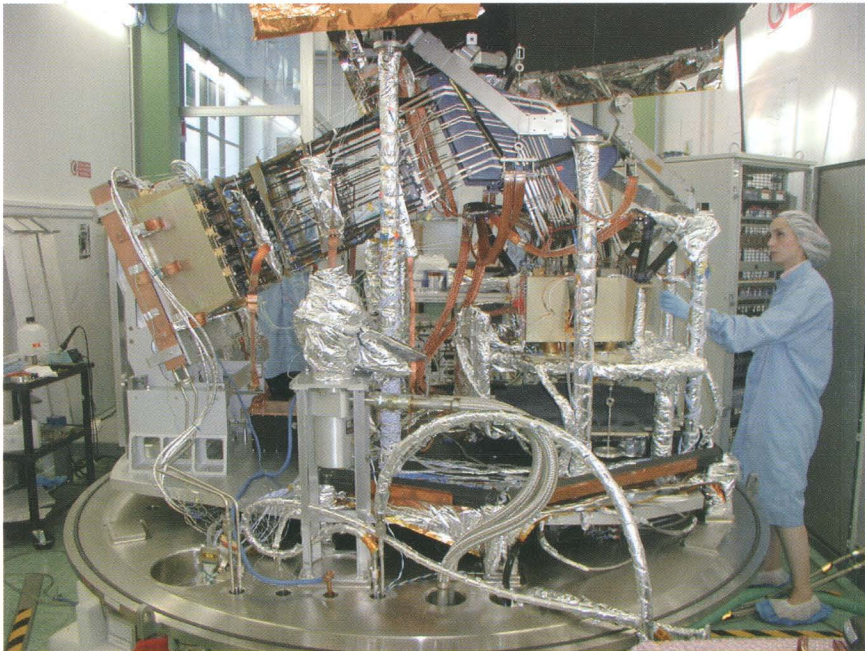


Fig. 16. El Low Frequency Instrument del satélite Planck durante una de las fases del montaje (crédito: ESA).

El instrumento de baja frecuencia (Figura 16) permite realizar medidas entre 27 y 77 GHz y consiste de un conjunto de 22 receptores de microondas que operarán a -253 °C. Fue construido por un consorcio de más de 20 instituciones científicas liderado por el Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica in Bolonia (Italia). Como co-investigador de este consorcio tuve la responsabilidad de proporcionar todo el sistema de procesamiento digital de datos, el REBA (“Radio-

meter Electronics Box Assembly”, Figura 17) y el *software* de a bordo que iría implementado en él. Nuestra tarea fue posible gracias a la dedicación durante muchos años de equipos de ingenieros en el IAC liderados por Francisca Gómez Reñasco en *software* y Jose Miguel Herreros en *hardware*. Contamos además con la muy valiosa colaboración de la empresa madrileña del sector espacial CRISA y por supuesto con el apoyo del Plan Nacional del Espacio que durante casi dos décadas ha financiado la participación en Planck de mi grupo y de otros en España.

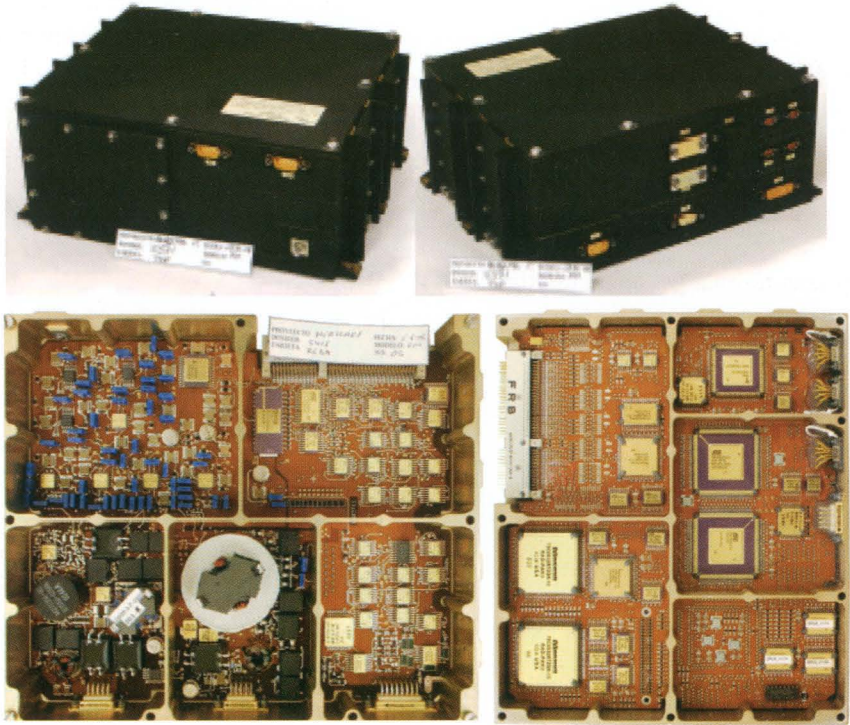


Fig. 17. Los modelos de vuelo (nominal y repuesto) del REBA para el Low Frequency Instrument de Planck. En la parte inferior se muestran algunas de las tarjetas que fueron manufacturadas. A la izquierda para la unidad de adquisición de datos y la unidad de potencia. A la derecha para el módulo de procesamiento de señal de la unidad central de procesamiento.

De nuestra participación en el satélite quisiera también destacar el papel que tuvo Roger Hoyland, ingeniero del IAC, en el diseño de los receptores del LFI y desde el punto de vista científico nuestra participación en numerosos programas y el liderazgo que nuestro grupo tiene, muy especialmente José Alberto Rubiño, en varios de ellos.

Planck fue lanzado el 14 de mayo de 2009 y en el momento de escribir este discurso se encuentra viajando hacia el punto L2 a millón y medio de kilómetros de la Tierra. En los dos próximos años podremos ver cómo el satélite obtendrá los datos más precisos en este campo, dejando como legado nueve mapas de todo el cielo a nueve frecuencias elegidas en el rango 30-900 GHz. Con estos mapas los astrofísicos podrán extraer el espectro de potencias angular del Fondo Cósmico de Microondas con una precisión sin precedentes (Figura 18) y desentrañar el origen de la estructura del Universo a gran escala, desde la formación de las galaxias a la de los supercúmulos y grandes vacíos, además de conseguir acotar con precisión de unos pocos por ciento, los parámetros esenciales del modelo cosmológico vigente. Por supuesto, todo esto sucederá si este modelo resultase revalidado. Con el grado de precisión que ofrecerán las nuevas medidas podríamos incluso vernos abocados a una revisión mayor de nuestras ideas cosmológicas, posibilidad quizás remota pero fascinante.

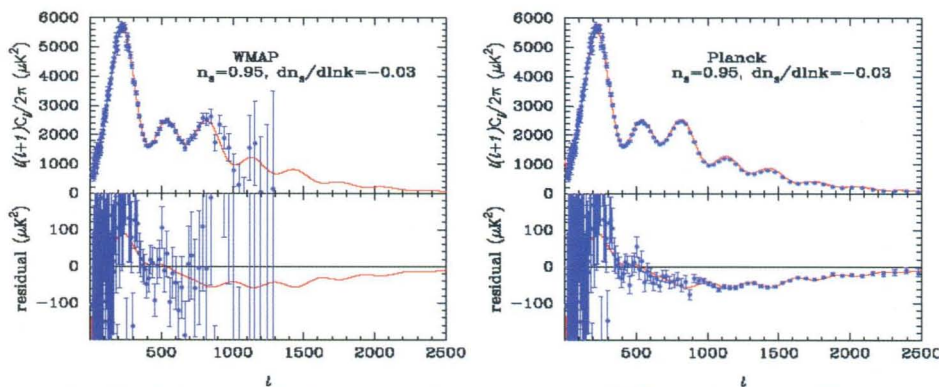


FIG 2.12.—Same as Figure 2.11, but now comparing the concordance Λ CDM model, having $n_s = 0.95$ and zero run (solid line), with a realisation of a model having with $n_s = 0.95$ (at a fiducial wavenumber of $k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$) and a run of $dn_s/d\ln k = -0.03$.

Fig. 18. Comparación de los espectros de potencias angulares del satélite WMAP y de Planck (tomado de C. Lawrence).

La polarización del Fondo Cósmico de Microondas: el experimento QUIJOTE y la búsqueda de ondas gravitacionales primordiales

Finalmente, describiré un nuevo experimento que lidera nuestro grupo; se trata del QUIJOTE-CMB (Q U I JOint TEnerife CMB experiment), que tiene el objetivo de caracterizar la polarización del Fondo Cósmico de Microondas (FCM) y otros procesos de emisión galáctica y extra-galáctica en el rango 10-30 GHz y a grandes escalas (1 grado de resolución) con el fin último de restringir o encontrar evidencias de la generación de ondas gravitacionales en el Big Bang.

Las ondas gravitacionales son distorsiones del espacio tiempo que de acuerdo con la teoría se pueden generar en una gran variedad de contextos en el Cosmos, entre ellos los grandes cataclismos como la fusión de estrellas de neutrones, o en la formación de agujeros negros en la explosión de supernovas y por supuesto, también en el Big Bang. Los modelos de la Inflación predicen la generación de ondas gravitacionales que habrían dejado su impronta en el Fondo Cósmico de Microondas, más concretamente en el espectro de potencias de la polarización de este fondo de radiación en forma de los denominados “modos-B”. La detección de dichos modos-B y la medida de su amplitud abriría un camino extraordinario para esclarecer la física de la época de inflación.

Las medidas del experimento QUIJOTE complementarán a baja frecuencia y también servirán para corregir mejor de contaminación galáctica las que obtenga el satélite Planck. Serán las más sensibles obtenidas para caracterizar la polarización de la emisión sincrotrón y anómala de nuestra Galaxia.

El experimento constará de dos fases. Una primera, ya financiada y en construcción, en la que se instalará un primer telescopio en el Observatorio del Teide con un instrumento en su plano focal. Este telescopio está construido y se puede ver en la Figura 19. Ha sido diseñado para poder realizar observaciones hasta una frecuencia de 100 GHz y está preparado para poder girar hasta una velocidad cercana a 10 rpm. El sistema óptico consta de dos antenas en una configuración óptima para realizar medidas de la polarización de la radiación. La primaria tiene un tamaño de casi 3 m. El primer instrumento que se pondrá en el plano focal del telescopio será multi-frecuencia, con un total de 8 canales en cada una de las cuatro frecuencias 11, 13, 16 y 18 GHz, más cuatro canales de detección a 30 GHz. La construcción de este instrumento está también muy avanzada y algunos de sus subsistemas optomecánicos se pueden ver en la Figura 20. Entre los muchos



Fig. 19. Uno de los telescopios del proyecto QUIJOTE en los talleres del IAC en La Laguna.

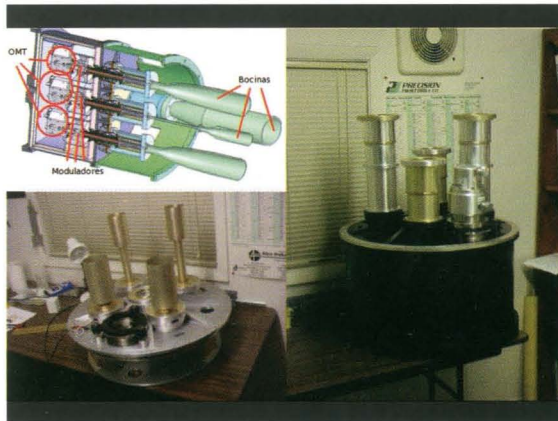


Fig. 20. Esquema y algunos componentes del sistema optomecánico del instrumento multi-frecuencia del experimento QUIJOTE.

desafíos asociados con la construcción destacaré que los sistemas de modulación deben girar a 10 Hz en alto vacío y baja temperatura. Los receptores están basados en amplificadores de muy bajo ruido que se enfrían a unos 20 K para optimizar la sensibilidad de los mismos.

La segunda fase de QUIJOTE constará de un telescopio equipado con 15 receptores a 30 GHz (60 canales), ha sido diseñada para alcanzar la sensibilidad necesaria para detectar una componente de ondas gravitacionales primordial si ésta tuviera una razón tensorial a escalar de 0.1 (ver Figura 21).

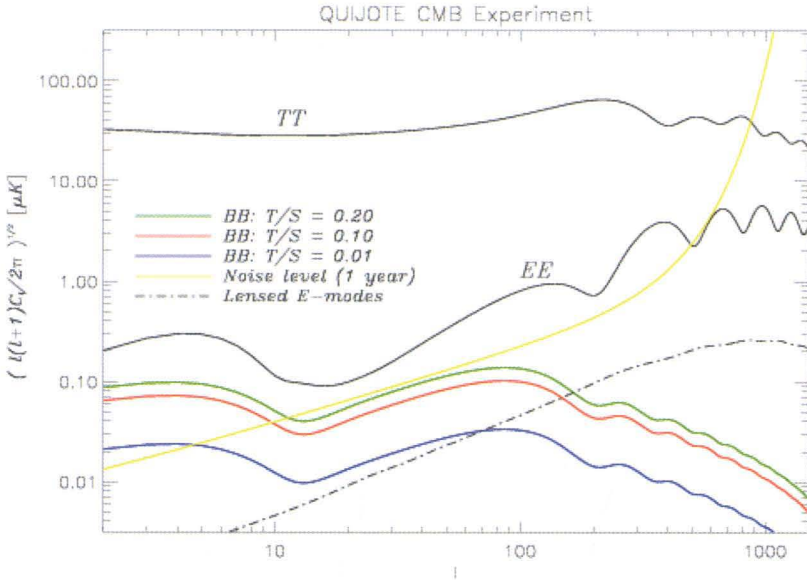


Figura 21. Espectros de potencias angular de la intensidad (TT), de la polarización lineal (EE) y de los modos rotacionales (BB) para un modelo cosmológico estándar. Los modos tensoriales BB debidos a ondas gravitacionales se muestran para diversos valores de la razón de modos tensoriales a escalares. La línea amarilla representa el nivel de ruido esperado después de un año de toma de datos.

Para alcanzar esos objetivos científicos, los mapas finales del experimento cubrirán un área de al menos 5,000 grados cuadrados, y deberán lograr un nivel de sensibilidad de 3-4 micro-K por haz tras un año de operación en las bajas frecuencias (11-18GHz), y 1 micro-K por haz tras dos años de observación con el segundo instrumento en la frecuencia de 30GHz.

Además del IAC, en el proyecto QUIJOTE participan el Instituto de Física de Cantabria (IFCA, Santander), el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (DICOM, Santander), la Universidad de Manchester, la Universidad de Cambridge (Reino Unido) y la empresa de ingeniería bilbaína IDOM. Una información actualizada del proyecto puede encontrarse en la página web <http://www.iac.es/project/cmb/quijote>.

Investigación teórica

No quisiera concluir estas palabras sin referirme a las investigaciones con carácter teórico que dentro de nuestro grupo lidera José Alberto Rubiño. En colaboración con Rashid Sunyaev, Director del Instituto Max Planck de Astrofísica en Garching, y otros colegas, el Dr. Rubiño ha dedicado un especial esfuerzo a entender con gran detalle los fenómenos físicos que tuvieron lugar en el Universo después de la denominada etapa de recombinación y las huellas que estos procesos han dejado en el Fondo Cósmico de Microondas. Estos investigadores han analizado los sutiles procesos de interacción de los átomos primordiales, esencialmente hidrógeno y helio, con los fotones de microondas presentes en aquella época remota y predicho varios fenómenos cuya observación desafían nuestras actuales capacidades tecnológicas pero que en un futuro podremos seguramente poder llegar a medir.

Conclusión

El progreso realizado en estas dos décadas es impresionante, sabemos mucho más y comprendemos mejor el Universo. El estudio del Fondo Cósmico de Microondas ha sido decisivo para dar respuesta a muchas de las preguntas cosmológicas que nos han acompañado durante siglos, pero también para formular nuevas cuestiones que desafían nuestra inteligencia e imaginación y que seguramente nos tendrán ocupados mucho tiempo. El desarrollo de experimentos cada vez más complejos y sensibles ha sido una de las claves para avanzar y sin lugar a dudas continuará siéndolo en los próximos años.

Agradecimientos

Quisiera agradecer el apoyo que la dirección del Instituto de Astrofísica de Canarias ha proporcionado a nuestro grupo de investigación desde sus comienzos, y expresar mi gratitud a los muchos miembros del Instituto, tanto del Área de Investigación como de Instrumentación y Administración que han contribuido de una manera o de otra a que hayamos podido llevar a cabo estas investigaciones y todos los experimentos que he relatado. Muy especialmente quiero agradecer a los científicos e ingenieros que han formado parte del equipo durante estos años por su esfuerzo y dedicación. Soy perfectamente consciente de que sin la contribución de todos ellos no habría sido posible llevar adelante estas investigaciones y espero seguir contando con ellos para abordar los nuevos desafíos. Un agradecimiento muy especial debo a mi esposa e hijos por su constante apoyo y generosidad que me ha permitido dedicar a éstas y otras investigaciones una parte del tiempo que les correspondía a ellos. Finalmente, quiero agradecer a los miembros de esta Academia y a su Presidente la amable invitación a ser miembro de ésta.

Selección de publicaciones del grupo del Fondo Cósmico del Instituto de Astrofísica de Canarias (1987-2007)

Sensitive measurements of fluctuations in the Cosmic Microwave Background. Davies, R.D., Lasenby, A.N., Watson, R.A., Daintre, E.J., Hopkins, J., Beckman, J.E., Sánchez-Almeida, J., Rebolo, R. *Nature*, 326, 462, 1987.

Anisotropy of the cosmic microwave background at intermediate angular scales. Watson, R.A., Gutiérrez de la Cruz, C., Davies, R. D., Lasenby, A.N., Rebolo, R., Beckman, J.E., Hancock, S. *Nature*, 357, 660, 1992.

Direct observations of structure in the cosmic microwave background. Hancock, S., Davies, R.D., Lasenby, A.N., Gutiérrez de la Cruz, C, Watson, R.A., Rebolo, R., Beckman, J.E. *Nature*, 367, 333, 1994.

Pip analysis of the Cosmic Microwave Background data: Application to the Tenerife experiment. Gutiérrez de La Cruz, C., Martínez-González, E., Cayón, L., Rebolo, R., Sanz, J.L. *M.N.R.A.S.*, 271, 553, 1994.

Dual frequency mapping with the Tenerife Cosmic Microwave Background Experiments. Gutiérrez de la Cruz, C., Davies, R.D., Rebolo, R., Watson, R.A., Lasenby, A.N., Hancock, S. *Astrophys. J.*, 442, 10, 1995.

Comparison of the COBE DMR and Tenerife Data. Lineweaver, C.H., Hancock, S., Smoot, G.F., Lasenby, A.N., Davies, R.D., Banday, A., Gutiérrez de la Cruz, C.M., Watson, R.A., Rebolo, R. *Astrophys. J.*, 448, 482, 1995.

Foreground contributions to 0.2-2 degrees CMB Anisotropies. Toffolati, L., et al. *Astrophys. Lett. Com.*, 32, 125, 1995.

The Tenerife observations I: The performance of the Tenerife CMB experiments. Davies, R.D., Gutiérrez de la Cruz, C., Rebolo, R., Watson, R.A., Lasenby, A.N., Hancock, S. *Astrophys. Lett. Com.*, 32, 183, 1995.

The Tenerife observations II: An overview of the results and future prospects. Lasenby, A.N., Hancock, S, Davies, R.D., Gutiérrez de la Cruz, C., Watson, R.A., Rebolo, R. *Astrophys. Lett. Com.*, 32, 191, 1995.

The Tenerife observations III: CMB features in the data and a comparison with COBE. Hancock, S, Lasenby, A.N., Gutiérrez de la Cruz, C., Davies, R.D., Watson, R.A., Rebolo, R. *Astrophys. Lett. Com.*, 32, 201, 1995.

The Tenerife CMB experiment: Two dimensional maps. Rebolo, R., Watson, R.A., Gutiérrez de la Cruz, C., Davies, R.D., Lasenby, A.N., Hancock, S. *Astrophys. Lett. Com.*, 32, 211, 1995.

COBRAS: A Space Mission for Mapping the CMB Structure at 0.5 degrees resolution. Smoot, G.F., et al. *Astrophys. Lett. Com.*, 32, 297, 1995.

COBRAS: Goal and Experimental approach. Mandolesi, N., et al. *Astrophys. Lett. Com.*, 32, 309, 1995.

Studies of the CMB Structure at $\text{dec} = +40^\circ$. I. The performance of the Tenerife Experiments. Davies, R.D., Gutiérrez de la Cruz, C.M., Hopkins, J., Melhuish, S., Watson, R.A., Hoyland, R., Rebolo, R., Lasenby, A., Hancock, S. *M.N.R.A.S.*, 278, 883, 1996.

Recent results of the Tenerife CMB Experiments. Gutiérrez, C.M., Davies, R.D., Watson, R.A., Rebolo, R., Hancock, S., Lasenby, A.N. *Astron. Astrophys. Transactions*, 10, 43, 1996.

Millimetric ground-based observations of cosmic Microwave Background Anisotropy. Piccirillo, L., Femenia, B., Kachwala, N., Rebolo, R., Limon, M., Gutiérrez, C.M., Nicholas, J., Schceffer, R.K., Watson, R.A. *Astrophys. J.*, 475, L 77, 1997.

New Cosmological Structures on Medium Angular Scales Detected with the Tenerife Experiments. Gutiérrez, C.M., Hancock, S., Davies, R.D., Rebolo, R., Watson, R.A., Hoyland, R.J., Lasenby, A.N., Jones, A.W. *Astrophys. J.*, 480, L83, 1997.

Studies of CMB structure at $\text{Dec} = +40^\circ$. II. Analysis and Cosmological interpretation. Hancock, S., Gutiérrez, C.M., Davies, R.D., Lasenby, A.N., Rocha, G., Rebolo, R., Watson, R.A., Tegmark, M. *M.N.R.A.S.*, 289, 505, 1997.

10-GHz Tenerife cosmic microwave background observations at 8° resolution. and their Analysis using a new maximum entropy method. Jones, A.W, Hancock, S., Lasenby, A.N., Davies, R., Gutiérrez, C.M, Rocha, G., Watson, R.A, Rebolo, R. *M.N.R.A.S.*, 294, 582, 1998.

The IAC-Bartol Cosmic Microwave Background Anisotropy Experiment: Results of the 1994 Campaign. Femenía, B., Rebolo, R., Gutiérrez, C.M., Limon, M., Piccirillo, L. *Ap. J.*, 498, 117, 1998.

A 33 GHz interferometer for CMB observations on Tenerife. Melhuish, S. J., Dicker, S., Davies, R.D., Gutiérrez, C.M., Watson, R.A., Davis, R.J., Hoyland, R.J., Rebolo, R. *M.N.R.A.S.*, 305, 399, 1999.

Cross-Correlation of Tenerife Data with Galactic Templates Evidence for Spinning Dust? Oliveira-Costa, A., Tegmark, M., Gutiérrez, C.M., Jones, A.W., Davies, R.D., Lasenby, A.N., Rebolo, R., Watson, R.A. *Astrophys. J.*, 527, L 9, 1999.

Cosmic Microwave Background Observations with the Jodrell Bank–IAC Interferometer at 33 GHz. Dicker, S.R., Melhuish, S.J., Davies, R.D., Gutiérrez, C.M., Rebolo, R, Harrison, D.L., Davis, R.J., Wilkinson, A., Hoyland, R.J., Watson, R.A. *M.N.R.A.S.*, 309, 750, 1999.

The Tenerife Cosmic Microwave Background Maps: Observations and First Analysis. Gutiérrez, C.M., Rebolo, R., Watson, R.A., Davies, R.D., Jones A.W., Lasenby A.N. *Astrophysical J.*, 529, 47, 2000.

A measurement at the first acoustic peak of the cosmic microwave background with the 33-GHz interferometer. Harrison, D.L., Rubiño-Martín, J.A., Melhuish, S.J., Watson, R.A., Davies, R.D., Rebolo, R. Davis, R.J., Gutiérrez, C.M., Macías-Pérez, J.F. *M.N.R.A.S.*, 316, 24, 2000.

Cosmic Microwave Background Experiments on Tenerife. Rebolo, R., Gutiérrez, C.M., Watson, R.A., Gallegos, J. *Astrophys. Lett. Comm.*, 37, 293, 2000.

Millimetric Ground-Based Observations of Cosmic Microwave Background Radiation Anisotropy at $\delta=+28^\circ$. Romeo, G., Ali, S., Femenía, B., Limon, M., Piccirillo, L., Rebolo, R., Schaefer, R. *Astrophys. J.*, 1, 2001.

COSMOSOMAS: a circular scanning instrument to map the sky at centimetric wavelengths. Gallegos, J.E., Macías-Pérez, J.F., Gutiérrez, C.M., Rebolo, R., Watson, R.A., Hoyland, R.J., Fernández-Cerezo, S. *M.N.R.A.S.*, 327, 1178, 2001.

A new spin on Galactic Dust. De Oliveira-Costa, A., Tegmark, M., Finkbeiner, D.P., Davies, R.D., Gutiérrez, C.M., Haffner, L.M., Jones, A.W., Lasenby, A.N., Rebolo, R., Reynolds, R.J., Tufte, S.L., Watson, R.A. *Astrophys. J.*, 567, 363, 2002.

Cosmic Microwave Background Anisotropy Observations. Rebolo, R. *Space Science Reviews*, 100, 15, 2002.

First results from the Very Small array I: observational methods. Watson, R.A. et al. *M.N.R.A.S.*, 341, 1057, 2003.

First results from the Very Small Array II: observations of the CMB. Taylor et al. *M.N.R.A.S.*, 341, 1066, 2003.

First results from the Very Small Array III: The CMB power spectrum. Scott et al. *M.N.R.A.S.*, 341, 1076, 2003.

First results from the Very Small Array IV: Cosmological implications. Rubiño-Martín, J.A., Rebolo, R. et al. *M.N.R.A.S.*, 341, 1084, 2003.

The CMB power spectrum out to $l=1400$ measured by the VSA. Grainge et al. *M.N.R.A.S.*, 341, L 23, 2003.

Cosmological parameter estimation and Bayesian model comparison using VSA data. Slosar et al. *M.N.R.A.S.*, 341, L 29, 2003.

The Quest for Microwave Foreground X. de Oliveira-Costa, A., Tegmark, M., Davies, R.D., Gutiérrez, C.M., Lasenby, A., Rebolo, R., Watson, R.A. *Astrophys. J.*, 606, L89, 2004.

Searching for non-Gaussianity in the Very Small Array Data. Savage, R. et al. M.N.R.A.S., 349, 973, 2004.

Estimating the Bispectrum of the Very Small Array Data. Smith, S. et al. M.N.R.A.S., 352, 887, 2004.

High-Sensitivity Measurements of the Cosmic Microwave Background Power Spectrum with the Extended Very Small Array. Dickinson, C. et al. M.N.R.A.S., 353, 732, 2004.

Cosmological Parameter Estimation using Very Small Array Data out to $l=1500$. Rebolo, R. et al. M.N.R.A.S., 353, 747, 2004.

Detection of Anomalous Microwave Emission in the Perseus Molecular Cloud with the COSMOSOMAS Experiment. Watson, R.A., Rebolo, R., Rubiño-Martín, J.A., Hildebrandt, S., Gutiérrez, C.M., Fernández-Cerezo, S., Hoyland, R.J.; Battistelli, E.S. *Astrophys. J.*, 624, L 89, 2005.

Very Small Array observations of the Sunyaev-Zel'dovich effect in nearby galaxy clusters. Lancaster et al. M.N.R.A.S., 359, 16, 2005.

Source subtraction for the extended Very Small Array and 33-GHz source count estimates. Cleary, K. et al. M.N.R.A.S., 360, 340, 2005.

The imprint of cosmological hydrogen recombination lines on the power spectrum of the CMB. Rubiño-Martín, J.A., Hernández-Monteaugado, C., Sunyaev, R.A. *Astron. Astrophys.*, 438, 461, 2005.

Gaussianity of the cosmic microwave background: smooth goodness-of-fit tests applied to interferometric data. Aliaga, A.M., Rubiño-Martín, J.A., Martínez-González, E. Barreiro, R.B., Sanz, J.L. M.N.R.A.S., 356, 1559, 2005.

A Very Small Array Search for the Extended Sunyaev-Zel'dovich Effect in the Corona Borealis Supercluster. Génova-Santos, R. et al., Rubiño-Martín, J.A., Rebolo, R. et al. M.N.R.A.S., 363, 79, 2005.

Cosmic Microwave Background Observations from the Cosmic Background Imager and Very Small Array: A Comparison of Coincident Maps and Parameter Estimation Methods. Rajguru, N. et al. M.N.R.A.S., 363, 1125, 2005.

Millimeter Observation of the SZ Effect in the Corona Borealis Supercluster. Battistelli, E.S. et al. *Astrophys. J.*, 645, 826, 2006.

Polarization Observations of the Anomalous Microwave Emission in the Perseus Molecular Complex with the Cosmosomas Experiment. Battistelli, E.S., Rebolo, R., Rubiño-Martín, J.A., Hildebrandt, S.R., Watson, R.A., Gutiérrez, C., Hoyland, R. *Astrophys. J. Lett.*, 645, L 141, 2006.

Observations of the Cosmic Microwave Background and Galactic Foregrounds at 12-17 GHz with the COSMOSOMAS Experiment. Fernández-Cerezo, S., Gutiérrez, C.M., Rebolo, R., Watson, R.A., Hoyland, R.J., Hildebrandt, S., Rubiño-Martín, J.A., Macías-Pérez, J.F., Sosa-Molina, P. M.N.R.A.S., 370, 15, 2006.

Lines in the Cosmic Microwave Background Spectrum from the Epoch of Cosmological Hydrogen Recombination. Rubiño-Martín, J.A., Chluba, J., Sunyaev, R.A. M.N.R.A.S., 371, 1939, 2006.

Cosmological hydrogen recombination: populations of the high-level substates. Chluba, J., Rubiño-Martín, J.A., Sunyaev, R.A. M.N.R.A.S., 374, 1310, 2007.

Constraints on spinning dust towards Galactic targets with the Very Small Array: a tentative detection of excess microwave emission towards 3C396. Scaife, A. et al., M.N.R.A.S., 377, L 69, 2007.

On the influence of resonant scattering on cosmic microwave background polarization anisotropies. Hernández-Monteagudo, C., Rubiño-Martín, J.A., Sunyaev, R.A. M.N.R.A.S., 380, 1656, 2007.

COSMOSOMAS observations of the cosmic microwave background and Galactic foregrounds at 11 GHz: evidence for anomalous microwave emission at high Galactic latitude. Hildebrandt, S.R., Rebolo, R., Rubiño-Martín, J.A., Watson, R.A., Gutierrez, C., Hoyland, R.J., Battistelli, E.S. M.N.R.A.S., 382, 594, 2007.

A linear-filter approach to extracting the Rees-Sciama effect in merging clusters of galaxies. Maturi, M., Ensslin, T., Hernández-Monteagudo, C., Rubiño-Martín, J.A. A.&A. 467, 411, 2007.

SZ effect from Corona Borealis supercluster. Battistelli, E. S., de Petris, M., Lamagna, L., Watson, R.A., Rebolo, R., Genova-Santos, R., Luzzi, G., de Gregori, S., Rubiño-Martín, J.A. New Astron Reviews, 51, 374, 2007.

COLECCIÓN: *DISCURSOS ACADÉMICOS*

1. *La Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote en el contexto histórico del movimiento académico.* (Académico de Número).
Francisco González de Posada. 20 de mayo de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
2. *D. Blas Cabrera Topham y sus hijos.* (Académico de Número).
José E. Cabrera Ramírez. 21 de mayo de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
3. *Buscando la materia oscura del Universo en forma de partículas elementales débiles.* (Académico de Honor).
Blas Cabrera Navarro. 7 de julio de 2003. Amigos de la Cultura Científica.
4. *El sistema de posicionamiento global (GPS): en torno a la Navegación.* (Académico de Número).
Abelardo Bethencourt Fernández. 16 de julio de 2003. Amigos de la Cultura Científica.
5. *Cálculos y conceptos en la historia del hormigón armado.* (Académico de Honor).
José Calavera Ruiz. 18 de julio de 2003. INTEMAC.
6. *Un modelo para la delimitación teórica, estructuración histórica y organización docente de las disciplinas científicas: el caso de la matemática.* (Académico de Número).
Francisco A. González Redondo. 23 de julio de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
7. *Sistemas de información centrados en red.* (Académico de Número).
Silvano Corujo Rodríguez. 24 de julio de 2003. Excmo. Ayuntamiento de San Bartolomé.
8. *El exilio de Blas Cabrera.* (Académica de Número).
Dominga Trujillo Jacinto del Castillo. 18 de noviembre de 2003. Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas. Universidad de La Laguna.
9. *Tres productos históricos en la economía de Lanzarote: la orchilla, la barrilla y la cochinilla.* (Académico Correspondiente).
Agustín Pallarés Padilla. 20 de mayo de 2004. Amigos de la Cultura Científica.
10. *En torno a la nutrición: gordos y flacos en la pintura.* (Académico de Honor).
Amador Schüller Pérez. 5 de julio de 2004. Real Academia Nacional de Medicina.
11. *La etnografía de Lanzarote: "El Museo Tanit".* (Académico Correspondiente).
José Ferrer Perdomo. 15 de julio de 2004. Museo Etnográfico Tanit.
12. *Mis pequeños dinosaurios. (Memorias de un joven naturalista).* (Académico Correspondiente).
Rafael Arozarena Doblado. 17 diciembre 2004. Amigos de la Cultura Científica.
13. *Laudatio de D. Ramón Pérez Hernández y otros documentos relativos al*
Dr. José Molina Orosa. (Académico de Honor a título póstumo).
7 de marzo de 2005. Amigos de la Cultura Científica.
14. *Blas Cabrera y Albert Einstein.* (Acto de Nombramiento como Académico de Honor a título póstumo del Excmo. Sr. D. **Blas Cabrera Felipe**).
Francisco González de Posada. 20 de mayo de 2005. Amigos de la Cultura Científica.
15. *La flora vascular de la isla de Lanzarote. Algunos problemas por resolver.* (Académico Correspondiente).
Jorge Alfredo Reyes Betancort. 5 de julio de 2005. Jardín de Aclimatación de La Orotava.

16. *El ecosistema agrario lanzaroteño*. (Académico Correspondiente).
Carlos Lahora Arán. 7 de julio de 2005. Dirección Insular del Gobierno en Lanzarote.
17. *Lanzarote: características geoestratégicas*. (Académico Correspondiente).
Juan Antonio Carrasco Juan. 11 de julio de 2005. Amigos de la Cultura Científica.
18. *En torno a lo fundamental: Naturaleza, Dios, Hombre*. (Académico Correspondiente).
Javier Cabrera Pinto. 22 de marzo de 2006. Amigos de la Cultura Científica.
19. *Materiales, colores y elementos arquitectónicos de la obra de César Manrique*. (Acto de Nombramiento como Académico de Honor a título póstumo de **César Manrique**).
José Manuel Pérez Luzardo. 24 de abril de 2006. Amigos de la Cultura Científica.
20. *La Medición del Tiempo y los Relojes de Sol*. (Académico Correspondiente).
Juan Vicente Pérez Ortiz. 7 de julio de 2006. Caja de Ahorros del Mediterráneo.
21. *Las estructuras de hormigón. Debilidades y fortalezas*. (Académico Correspondiente).
Enrique González Valle. 13 de julio de 2006. INTEMAC.
22. *Nuevas aportaciones al conocimiento de la erupción de Timanfaya (Lanzarote)*. (Académico de Número).
Agustín Pallarés Padilla. 27 de junio de 2007. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
23. *El agua potable en Lanzarote*. (Académico Correspondiente).
Manuel Díaz Rijo. 20 de julio de 2007. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
24. *Anestesiología: Una especialidad desconocida*. (Académico Correspondiente).
Carlos García Zerpa. 14 de diciembre de 2007. Hospital General de Lanzarote.
25. *Semblanza de Juan Oliveros. Carpintero – imaginero*. (Académico de Número).
José Ferrer Perdomo. 8 de julio de 2008. Museo Etnográfico Tanit.
26. *Estado actual de la Astronomía: Reflexiones de un aficionado*. (Académico Correspondiente).
César Piret Ceballos. 11 de julio de 2008. Iltre. Ayuntamiento de Tías.
27. *Entre aulagas, matos y tabaibas*. (Académico de Número).
Jorge Alfredo Reyes Betancort. 15 de julio de 2008. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
28. *Lanzarote y el vino*. (Académico de Número).
Manuel Díaz Rijo. 24 de julio de 2008. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
29. *Cronobiografía del Dr. D. José Molina Orosa y cronología de acontecimientos conmemorativos*. (Académico de Número).
Javier Cabrera Pinto. 15 de diciembre de 2008. Gerencia de Servicios Sanitarios. Área de Salud de Lanzarote.
30. *Territorio Lanzarote 1402. Majos, sucesores y antecesores*. (Académico Correspondiente).
Luis Díaz Feria. 28 de abril de 2009. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
31. *Presente y futuro de la reutilización de aguas en Canarias*. (Académico Correspondiente).
Sebastián Delgado Díaz. 6 de julio de 2009. Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información.
32. *El análisis del tráfico telefónico: una herramienta estratégica de la empresa*. (Académico Correspondiente).
Enrique de Ferra Fantín. 9 de julio de 2009. Excmo. Cabildo de Fuerteventura.
33. *La investigación sobre el fondo cósmico de microondas en el Instituto de Astrofísica de Canarias*. (Académico Correspondiente).
Rafael Rebolo López. 11 de julio de 2009. Instituto de Astrofísica de Canarias.

**HOTEL LANCELOT
ARRECIFE (LANZAROTE)**



Patrocina:

Instituto de Astrofísica de Canarias

