

ASTRONOMÍA.

Un estudio de prospectiva

Coordinación: Jordi Torra

Diciembre de 2015

Cosmología (p. 4)

E. Martínez (IFCA (CSIC-UC))

N. Benítez (IAA-CSIC)

J. García-Bellido (UAM)

E. Mediavilla (IAC)

R. Domínguez (UAM)

F. Castander (ICE-CSIC)

D. Herranz (IFCA (CSIC-UC))

Galaxias (p. 42)

A. Díaz (UAM)

I. Márquez (IAA-CSIC)

J. Gorgas (UCM)

E. Alfaro (IAA-CSIC)

F. Figueras (UB)

I. Pérez Fournon (IAC)

S. García-Burillo (OAN)

Estrellas (p. 84)

R. Rebolo (IAC)

A. Herrero (IAC)

I. Domínguez (UG)

M. Fernández (IAA-CSIC)

M. R. Zapatero Osorio (CAB (CSIC-INTA))

R. Garrido (IAA-CSIC)

Sol (p. 112)

J. C. del Toro (IAA-CSIC)

L. Lara (IAA-CSIC)

M. Collados (IAC (CSIC-UC))

V. Martínez-Pillet (IAC (CSIC-UC))

B. Sanahuja (UB)

L. Bellot (IAA-CSIC)

A. Sánchez Lavega (UPV-EHU)

J. Licandro (IAC)

Para el Ministerio de Ciencia e Innovación la RIA juega un papel esencial dentro del Mapa de Instalaciones Científicas y Técnicas Singulares, y la publicación de este estudio avala su importancia y la relevancia que han tenido los coordinadores de la RIA. Es un homenaje a nuestro querido colega y amigo Jordi Torra que con su esfuerzo desinteresado contribuyó sobremedida a la consolidación y potenciación de la RIA.

Prof. Rafael Rodrigo

Secretario General de Investigación

Ministerio de Ciencia e Innovación



De izquierda a derecha, Xavier Barcons (coordinador de la RIA, 2007-2010), Vicent J. M... (coordinador de la RIA, 2011-2017), en una Reunión Científica de la RIA, celebrada en la...

Prólogo

La RIA fue creada en 2007 como un Grupo de Trabajo de la Comisión Nacional de Astronomía (CNA). Su primer coordinador (desde 2007 a 2010) fue el prof. Xavier Barcons, actual director general del European Southern Observatory (ESO). Le sucedió el prof. Jordi Torra que fue el coordinador de la RIA desde 2011 hasta 2017. El Mapa de las Instalaciones Científico-Técnicas singulares (ICTS), actualizado en 2018 identifica a la RIA como una Red de ICTS constituida, en la actualidad, por seis instalaciones:

- Gran Telescopio Canarias (GTC)
- Observatorios de Canarias (OOC). Incluye a los Observatorios del Roque de los Muchachos (ORM, La Palma) y del Teide (OT, Tenerife)
- Observatorio Astronómico de Calar Alto (CAHA)
- Radiotelescopio IRAM 30m (IRAM)
- Observatorio de Yebes (OY)
- Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ)

Por otra parte, la RIA incluye, dentro de sus actividades de coordinación, las actividades que se llevan a cabo en las Instalaciones y Organismos Internacionales (IOI) de Astronomía:

- European Southern Observatory (ESO)
- Programa Científico de la European Space Agency (ESA)

Al mismo tiempo la Red coordina la participación española en las futuras infraestructuras de investigación europeas en Astronomía en tierra, entre otras las incluidas en la hoja de ruta del Foro Estratégico Europeo de Infraestructuras de Investigación (ESFRI, por sus siglas en inglés): el European Solar Telescope (EST), el Square Kilometer Array (SKA) y el Cherenkov Telescope Array (CTA).

Los objetivos generales de la RIA, tal y como establece su reglamento, son:

- Asesorar a la Administración del Estado y a las Instituciones que lo deseen en el campo de las infraestructuras y la instrumentación astronómicas.
- Facilitar la coordinación entre las diversas infraestructuras de la Red.

- Optimizar y coordinar el uso de otras infraestructuras necesarias para la astronomía.

Durante estos doce años, la RIA ha organizado 57 reuniones científicas que han vertebrado enormemente a la comunidad astronómica española, ha facilitado sinergias entre las diferentes ICTS de Astronomía a través de sus Grupos de Trabajo y ha informado puntualmente a la Comisión Nacional de Astronomía sobre sus actividades.

El presente documento, un estudio de prospectiva sobre la astronomía española, se elaboró en la última etapa en la que Jordi Torra fue el coordinador de la RIA. En su elaboración participó un nutrido grupo de astrónomos españoles, 27 en total, que se organizó en cuatro paneles temáticos: Cosmología, Galaxias, Estrellas y Sistema Solar. Cada panel llevó a cabo un pormenorizado estudio de los siguientes aspectos en cada una de esas áreas:

- Objetivos científicos para la década.
- Estado actual.
- Necesidades instrumentales.
- Proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro.



Martínez (coordinador de la RIA), José Ignacio Doncel (presidente de la RIA) y Jordi Torra (sede del CSIC (Madrid), del 3 al 5 de octubre de 2018. Foto: Carlos Eugenio Tapia Ayuga.

El resultado de ese arduo trabajo fue un documento de texto cuya versión final data de diciembre de 2015. Desafortunadamente no se publicó en su momento por lo que la comunidad astronómica lo desconoce. Sin duda alguna, la voluntad de Jordi Torra era culminar este proyecto. Su enfermedad se lo impidió. Cuando a mediados de 2017 me hice cargo de la coordinación de la RIA, Jordi Torra y yo mantuvimos una estrecha relación para llevar adelante las diferentes actividades más urgentes que en ese momento tenía la RIA: la elaboración de su plan estratégico, la convocatoria de las reuniones científicas, el seguimiento de las infraestructuras tanto nacionales como internacionales, entre las que la participación española en SKA tuvo una relevancia especial, las reuniones de los grupos de trabajo, la participación en la convocatoria de ayudas a redes de ICTS, etc. Jordi Torra continuó activo hasta el final, acudiendo a las reuniones del Consejo de Dirección de la RIA cuando su enfermedad se lo permitía, en ocasiones con serios problemas de salud, pero siempre con un gran ánimo. Por ejemplo, una de las reuniones de

dirección de WEAVE se llevó a cabo en Barcelona para facilitar la participación de Jordi. Todos los miembros del consejo pudieron agradecerle el esfuerzo llevado a cabo desde la RIA, para que este proyecto, que se menciona en varios lugares de este informe, llegase a buen puerto: la primera luz de WEAVE está prevista para este mismo año.

Actualmente la RIA ha cumplido ya el duodécimo aniversario desde su fundación y continua su intensa actividad, sin duda gracias al esfuerzo continuado y entusiasta de su gestora, Ester Calle. Pero quedaba pendiente la publicación del estudio de prospectiva. Había que hacerlo y, aunque ciertamente, el inexorable paso del tiempo hacía que parte de su contenido no estuviera actualizado, el Consejo de Dirección de la RIA valoró la oportunidad de que el estudio se publicara en un formato que facilitase su lectura. El documento que sigue a este prólogo es el estudio tal y como quedó a finales de 2015, coordinado por Jordi Torra, con algunas pequeñas correcciones y con una excelente maquetación llevada a cabo por Fernando

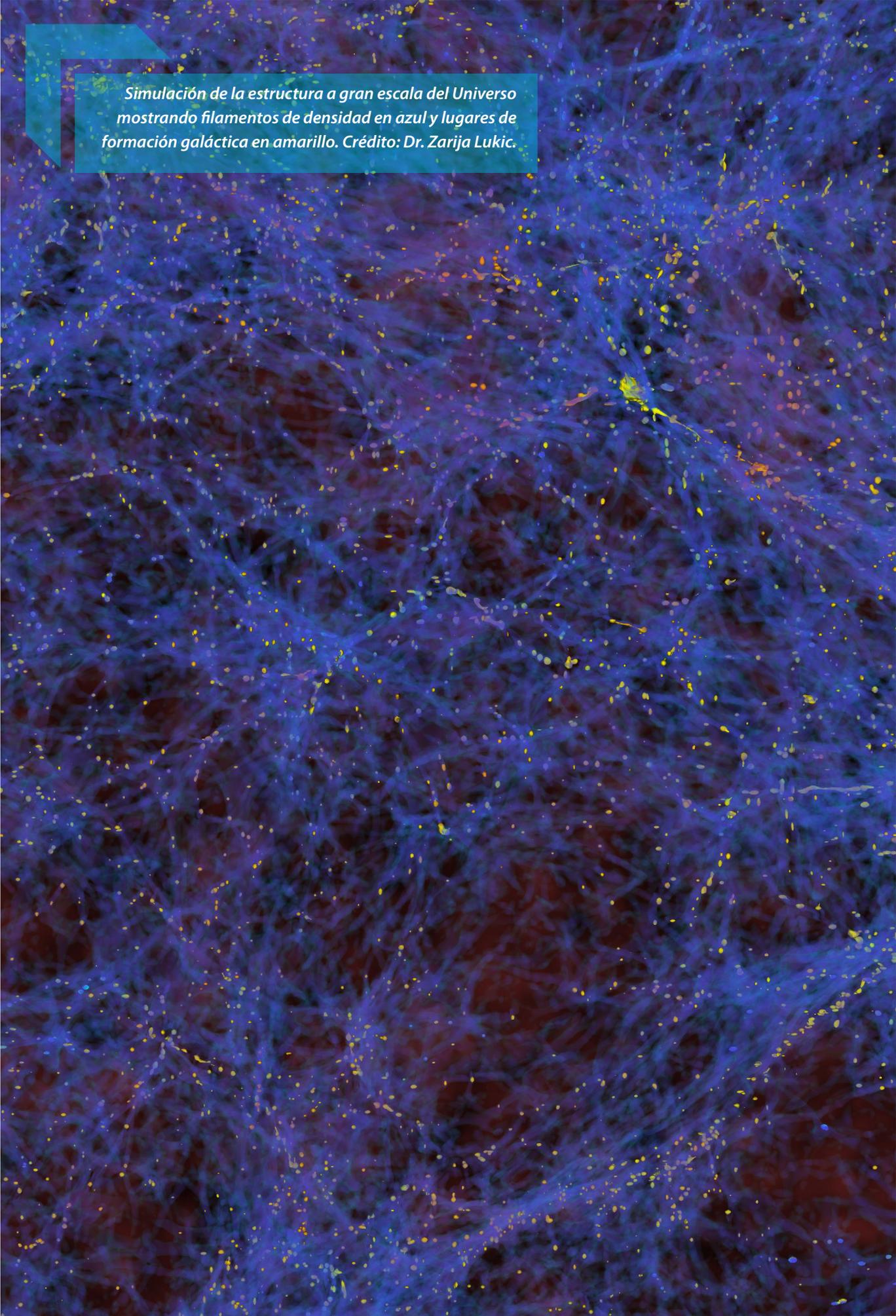
Ballesteros, que lleva preparando el Boletín de la Sociedad Española de Astronomía desde hace varios años. El resultado merece la pena.

Decidimos finalmente contactar con los líderes de los cuatro paneles anteriormente mencionados, los profesores Enrique Martínez-González, Ángeles Díaz, Rafael Rebolo, Artemio Herrero y José Carlos del Toro, así como con el resto sus miembros, solicitándoles unas páginas de actualización: una breve relación de las actividades y proyectos en marcha llevados a cabo en los últimos cuatro años en cada una de las cuatro áreas. Hemos añadido estas actualizaciones al final de cada uno de los cuatro capítulos. En algunos casos la actualización la ha llevado a cabo el responsable del panel, en otros casos se han repartido la tarea entre los miembros del panel o incluso se han incorporado nuevos autores, cuyos nombres aparecen en las páginas de actualización. Quiero agradecer enormemente este trabajo llevado a cabo en tiempo record y que concede un gran valor al estudio, ya que lo contextualiza en el momento actual.

Quiero agradecer también al profesor Gustavo Yepes, coordinador de Astronomía y Astrofísica en la Agencia Estatal de Investigación (AEI) que ha respondido positivamente a mi invitación para que redactara el epílogo de este estudio. Su reflexión sobre la financiación de la Astronomía en el marco de la AEI es muy relevante en el contexto de este estudio de prospectiva.

Finalmente me gustaría añadir que la publicación de este estudio rinde un más que merecido tributo a su verdadero artífice, nuestro querido colega, amigo y gran científico, Jordi Torra.

Vicent J. Martínez, coordinador de la RIA, febrero de 2020.



Simulación de la estructura a gran escala del Universo mostrando filamentos de densidad en azul y lugares de formación galáctica en amarillo. Crédito: Dr. Zarija Lukic.

Cosmología

Índice

1. INTRODUCCIÓN p. 6

2. OBJETIVOS CIENTÍFICOS PARA LA DÉCADA p. 6

- 2.1. Fondo cósmico de microondas p. 6
- 2.2. Cartografiados de galaxias p. 7
- 2.3. Astronomía de 21 centímetros p. 9
- 2.4. Primera luz p. 10
- 2.5. Detección de materia oscura p. 11
- 2.6. Simulaciones cosmológicas p. 12

3. ESTADO ACTUAL p. 14

- 3.1. Fondo cósmico de microondas p. 14
- 3.2. Cartografiados de galaxias p. 15
- 3.3. Astronomía de 21 centímetros p. 17
- 3.4. Primera luz p. 19
- 3.5. Detección de materia oscura p. 20
- 3.6. Simulaciones cosmológicas p. 21

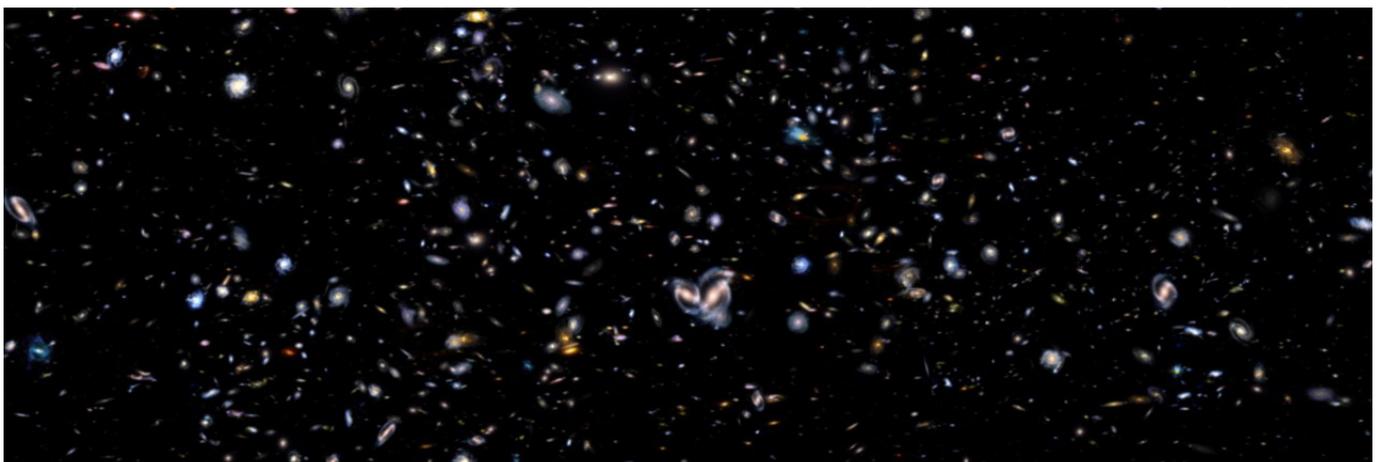
4. NECESIDADES INSTRUMENTALES p. 26

- 4.1. Fondo cósmico de microondas p. 26
- 4.2. Cartografiados de galaxias p. 28
- 4.3. Astronomía de 21 centímetros p. 29
- 4.4. Primera luz p. 30
- 4.5. Detección de materia oscura p. 30
- 4.6. Simulaciones cosmológicas p. 31

5. PROYECTOS CONSOLIDADOS Y ACCIONES ESTRATÉGICAS PARA EL FUTURO p. 32

- 5.1. Fondo cósmico de microondas p. 32
- 5.2. Cartografiados de galaxias p. 34
- 5.3. Astronomía de 21 centímetros p. 35
- 5.4. Primera luz p. 36
- 5.5. Detección de materia oscura p. 36
- 5.6. Simulaciones cosmológicas p. 37

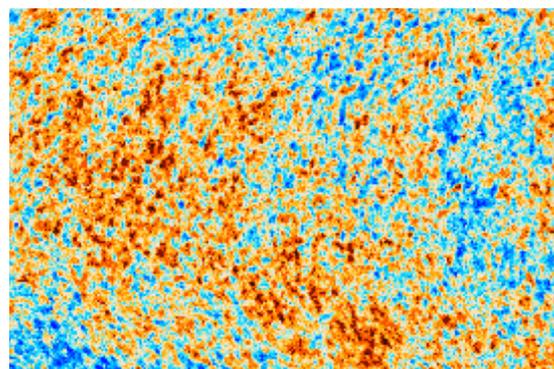
6. ACTUALIZACIÓN EN 2020 DE ESTA SECCIÓN p. 38



1. Introducción

Este informe sobre cosmología para la próxima década se divide en cuatro apartados: objetivos científicos, estado actual, necesidades instrumentales y proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro. La cosmología se ha dividido en seis áreas temáticas principales que motivan la instrumentación a

desarrollar en la próxima década: Fondo Cósmico de Microondas, cartografiados de galaxias, astronomía de 21 centímetros, primera luz, detección de materia oscura y simulaciones cosmológicas. Especial énfasis se ha puesto en los aspectos relacionados con infraestructuras/instrumentación necesaria en cada una de las áreas.



2. Objetivos científicos para la década

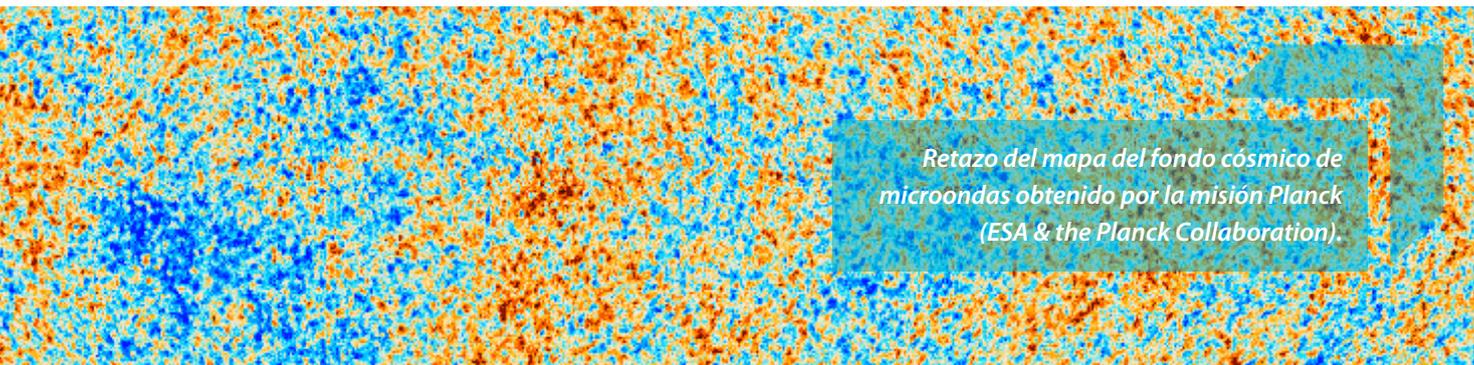
2.1. Fondo cósmico de microondas

Es mundialmente reconocido el papel que juega la radiación del Fondo Cósmico de Microondas (CMB de sus siglas en inglés) en el establecimiento de las propiedades físicas del modelo estándar en cosmología. Este fondo de radiación se observa en el rango de las microondas (entre 1–1000 GHz) y se emitió en el momento del desacoplo a un *redshift* de $z \approx 1000$. Contiene las huellas dejadas por diferentes procesos físicos que tuvieron lugar durante el proceso inflacionario del universo (cuando éste tenía unos 10^{-35} s), el desacoplo (380000 años), la época de reionización (400 millones de años) y posteriormente durante tiempos cercanos al actual ($z < 2$) en los que tiene lugar la formación de la estructura a gran escala del

universo. Estas huellas pueden estudiarse a través de los siguientes observables: anisotropías en la temperatura y la polarización del CMB y su distribución espectral de energías.

Mientras que se dispone de medidas muy precisas del espectro de las anisotropías en temperatura del CMB a escalas angulares por encima de minutos de arco, sin embargo las medidas en polarización no han alcanzado todavía una sensibilidad comparable debido principalmente a que es una señal más débil. En particular, el modo B de polarización –que junto con el modo E forman los dos modos invariantes en los que se pueden descomponer los parámetros de Stokes Q y U correspondientes

a la polarización lineal que se espera del desacoplo– contiene la huella dejada por las Ondas Gravitacionales Primordiales (PGW de sus siglas en inglés) en escalas por encima del grado, fondo que se asocia al periodo inflacionario del universo y cuya amplitud es un reflejo directo de la energía a la que tuvo lugar la inflación. La detección directa de las PGW mediante los experimentos actuales desde tierra como LIGO o misiones espaciales como LISA (que ESA espera lanzar en 2033) no se espera poder conseguir en las próximas décadas ya que no alcanzan la sensibilidad necesaria para su detección. Es por ello que la detección de este modo B de polarización supone uno de los retos más importantes de la cosmología en la próxima década.



Por otro lado, existen una serie de mecanismos físicos, tales como los asociados a la aniquilación de materia oscura, la eliminación de fluctuaciones primordiales mediante difusión de fotones (*Silk damping*) o la reionización, que involucran la liberación de grandes cantidades de energía en el universo y que pudieron producir diferentes distorsiones en el espectro de cuerpo negro

del CMB en diferentes épocas. Aunque algunos intentos de observar dichas distorsiones han sido realizados desde globos estratosféricos (como el experimento ARCADE), la limitación que supone la atmósfera hace necesario el uso de satélites artificiales. No es de extrañar que los mejores límites a las distorsiones sean todavía los impuestos por el experimento COBE-FIRAS de

la NASA de hace dos décadas. Se espera que en las próximas décadas sea posible mejorar dichos límites mediante los satélites que se están proponiendo actualmente.

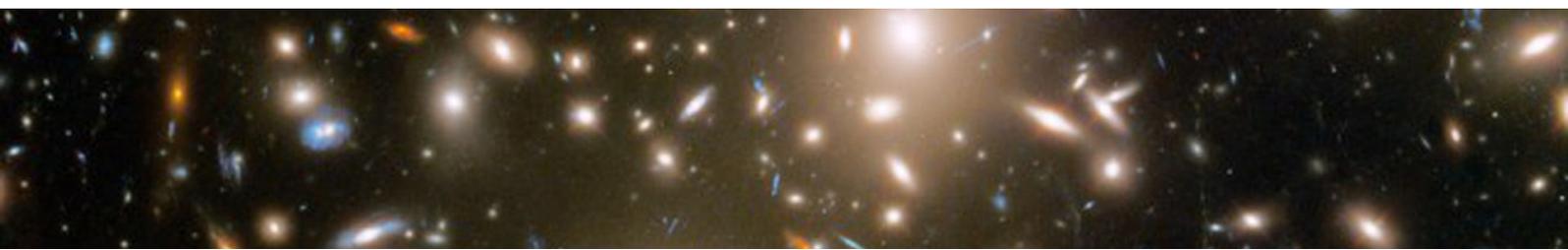
2.2. Cartografiado de galaxias

Muchas de las cuestiones cosmológicas más interesantes requieren muestrear la distribución de galaxias en grandes volúmenes y a través de extensos tiempos cosmológicos, hasta redshifts $z \approx 2$. Los cartografiados o "*surveys*" de galaxias de gran campo han experimentando un enorme impulso en los últimos años, gracias tanto al alto interés científico que presentan

como al progreso tecnológico e instrumental que ha facilitado su desarrollo e implementación.

Los objetivos de los cartografiados extragalácticos son a menudo extremadamente amplios, dada la gran versatilidad que ofrecen los datos obtenidos por los mismos, pero su objetivo central suele ser el estudio de la energía oscura. Los car-

tografiados son esenciales para una comprensión exhaustiva de su naturaleza física, al permitir combinar diferentes tests, por ejemplo la información geométrica con la evolución del factor de crecimiento para dilucidar cual de las hipótesis que explican este fenómeno es más correcta. Los principales enfoques observacionales para el estudio de la energía oscura son:



- La detección de SNIa, y la medición de su *redshift* y de curvas de brillo.
- El efecto lente gravitatoria, tanto de campo (cizallamiento cósmico), como el observado alrededor de galaxias, grupos y cúmulos.
- La caracterización del espectro de potencias $P(k)$, incluyendo la medición precisa de la escala de las Oscilaciones Acústicas Bariónicas.
- La medición de la función de masa de cúmulos de galaxias y la caracterización de su evolución.

El principal requerimiento observacional es la capacidad de cubrir grandes volúmenes cósmicos, con una frecuencia de muestreo espacial suficientemente alta, obteniendo además información sobre la distribución espectral de las galaxias para medir, o cuando menos estimar, su *redshift* con la precisión adecuada. Para ello necesitan cubrir áreas extensas, de miles de grados cuadrados,

con imagen multicolor o con espectroscopía. La mayor parte de estos proyectos toman sus observaciones en la parte óptica del espectro, por cuestiones de eficiencia observacional, y por tanto no van más allá de $z = 1.7$, para los experimentos basados en tierra, de $z = 2$, para los satélites como Euclid. Aunque utilizando otros trazadores, como el bosque de Lyman alpha, se pueden alcanzar *redshifts* más altos, $z \approx 3$.

Los proyectos que utilizan el efecto lente gravitatoria precisan además, de imágenes ópticas de gran calidad, con una PSF compacta ($<1''$) y lo más estable posible tanto espacial como temporalmente. Por último, los cartografiados que buscan SNIa, requieren llevar a cabo sus observaciones con una secuencia temporal adecuada, normalmente de varias semanas con una cadencia de varios días, para la detección óptima y seguimiento de la curva de brillo de este tipo de objetos.

Además de la energía oscura, los cartografiados también permiten abordar de manera sistemática el estudio de la distribución de la materia oscura, y su relación con la distribución de materia luminosa, fijando cotas muy estrictas sobre sus propiedades y naturaleza física. Es de resaltar que a diferencia de otros "experimentos" cosmológicos, el valor científico de los cartografiados es extremadamente amplio, ya que no sólo cubren prácticamente todas las cuestiones relevantes de la Cosmología Observacional, sino que además la utilidad de sus datos se extiende a múltiples campos de la Astrofísica, como bien mostró el pionero de estos proyectos, el *Sloan Digital Sky Survey*. En particular, datos así son esenciales para entender la formación y evolución de las galaxias en un contexto cosmológico, mediante la caracterización y estudio de la evolución de las funciones de luminosidad y masa estelar.



Imagen profunda del HST del Cúmulo de Abel 370, mostrando numerosas galaxias y lentes gravitatorias; extracto de esta imagen en página anterior (NASA, ESA / J. Lotz and the HFF Team / STScI)



2.3. Astronomía de 21 cm

La astronomía de 21 centímetros, tradicionalmente asociada al estudio de las nubes frías de hidrógeno neutro en nuestra Galaxia y en otros sistemas vecinos por cuestiones de sensibilidad instrumental, se está convirtiendo en una de las herramientas más poderosas para la astrofísica extragaláctica y la Cosmología actual. Recordemos que prácticamente un 75% de toda la materia bariónica del Universo está formada por hidrógeno, que durante gran parte de la historia cósmica no ha emitido luz visible alguna. La astronomía de 21 centímetros está abriendo las puertas a la observación de objetos y épocas oscuras previamente invisibles para nosotros.

La línea de 21 centímetros del hidrógeno neutro está originada por un desdoblamiento en la estructura hiperfina del estado 1S del hidrógeno neutro debido a la interacción entre los momentos magnéticos del protón y el electrón. Dicho desdoblamiento corresponde a una diferencia de energía de $\Delta E = 5.9 \times 10^{-6}$ eV, correspondiente a una longitud de onda en reposo de 21 centímetros. Esta longitud de onda característica, conocida con

gran precisión, posibilita, mediante la ecuación del corrimiento al rojo cosmológico, obtener información tridimensional tomográfica de la distribución de hidrógeno neutro a distancias cosmológicas. El estudio de las fluctuaciones de intensidad de brillo de la línea de 21 centímetros entre $z \approx 2-30$ posibilitará, a lo largo de la próxima década, responder cuestiones fundamentales de la cosmología tales como a) cómo se formaron y evolucionaron las primeras galaxias, b) cuál es la historia detallada de la (re)ionización del medio intergaláctico, c) cómo evolucionó la estructura a gran escala a lo largo de las “*edades oscuras*” comprendidas entre la creación del Fondo Cósmico de Microondas y la época de la reionización (hasta $z \approx 10$), d) cuál fue la evolución térmica del medio intergaláctico durante esas épocas y f) cuáles fueron las propiedades de la primera población de estrellas (estrellas de tipo III), entre muchas otras preguntas. Además, la astronomía de 21 centímetros nos llevará a la obtención de los catálogos más completos y profundos de galaxias entre $z \sim 2-10$ y a una mejor caracterización de cómo la época de la reionización afectó a la distribución de

fotones del Fondo Cósmico de Microondas en escalas angulares muy pequeñas, lo que a su vez mejorará nuestra capacidad para medir las huellas del efecto de lente gravitacional y de las ondas gravitatorias primordiales en dicha radiación.

La detección de estas débiles fluctuaciones de brillo en la línea de 21 centímetros supone un desafío técnico de primera magnitud que está impulsando el desarrollo de tecnologías punta en radio detectores, amplificadores de bajo ruido, correladores digitales para sistemas interferométricos de millares de elementos, procesamiento y almacenamiento masivo de datos, comunicaciones a larga distancia, calibración ionosférica, software de análisis de datos, supercomputación, sistemas de alimentación y eficiencia energética y sistemas criogénicos, amén de un paso adelante en nuestra experiencia en el diseño, gestión y planificación de infraestructuras científicas de gran tamaño. Es por todo esto que la astronomía de 21 centímetros es considerada como una de las prioridades científico-tecnológicas durante las próximas dos décadas.

2.4. Primera luz

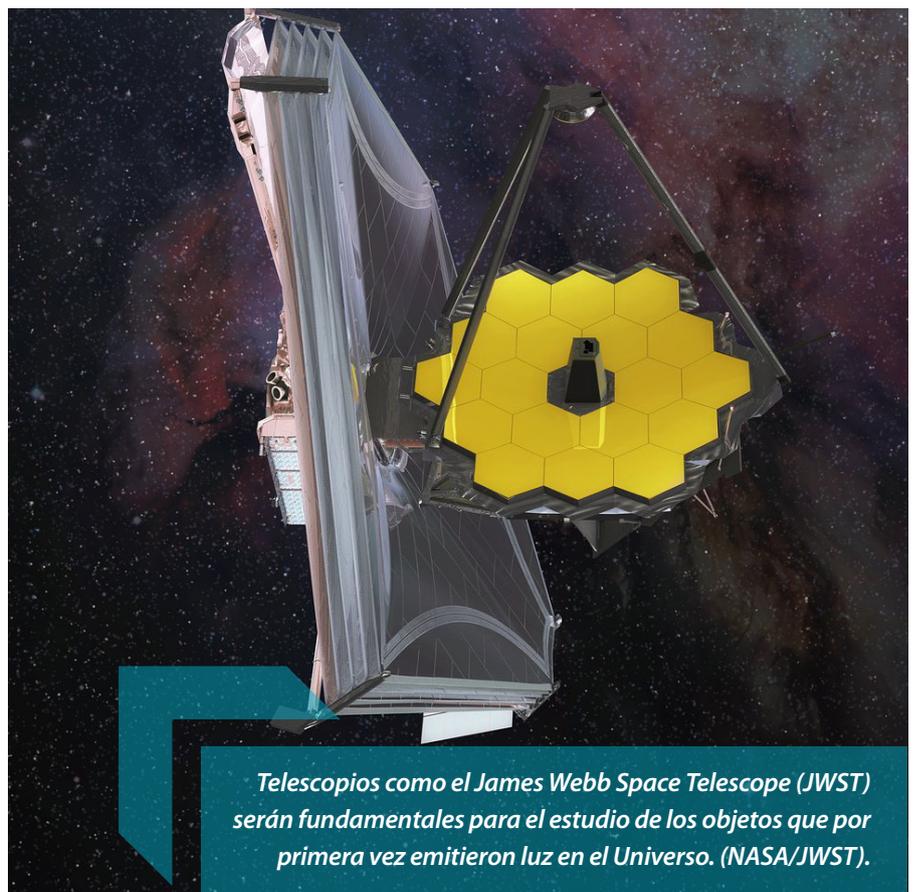


Uno de los objetivos centrales que guían el desarrollo de la futura instrumentación (JWST, E-ELT) es el estudio de la física de los objetos que por primera vez emitieron luz en el Universo ($z \approx 5-11$). Con la instrumentación actual hemos sido capaces de extender los límites de nuestras observaciones atrás en el tiempo hasta un 90% de la edad del Universo y hemos desarrollado una teoría razonable sobre la formación y evolución de las galaxias. Sin embargo, hay varias preguntas fundamentales (en particular sobre la Física de la formación y evolución de la componente bariónica de gas y

estrellas) que aún permanecen sin respuesta: ¿Cuál es la naturaleza de los primeros emisores de luz? ¿Cuál es su relación con la estructura celular de la materia a alto z y con los predecesores de los agujeros negros supermasivos a estos redshifts? ¿Cómo se originaron los elementos pesados, el polvo y las primeras estrellas? ¿Qué relación existe entre formación estelar y de agujeros negros a altos redshifts? ¿Qué causó la re-ionización (o re-ionizaciones) del Universo? ¿Cuándo y cómo se empezaron a ensamblar las galaxias? ¿Qué marcas observables han dejado todos estos procesos?

El objetivo científico fundamental sería detectar las primeras estrellas (en particular supernovas), agujeros negros (en particular vía GRBs) y protogalaxias para establecer la naturaleza de los objetos que re-ionizaron el universo y las "semillas" que generaron las galaxias, y elucidar las mutuas conexiones. También es muy importante establecer la interrelación entre la abundancia de metales en el medio intergaláctico y la formación estelar. Las primeras estrellas y galaxias son fuertes emisores de fotones Lyman-alpha que se detectan en las bandas infrarrojas.

Las primeras galaxias podrían detectarse en la línea de Lyman-alpha usando micro- o nano-satélites con pequeños telescopios a bordo (la determinación de su redshift se haría mediante modelos auto-consistentes de formación de las primeras fuentes). Uno de los objetivos del JWST es también la detección pionera de estos emisores a muy alto z , pero para



hacer el estudio espectroscópico detallado será necesario esperar al E-ELT. El estudio de los GRBs a alto z recibirá un nuevo impulso

con ALMA. Infrarrojo y radio serán, por tanto, los principales rangos de frecuencia para la observación de la "primera luz".



Una colisión de cúmulos en el objeto MACS J0025 ha separado la materia oscura (rojo) de la bariónica (azul). (NASA/ESA/CXC).

2.5. Detección de materia oscura

La comunidad científica mundial considera que el descubrimiento de la naturaleza de la materia oscura es uno de los objetivos prioritarios de la ciencia moderna, no sólo de la cosmología y la astronomía. El descubrimiento de un nuevo constituyente de la materia daría lugar a una auténtica revolución en nuestro conocimiento del Universo. En estos momentos, varias observaciones cosmológicas independientes –las anisotropías del fondo de radiación (CMB) y la formación de estructura a gran escala (LSS)– sugieren que la fracción de materia oscura alcanza el 85% de toda la materia del Universo y

alrededor del 30% de toda la densidad de energía del Universo.

Los objetivos científicos asociados a la materia oscura incluyen su detección directa en experimentos de partículas en laboratorios subterráneos – tanto de producción en aceleradores de partículas como el LHC, como de detección en cristales ultrapuros o en grandes tanques de líquidos–, o bien su detección indirecta por aniquilación o desintegración en partículas observables por detectores en tierra, como los grandes telescopios de rayos gamma y de neutrinos, o en el

espacio, en satélites especialmente diseñados para ello.

En la próxima década se espera alcanzar hasta una tonelada en detectores de cristales ultrapuros, tanto en Europa (EURECA) como USA (SuperCDMS), así como en detectores líquidos (ArDM, XENON, COUPP). Esto abriría las puertas a la detección directa de materia oscura con secciones eficaces varios órdenes de magnitud menor de lo que se alcanza hoy en día. También se espera la construcción de telescopios de radiación Cherenkov un orden de magnitud más potentes que los actuales (CTA).

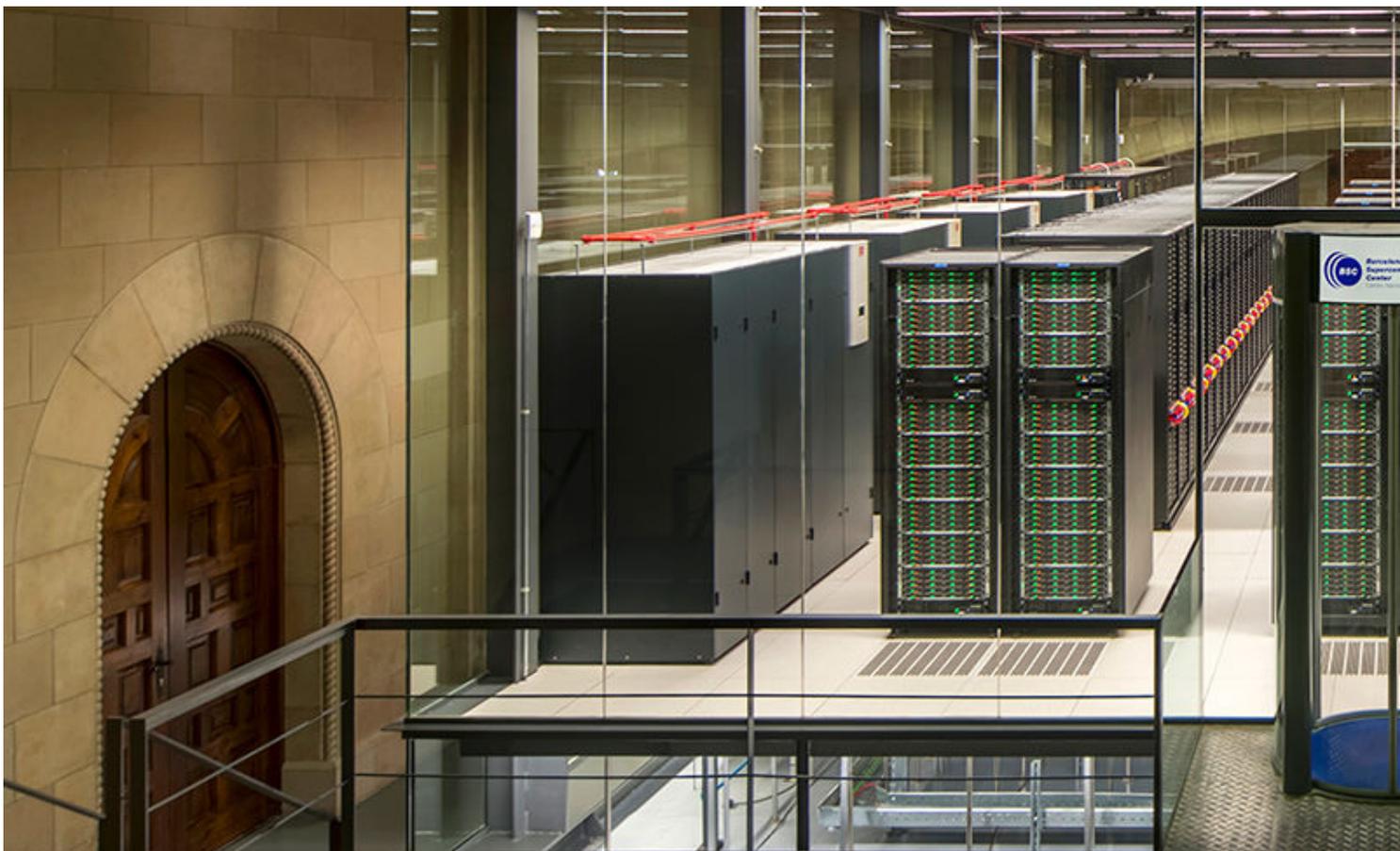
2.6. Simulaciones cosmológicas

Se está dedicando un enorme esfuerzo a la elaboración de *surveys* cosmológicos, y, a nivel mundial, se va a dedicar a la astronomía de 21 cm, ver la sección correspondiente (2.3). Sus objetivos científicos fundamentales giran en torno a la profundización de la comprensión del paradigma cosmológico, incluida la formación de estructura a gran escala, y a la determinación precisa del valor de los parámetros cosmológicos. Pero es imprescindible disponer de predicciones teóricas para comparar con los resultados de las observaciones, y, además, para servir de punto de partida para el diseño de nuevos programas observacionales en estos campos en particular.

Como en otros campos de la Astrofísica y Cosmología, la única forma posible de realizar estas predicciones es mediante simulaciones numéricas. De hecho, la ESFRI (*Research Infrastructures - Research - European Commission*), basándose en un informe de la European Technology Platform for High Performance Computing (HPC Europe), identifica la Astrofísica y Cosmología como uno de los campos en los que la supercomputación ha jugado (y jugará) un papel fundamental. Y, entre las 6 sub-áreas de Grand Challenge en HPC están precisamente la "Cosmología y la Formación de Estructura a Gran Escala", y la "Formación y Evolución de Galaxias".

Estas simulaciones idealmente han de cumplir las siguientes condiciones, en las que subyace una física así como metodologías de modelización diferentes:

- Han de representar una muestra fiable de los procesos cósmicos a nivel estadístico. Esto significa simulaciones numéricas en cajas del orden de 10-100 Gpc cúbicos idealmente.
- Su resolución espacial ha de permitir contrastar la información contenida en los *surveys* (color, morfología, estructura y dinámica de galaxias, grupos y cúmulos): cientos de parsecs como poco.

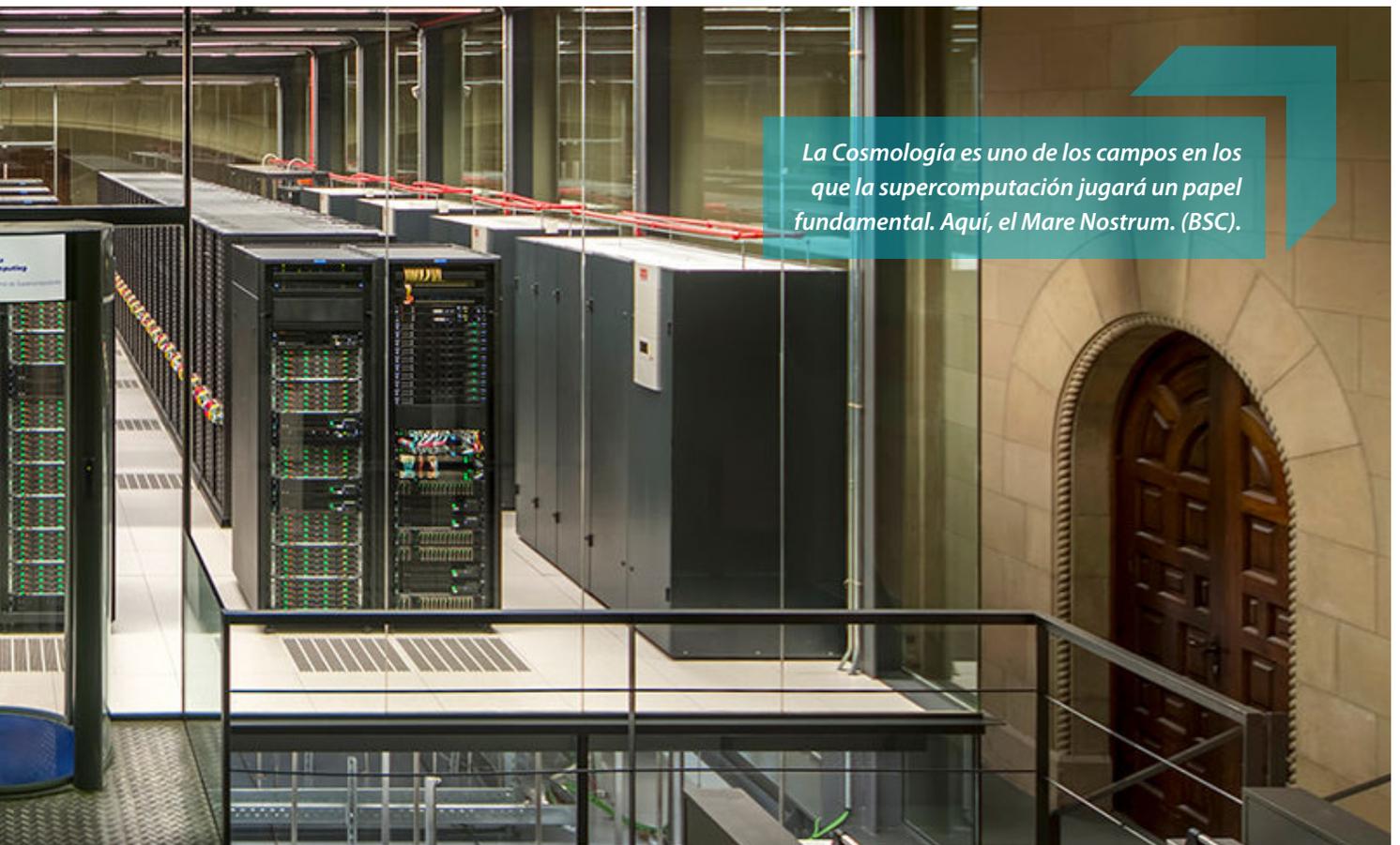


c) Dado que en los *surveys* el mensajero de la información es la radiación electromagnética, emitida por estrellas y gas, las simulaciones han de incluir necesariamente: i), hidrodinámica (tratamiento fluido del gas, además del acolisional de la materia oscura), lo que demanda prestaciones computacionales mucho más altas y algoritmos de resolución mucho más complejos que los disponibles hoy en día; ii), ciclos de vida de las estrellas (y de la regulación de su formación y destrucción), de la evolución química de las galaxias y del gas intergaláctico, de los agujeros negros supermasivos y del polvo cósmico; iii), el transfer radiativo

correspondiente; y, iv), efectos de los campos magnéticos.

d) Es necesario disponer de técnicas de postprocesado para el análisis de las simulaciones y la medida eficaz en ellas de los estadísticos que proporcionan los *surveys*. Esto supone disponer de software para: i), identificadores de estructuras (estructura celular: paredes, filamentos y vacíos) y de objetos colapsados en las macro-simulaciones, y, ii), "*software telescopes*": algoritmos capaces de traducir los outputs numéricos de las simulaciones en los observables que captan los telescopios: SEDs (distribuciones espectrales de energía), imágenes, etc.

Resumiendo, la meta (hoy lejos de ser alcanzada a nivel mundial) en cuanto a simulaciones cosmológicas es: Volúmenes del orden de 10-100 Gpc cúbicos, con resolución espacial del orden de cientos de pársecs, que incluyan la física de bariones, estrellas y agujeros negros, así como sus mutuas relaciones. Es necesario también disponer de algoritmos capaces de traducir los resultados de las simulaciones a observables astronómicos, directamente comparables con los datos. Lo cual requiere estudiar la formación de galaxias en un marco cosmológico, incluyendo sus fases tempranas (estructura celular y primeros emisores de luz).



La Cosmología es uno de los campos en los que la supercomputación jugará un papel fundamental. Aquí, el Mare Nostrum. (BSC).

3. Estado actual

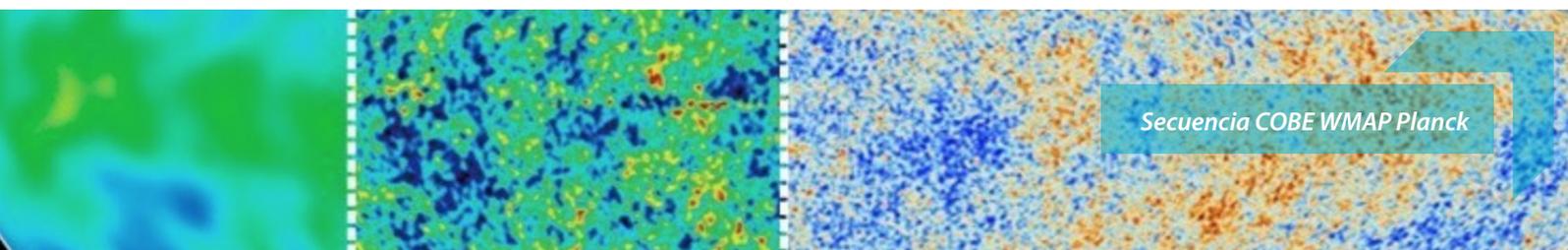
3.1. Fondo cósmico de microondas

En las últimas décadas el estudio del CMB ha jugado, y actualmente sigue jugando, un papel destacado en el establecimiento del modelo cosmológico estándar. Una prueba evidente de ello son los resultados obtenidos por el satélite WMAP de la NASA (<http://map.gsfc.nasa.gov>) y más recientemente Planck de la ESA (<http://sci.esa.int/planck>) que confirman el modelo Λ CDM con sólo seis parámetros libres, lo que supone la determinación más precisa hasta la fecha del modelo cosmológico estándar (por otro lado, dichos resultados también han desvelado algunas anomalías). Mientras que Planck ha medido el espectro de potencias angular del CMB con precisión por debajo de la varianza cósmica hasta multipolos cercanos a $l \sim 2000$ (extrayendo toda la información potencial asociada a las anisotropías primarias que se producen en el desacople), otros experimentos desde tierra, como ACT y SPT, han logrado medirlo hasta multipolos más altos, lo que supone una información relevante para el estudio de las anisotropías secundarias (como el efecto SZ debido a los cúmulos de galaxias). Planck también ha medido con precisión el efecto lente gravitatoria sufrido

por los fotones de microondas, lo que ha permitido la determinación del espectro de potencias del potencial gravitatorio con una alta significación ($>25\sigma$). La combinación de las medidas del potencial del efecto lente con las anisotropías del CMB ha permitido una mejora sustancial en la determinación de algunos parámetros cosmológicos. Los grupos españoles del IFCA (CSIC-UC), IAC y del Dpto. de Física Teórica y del Cosmos de la UGR han contribuido significativamente tanto al desarrollo de los instrumentos como a la explotación científica de Planck, coordinando varios de los trabajos publicados.

La situación en relación a la polarización del CMB es diferente. Aunque Planck también ha conseguido la mejor medida de la polarización hasta la fecha (los resultados se harán públicos en 2014) sin embargo no fue optimizado para ello por lo que todavía hay espacio para mejorar las medidas. Planck ha puesto los mejores límites en la amplitud de las PGW basados en el espectro de temperatura, $r < 0.11$ (al 95% de significación). Además, con los datos de polarización se espera alcanzar un límite similar (un factor 2 más bajo en

el mejor de los casos). El mejor límite hasta la fecha obtenido con polarización es $r < 0.7$ y fue impuesto por BICEP. Actualmente se están desarrollando varios experimentos de polarización desde tierra con el objetivo principal de detectar el modo B: BICEP, PolarBear, ACTPol, SPTPol, y QUBIC liderados por grupos de EEUU (los 4 primeros) y el último por grupos europeos, y que están basados en bolómetros (ver descripción en sección 4); y los experimentos QUIET-II y QUIJOTE (Q, U, I JOint Tenerife, operado desde el Observatorio del Teide, <http://www.iac.es/proyecto/cmb/pages/en/quijote-cmb-experiment.php>) liderados por grupos de EEUU y españoles (IAC e IFCA), respectivamente, y basados en detectores MMIC HEMT. Desde globo estratosférico, los experimentos EBEX y SPIDER están liderados por grupos de EEUU y LSPE por grupos italianos. Desde el espacio se han propuesto las siguientes misiones para medir el modo B de polarización: CMBpol y PIXIE a la NASA, LiteBird a la JAXA, CORe (tipo M) a la ESA, y en este momento se está proponiendo una misión tipo L, PRISM (<http://www.prism-mission.org>), más ambiciosa y con unos objetivos más amplios, también a la ESA.

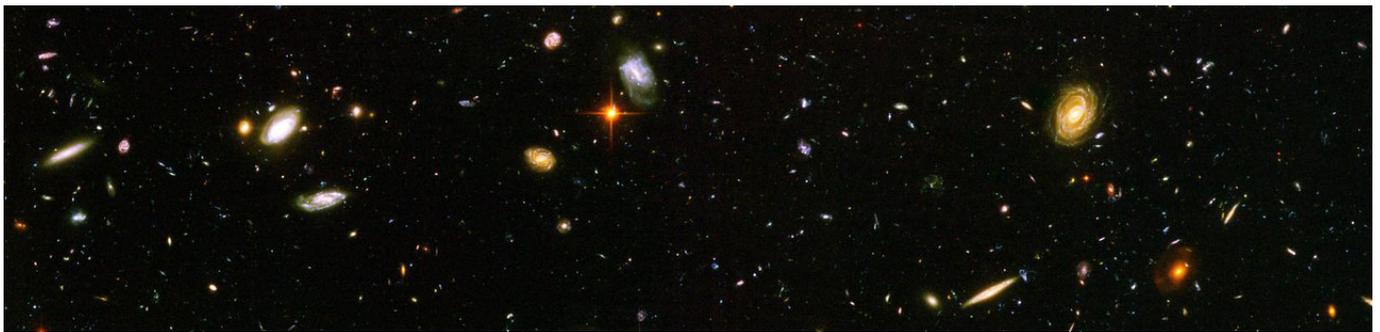


3.2. Cartografiado de galaxias

En la última década, el *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) y el *Two-Degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS) han mapeado el universo local, hasta $z = 0.15$ aproximadamente y han permitido un avance en nuestro entendimiento de la cosmología. Desde entonces, otros surveys han muestreado *redshifts* más altos,

pero no de manera exhaustiva y abarcando un área pequeña. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, WiggleZ, VIPERS. BOSS es el primer cartografiado que representa un salto significativo, al cubrir 10,000 grados cuadrados, un área comparable con la del SDSS, pero hasta $z=0.7$ aproximadamente. Dado el gran interés suscitado por la

energía oscura y la cosmología en general, recientemente varios comités han abordado la manera más eficiente de proceder a su estudio observacionalmente. En particular, el Dark Energy Task Force (<http://www.nsf.gov/mps/ast/detf.jsp>) recopiló los métodos más prometedores entre los que se incluyen el agrupamiento de las



galaxias, las lentes gravitacionales, los cúmulos de galaxias y las supernovas. También definió una figura de mérito para valorar los surveys observacionales y una gradación de éstos (Stage I, II, III y

IV) en función del incremento en esta figura de mérito que se espera que alcancen. Los surveys extragalácticos se diferencian en la técnica observacional utilizada para determinar la distancia a las galaxias

y pueden ser fotométricos o espectroscópicos. A continuación enumeramos los surveys de gran campo (>5000 grados cuadrados) en desarrollo o que se van a llevar a cabo en los próximos años.

Survey (Hemisferio)	Area	z	Inicio	Fin	Tipo	$dz/(1+z)$	N gal.	DETF
BOSS (N)	10,000	$z < 0.7$	2009	2014	Espec.	0.001	1.5M	III
DES (S)	5,000	$z < 1.5$	2013	2017	Fotom.	0.05	300M	III
eBOSS (N)	10,000	$z < 3$	2014		Espec	0.001	2M	III
J-PAS (N)	8,500	$z < 1.5$	2015	2021	Fotom.	0.003	100M	IV
WEAVE (N)	10,000	$z < 1.3$	2017		Espec.	0.001	10M	IV
DESI (S)	10,500	$z < 1.6$	2019		Espec.	0.001	10M	IV
LSST (N)	20,000		2020		Fotom	0.03	10000M	IV
Euclid (N/S)	15,000	$z < 2.0$	2020		Fot/Espec	0.001	50M	IV

Además, existen otros surveys de menor campo, en distintos estadios de desarrollo, que se esperan obtengan resultados significativos.

Survey (Hemisferio)	Area	z	Inicio	Fin	Tipo	dz/(1+z)	N _{gal}	DETF
ALHAMBRA (N)	4	z<1.5	2005	2012	Fotom	0.013	0.6M	
PAU (N)	200	z<1.5	2015	2018	Fotom.	0.003	3M	III
J-PAS-Pathfinder (N)	200	z<1.5	2015	2016	Fotom.	0.003	2M	
KIDS/Viking (S)	1500	z<1.5	2012		Fotom.	0.03		
SuMIRe/HSC-PFS (N)	1500	z<1.7	2013-2017		Fot/Espec	0.001	2M	

La comunidad española tiene una notable presencia en muchos de estos proyectos. Grupos del IAA y de la UV han sido y son líderes en el desarrollo de las técnicas para la medición de *redshifts* fotométricos en las que se basan buena parte de los cartografiados mencionados en las tablas. Es de resaltar el cartografiado ALHAMBRA (<http://alhambra.iaa.es>), desarrollado desde el Observatorio de Calar Alto, y que recientemente ha hecho públicos sus datos para la comunidad española. Este *survey* ha sido un campo de pruebas fundamental para planear J-PAS (<http://j-pas.org>), que no sólo es un proyecto propuesto y liderado desde el CEFCA y el IAA que se va llevar a cabo desde nuestro país, sino que es el primer proyecto internacional que tiene previsto alcanzar el Stage IV en la medición de la energía oscura. Dentro de un contexto más internacional, también cuentan con una amplia y destacada representación española los proyectos DES, DESI y Euclid. El proyecto DES es el proyecto fotométrico más ambicioso funcionando en la actualidad para el estudio de la energía oscura. En él se combinan las cuatro técnicas para su estudio, siguiendo las pautas del DETF. Grupos de Barcelona (IFAE

e ICE) y Madrid (CIEMAT y UAM) contribuyen a este proyecto, en todos sus aspectos: instrumentación, dirección y ciencia. También tiene participación española el proyecto DESI, que llevará a cabo un *survey* espectroscópico masivo para el estudio de la estructura a gran escala del universo.

La gran apuesta europea en cartografiados extragalácticos es el proyecto Euclid, una misión de la Agencia Espacial Europea, para el estudio de la materia y energía oscura, que combina técnicas de imagen y de espectroscopía sin rendija. Euclid mapeará el volumen del universo más grande hasta la fecha, hasta $z=2$, y proporcionará la ligaduras más restrictivas a los modelos cosmológicos. España participa activamente en Euclid desde sus inicios en todos sus aspectos con participaciones de grupos de Barcelona, Madrid, Canarias y Cartagena. El proyecto PAU se lidera y será ejecutado desde España. PAU está aportando nuevas ideas en cómo combinar diferentes métodos observacionales. Como su propio nombre indica J-PAS-Pathfinder es un precursor de J-PAS y también se lidera y llevará a cabo desde España. En el infrarrojo cercano, una de las mejores combinaciones disponibles para llevar a cabo imagen de campo amplio

en estas longitudes de onda en el Hemisferio Norte será PANIC en el 2.2m de Calar Alto.

Desde el punto de vista instrumental, los grupos españoles han mostrado un gran avance en los últimos años. Ahora hay capacidad para poder producir instrumentación astronómica de primer nivel. En España se ha diseñado y se ha construido en su integridad la cámara de PAU, con soluciones tecnológicas innovadoras. También hay aportaciones importantes a otras cámaras como JPCam, DECam, DESI y WEAVE. Nuestra contribución también es destacable en Euclid, donde somos responsables de la rueda de filtros y de la unidad de control del instrumento infrarrojo, NISP. Además, se participa activamente en el segmento científico de tierra, responsable de analizar todos los datos de la misión; y se tiene un Centro de Datos Científico ubicado en el Port d'Informació Científica (PIC) en Barcelona. Algunos grupos españoles también participan en el desarrollo de la instrumentación de DESI, continuando el trabajo realizado en sus proyectos precursores, BigBOSS y DESpec.



Recreación artística de un conjunto de las antenas de SKA durante la noche (Colaboración SKA).

3.3. Astronomía de 21 cm

El objetivo prioritario de la comunidad internacional para finales de esta década y principios de la que viene es la construcción y puesta en marcha del Square Kilometre Array (SKA, <http://www.skatelescope.org>), que verá la luz en torno a 2020 en localizaciones aún por determinar de Australia y Sudáfrica. El SKA será un ambicioso interferómetro de más de tres mil antenas, con líneas de base comprendidas entre los pocos metros y 3000 kilómetros, capaz de observar el cielo entre frecuencias de 70 MHz y 25 GHz con una resolución angular máxima del orden de una décima de segundo de arco y con una sensibilidad varios órdenes de magnitud mejor que cualquier otro instrumento del estilo construido hasta ahora. Aparte de la enorme repercusión que SKA tendrá en el campo de la cosmología, la gran versatilidad de su diseño le convertirán en un referente experimental en áreas

más generales de la astrofísica, la física fundamental y la astrobiología. SKA es un consorcio internacional en el que intervienen instituciones y empresas de diez países entre los que, es necesario decirlo, *España no está por el momento incluida*. Sin embargo, nuestro país tiene buenas perspectivas de entrar a formar parte de la colaboración si se dan los pasos adecuados. La UE ha manifestado su interés conjunto en el proyecto a través del programa PrepSKA (<http://www.prepska.org/KeyScienceIssuesOfTheSKA.html>) dentro del Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea, y en España el proyecto VIA-SKA (<http://www.via-ska.es/ska>) y la red española del SKA están estudiando activamente la futura participación de nuestra industria e instituciones científicas en el proyecto. En mayo de 2010 tuvo lugar la Reunión Abierta de la RIA donde la comunidad científica española expresó un claro

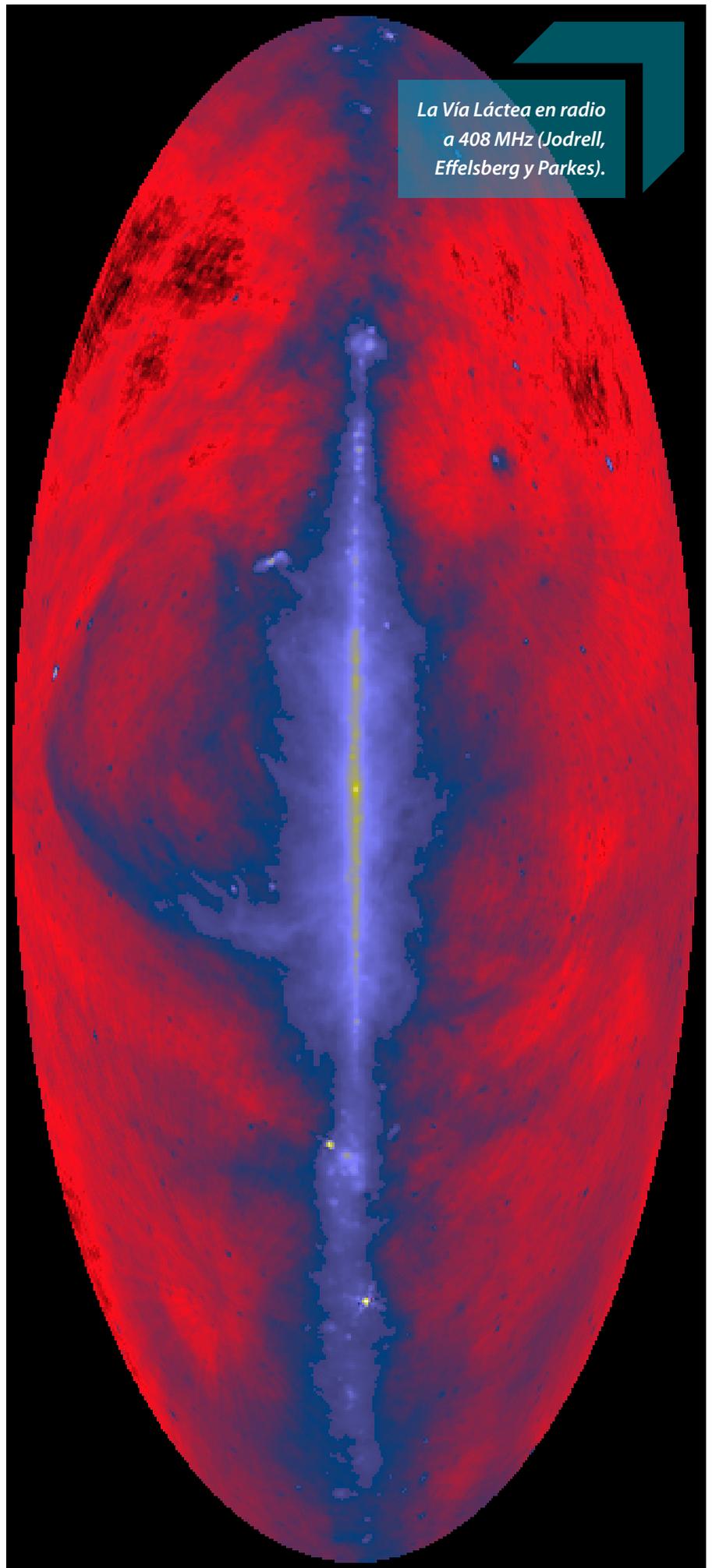
interés en el proyecto SKA. Esto originó que el antiguo MICINN solicitara el status de Observador en el *SKA Founding Board*, el cual fue aceptado por el *SKA Board*, aunque no llegó a tener efecto por el cambio de entidad legal a la actual *SKA Organisation*, en la que no existe la figura de Observador.

VIA-SKA incluye la participación de catorce instituciones públicas españolas y más de una treintena de empresas (<http://www.via-ska.es/ska/servlets/members?PRILIST>) cuya experiencia y capacidad productiva les coloca en una posición competitiva a la hora de participar en convocatorias abiertas para la elaboración de componentes, sistemas e infraestructuras para SKA. La lista de *potenciales* contribuciones importantes españolas a SKA incluye sistemas de alimentación de alta eficiencia energética para los elementos de SKA, optomecánica, ingeniería civil, mecánica de

sistemas e informática, electrónica (detectores, amplificadores de bajo ruido, procesamiento de señales digitales, etc), criogenia, supercomputación y procesamiento de señales estadístico. En la parte científica, las instituciones que han manifestado su interés aportan grupos con experiencia en análisis y separación de componentes astrofísicas, cosmología teórica y observacional, astrofísica y cosmología con grandes cartografiados de galaxias y gestión de grandes proyectos científicos.

Como demostración de las oportunidades científico-tecnológicas que ofrece SKA, y comprendiendo la situación difícil en que se encuentra España, los grupos y empresas españoles aportan medios propios con la intención de no perder esta oportunidad estratégica.

Paralelamente a esta iniciativa, en diversos lugares del mundo están poniéndose en marcha distintos experimentos que están sirviendo como precursores, tanto científica como tecnológicamente, del SKA. Varios países europeos se encuentran embarcados en el *Low Frequency Array* (LOFAR), que opera entre los 10 y 250 MHz, mientras que en Australia y Sudáfrica se están instalando los precursores directos de SKA: ASKAP y MeerKAT, respectivamente. Ambos experimentos empezarán a obtener sus primeros datos entre este año y 2015. *España no se encuentra formalmente* entre los colaboradores internacionales oficiales de ninguno de estos precursores, aunque varios investigadores españoles colaboran a título individual en algunos proyectos científicos, como por ejemplo ASKAP/EMU (*Evolutionary Map of the Universe*), y observaciones con estos instrumentos.



La Vía Láctea en radio
a 408 MHz (Jodrell,
Effelsberg y Parkes).

3.4. Primera luz

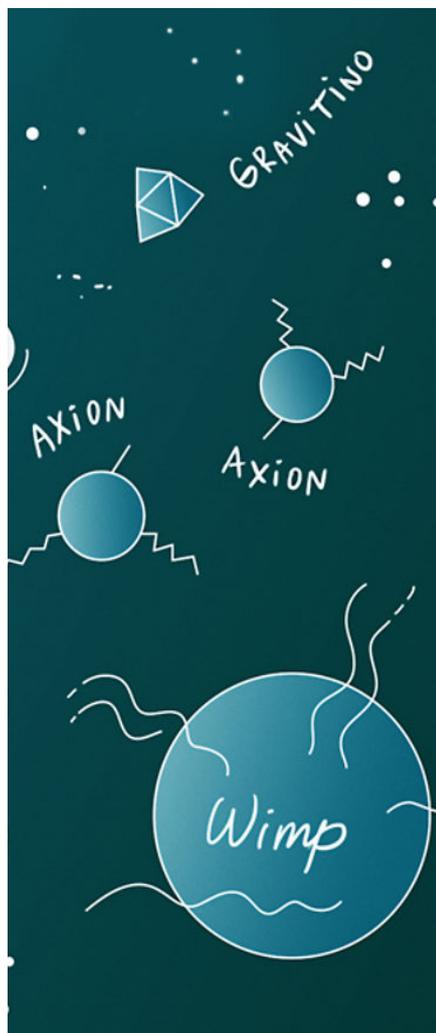
Hay grupos españoles participando de manera muy destacada en la utilización y/o desarrollo de instrumentación de referencia, actual (GTC, Herschel, ALMA) y futura (micro y mini satélites, JWST, E-ELT), y en la preparación de programas observacionales.



- **Herschel:** El grupo Herschel/SPIRE del IAC está contribuyendo al descubrimiento y estudio de galaxias con formación estelar muy grande a desplazamientos al rojo altos ($z > 5$).
- **GTC** (OSIRIS, EMIR): Ambos instrumentos se han construido en el IAC. El grupo ALBA está haciendo observaciones muy profundas (40 horas de imagen GTC+OSIRIS en filtros semi-estrechos), para detectar objetos de muy baja luminosidad que suponen que son los responsables de la re-ionización completa del Universo a $z=6$. Cuando EMIR esté disponible, este grupo propone observar Lyman- α en las bandas infrarrojas cercanas (J,H,K) a $z>8$, para detectar la posible primera re-ionización incompleta causada por las estrellas de población III. La planificación de estas observaciones se ha realizado utilizando el Modelo AMIGA, un modelo auto-consistente de formación de las primeras estrellas de población III y las primeras galaxias.
- **Micro y mini-satélites dedicados:** El uso de micro y nano-satélites es de gran ayuda para numerosos proyectos observacionales, pues permiten largas integraciones fuera de la atmósfera y, para observaciones en el cercano IR, necesitan mínimos requisitos de enfriado. Estos satélites pueden utilizarse para la observación de emisores Lyman α a $z\sim 10-11$, que es la época en la que los modelos predicen una primera re-ionización casi completa realizada por la estrellas de población III, para encontrar las primeras galaxias que se estaría formando entonces.
- **ALMA:** Los GRBs son las explosiones más violentas en el universo y pueden ser detectables a muy alto redshift ($z>8$). Estos eventos que marcan la localización de las regiones de formación estelar extrema en el universo temprano, están siendo estudiados por el grupo de GRBs del IAA con IRAM, APEX y, en el futuro, ALMA. El OAN y el CAB (CSIC-INTA) han tenido y están teniendo una activa participación en la construcción de componentes de ALMA.
- **JWST** (MIRI, NIRSPEC): El CAB tiene una participación muy destacada en estos dos instrumentos del JWST con casos científicos orientados a la detección directa de los primeros objetos luminosos, "mass assembly", evolución en masa, etc. El CAB es Co-IP de MIRI y co-responsable del diseño conceptual de NIRSPEC (este instrumento lo construye la industria). El CAB participa en el equipo científico de ambos instrumentos y recibirá tiempo garantizado.
- **E-ELT** (HARMONI): El CAB y el IAC son instituciones Co-IP de HARMONI, aprobado como instrumento de primera luz para el E-ELT. Participan como responsables de la pre-óptica, guiado secundario y calibración y la electrónica de este instrumento, uno de cuyos objetivos fundamentales es obtener espectroscopía de emisores Lyman- α . También participan en el Equipo Científico y recibirán tiempo garantizado.

3.5. Detección de materia oscura

España participa activamente en diversos experimentos nacionales o internacionales relacionados con la detección de la materia oscura, cuatro de ellos son de detección directa y dos de detección indirecta



- **ANAIS.** Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Experimento español liderado por el grupo de la UZ. Su objetivo es construir un detector de 250 kg de cristales ultrapuros de Ioduro de Sodio, similar al del experimento DAMA/LIBRA, para confirmar o excluir la señal de modulación observada por DAMA. También han construido un prototipo, llamado ROSEBUD, para impulsar su contribución al proyecto europeo EURECA, que se espera contenga una tonelada de cristales y está recomendado por Aspera (ApPEC), pero aún sin aprobar por la UE.

- **CDMS.** Terminada su fase II en la mina de Soudan en Minnesota, USA, está en construcción una nueva fase (SuperCDMS) con 4 kg de cristales de Germanio. Posteriormente se llevará el experimento al laboratorio SNOLAB en Canadá, con hasta 100 kg de cristales. Está liderado por el grupo de Stanford y hay una participación española a través del Consolider MultiDark, liderada por el IFT (UAM-CSIC).

- **COUPP.** Se acaba de instalar en SNOLAB con 60 kg de detector líquido. En la siguiente fase contendrá hasta 500 kg. Está liderado por el grupo de Chicago (USA) y hay una participación española a través del Consolider MultiDark, liderada por el grupo de la UPV.

- **ArgonDM.** Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Liderado por el grupo de la ETH (Suiza), y en España por el CIEMAT.

Su objetivo es construir en Canfranc un detector de una tonelada de Argón líquido para detectar, por medio de ionización y luz de centelleo, la interacción con una partícula de materia oscura. Ya hay un prototipo instalado en Canfranc.

- **MAGIC.** Roque de los Muchachos. Co-liderado por el grupo del IFAE (Barcelona). Es un telescopio Cherenkov de rayos gamma que, entre otros objetivos astrofísicos, también analiza una posible detección de la aniquilación de materia oscura en la galaxia o en objetos extragalácticos. Un objetivo futuro es construir en Canarias el Observatorio Norte del Cherenkov Telescope Array (CTA), una red de 100 telescopios de rayos gamma de diversos tamaños y distribuidos en dos observatorios (Norte y Sur), que dominará la escena para la detección indirecta de aniquilación de materia oscura en nuestra galaxia, así como muchos otros fenómenos astrofísicos violentos.

- **ANTARES.** Mar Mediterráneo. Liderado en España por el grupo del IFIC (Valencia). Es un telescopio submarino de neutrinos. Su objetivo es detectar los neutrinos astrofísicos de alta energía. También analiza una posible detección de materia oscura aniquilándose en el sol o en el centro galáctico. Un objetivo futuro es participar en la construcción del experimento europeo KilometerCubeNetwork (KM3NeT).

3.6. Simulaciones cosmológicas

Abajo, simulación de 55 Tbytes de nuestro cosmos. Se muestra solamente 1/10000 del volumen total simulado (LANL).

Actualmente los logros parciales en relación con lo expuesto en 1.6 son enormes, tanto por el desarrollo de la tecnología de computadores y comunicaciones como por el de los métodos numéricos y el desarrollo de algoritmos.

3.6.1. Líneas de desarrollo actuales. Implicación española en las mismas

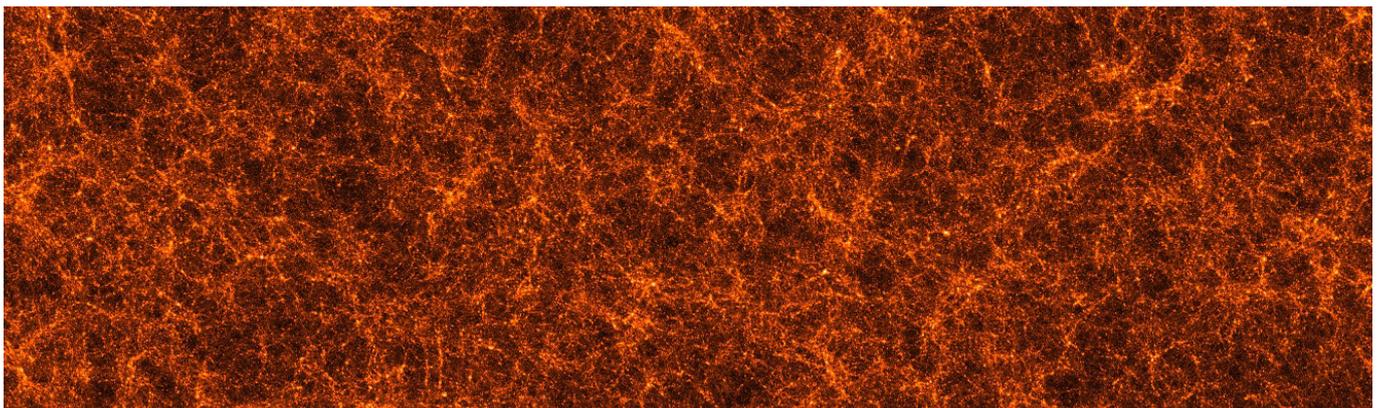
Los códigos en este campo equivalen a los instrumentos en Astronomía; las simulaciones a grandes bases de datos. Las simulaciones son preferentemente ahora proyectos colectivos, y no se puede obviar citarlas si se quiere entender el estado actual del tema y valorar la implicación española en el mismo.

En este momento se está trabajando activamente en cubrir las etapas intermedias. Por claridad en la presentación, dividimos ésta

citando por una parte aquellos desarrollos que se preocupan de optimizar el rango dinámico (a), para mimetizar el comportamiento del Universo *intrínseco* a la mayor escala posible. Y, por otra parte, nos fijamos en aquellos cuyo objetivo es incorporar gran parte de los ingredientes comentados en la sección 1.6 (b), para entender la formación y evolución de galaxias y cúmulos en un contexto cosmológico. Esto permite mimetizar más convenientemente

el Universo observacional, y, además, informará sobre hasta qué punto galaxias y cúmulos trazan la DM (*"DM versus light connection problem"*).

Dado que se está lejos de llegar a la meta descrita en 1.6 en relación con la formación de galaxias en un contexto cosmológico, una metodología ampliamente utilizada en estos momentos para mimetizar las emisiones luminosas de las galaxias que se formarían en los halos de las





simulaciones puramente acolicionales (es decir, sin hidrodinámica), es la combinación estas simulaciones con modelos analíticos de formación de galaxias en halos (los llamados modelos semianalíticos). Estos, y otras variantes, se recogen en el apartado (c).

a) La realización de simulaciones cosmológicas del **mayor rango dinámico posible**, dadas las condiciones tecnológicas del momento. Simulaciones frontera (*Grand Challenge*):

Las simulaciones cosmológicas de mayor volumen realizadas hasta ahora usan cajas de varios Gpc, son acolicionales que no

incorporan gas. Las de mayor rango dinámico (relación entre el volumen de la caja y la resolución espacial) en este momento son:

- Millenium XXL: 3/h Gpc, 6720³ partículas (<http://galformod.mpa-garching.mpg.de/mxxlbrowser>). CEFA. Teruel.
- DEUS simulation: 14.7 /h Gpc con 8192³ partículas (<http://www.deus-consortium.org>).
- JUBILEE Project: 6/h Gpc con 6000³ partículas (<http://jubilee-project.org>). Participan UAM-IFT e IFCA.
- (BIG)MULTIDARK project: 2.5/h Gpc con 3840³ partículas (<http://www.multidark.org>). Desarrollada por UAM-IFT e

IAA, para generar catálogos mock de los surveys BOSS, eBOSS, DESI.

- MICE Grand Challenge simulations: 3/h Gpc y 4096³ partículas (<http://maia.ice.cat/mice>). IEEC-CSIC, con vistas a realización de catálogos simulados de los surveys DES, PAU, Euclid, VHS and Planck. Con detalle máximo. También PAU-MICE galaxy mock y DES-MICE Shear All-sky Tomographic Catalogue.
- Non-Gaussian Simulations Project (ICCUB-CSIC).
- IDILICO Project (ICCUB-CSIC).

Otras simulaciones de gran volumen incorporan gas. Las de mayor volumen que incor-



La supercomputador Tianhe (Vía Láctea, en chino), en Guangzhou, China, es una de las más rápidas del mundo.

poran gas (sin *cooling*) son en cajas de hasta 500/h Mpc (Marenostrum Universe, UAM). Las de mayor volumen que incorporan gas, enfriamiento, formación estelar y procesos de realimentación por explosiones de supernovas eran de decenas de Mpc (OWL simulations, GALFOBS UAM-UMH). Recientemente se ha llegado a varios centenares de Mpc (CURIE-Hz Universe, UAM, <http://curiehz.ft.uam.es>). Con la tecnología actual, el volumen máximo alcanzable, con suficiente resolución es de casi 1/h Gpc (*Magneticum MHD simulation* de Klaus Dolag).

b) Códigos y simulaciones que incorporan gran parte de los procesos físicos enumerados en Sección 1.6:

- Códigos hidrodinámicos de este grupo capaces de maximizar en este momento el rango dinámico: GADGET, GASOLINE, RAMSES, MASCLET, P-DEVA. Además AREPO, novedoso en cuanto que usa la tecnología del "*moving mesh*". MASCLET (UV) y P-DEVA han sido desarrollados por equipos españoles; GADGET es utilizado por equipos españoles que han desarrollado variantes; grupos españoles colaboran con quienes

desarrollan variantes de GASOLINE; RAMSES ha sido implementado y corrido en el BSC, recibiendo inputs de los equipos profesionales de este centro.

- Simulaciones cosmológicas hidrodinámicas realizadas por equipos españoles con los códigos anteriores hasta el momento, que optimizan las demandas de 1.6b:
 - MareNostrum Universe: la más competitiva en su momento (UAM, <http://astro.ft.uam.es/marenostrum>).
 - GALFOBS: 80 Mpc³, hasta $z=0$. Incorpora hidrodinámica, en-

friamiento, formación estelar, un modelo detallado de evolución química, *feedback* químico (UAM-UMH).

- MareNostrum High-z Universe: UAM. Hasta $z = 4$ para estudiar la formación de las galaxias primordiales.
- CURIE High-z Universe: UAM. Posibilidad de resimular cualquier objeto con un rango dinámico de hasta 16000^3 partículas.
- Proyectos CLUES (<http://clues-project.org>), participación UAM, y MUSIC (<http://music.ft.uam.es>), UAM.
- Simulaciones hidrodinámicas de formación de galaxias

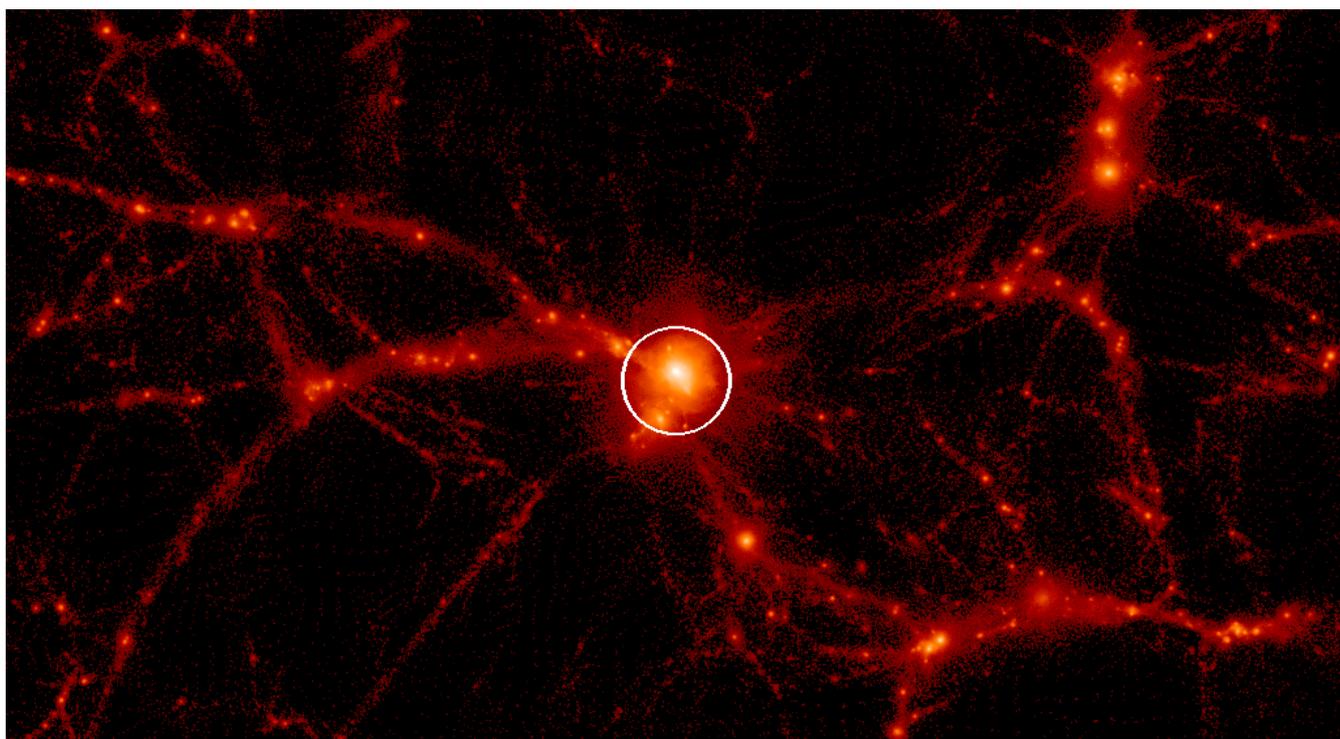
y cúmulos de galaxias con MASCLET (UV).

- Otras son consorcios internacionales, orientadas a las propiedades estadísticas de galaxias:
 - *Eagle Simulation Project*, 100 Mpc^3 , hasta $z=0$, desarrollado en UK (<http://icc.dur.ac.uk/Eagle>).
 - *Illustris Simulation*, gran consorcio internacional liderado por V. Springel (<http://www.illustris-project.org> y http://www.gauss-centre.eu/gauss-centre/EN/Projects/Astrophysics/2014/springel_illustris.html).

c) Desarrollos analíticos y semianalíticos:

- Códigos y algoritmos semi-analíticos para formación de galaxias desarrollados en el CEFGA, Teruel, a combinar con el código acolisional Millenium-XXL.
- Combinación de MULTIDARK con modelos semianalíticos, participa UAM-IFT.
- Desarrollo de códigos analíticos detallados para formación y evolución de galaxias (ICCUB).
- Software para mimetizar las SEDs, e imágenes de galaxias simuladas (Proyecto GRASIL-3D).

Cúmulo de galaxias resultantes de la simulación MareNostrum Universe (escala de la imagen, 100 Mpc/h).



3.6.2. España versus Europa

A nivel europeo, España es uno de los 7 países (Francia, Alemania, Italia, Holanda, Reino Unido, NOTSA) que participan en la Red Europea de Supercomputación. El consorcio DEISA (<http://www.deisa.eu>) ha liderado la colaboración entre los centros de supercomputación nacionales para fomentar la investigación científica en supercomputación pan-europea y llevarla a niveles de liderazgo mundial. DEISA1 empezó en 2002 financiado por el FP6, y DEISA2 financiado por el FP7. El FP7 financió

también en parte el *Partnership for Advanced Computing in Europe* (PRACE en adelante), del que España es partner cofundador. Se trata del top level de la supercomputación en Europa. Otro consorcio europeo muy importante en los últimos años ha sido la *Distributed European Computing Initiative* (DECI en adelante). Se trata del sistema de acceso a la HPC europea, ahora vía PRACE-2IP, acceso que está basado en la competición de proyectos a nivel europeo. Este servicio de

HPC ofrece a los investigadores y la industria europea prestaciones de hiper/supercomputación de altísimo nivel, campo en el que es líder. El share de los astrónomos en Europa es de un 10% del tiempo total (es decir, incluyendo el tiempo utilizado por la industria) de hiper/supercomputación, lo que puede considerarse como alto.

En España el campo está liderado por y se trabaja vía la Red Española de Supercomputación (RES) y el Centro Nacional de



Supercomputación de Barcelona (CNS-BSC, <http://www.bsc.es>). Uno de los supercomputadores más importantes de Europa es Mare Nostrum, en el BSC desde 2005. Ha sido el más importante en el periodo 2005-2007 y en su última actualización (diciembre 2012), su potencia ha sido incrementada hasta llegar a casi 1 Pflop. El acceso a la HPC es vía PRACE y desde las instituciones científicas españolas vía RES. El share por parte de los astrónomos es del 20% (alto), siendo una buena proporción de temas de cosmología. El papel del CNS-BSC y de la RES han sido y son muy positivos al ofrecer opciones reales de supercomputación a los equipos españoles y

organizar cursos de formación. El primero canaliza y asesora sobre el acceso a la HPC europea y sobre la creación de software de altas prestaciones, en particular en Cosmología y Astrofísica (ver más abajo).

Existen además otros centros regionales de altas prestaciones en computación, no integrados en la RES, ni accesibles en general a usuarios de otras CCAA. Y, también, clústeres locales en diferentes instituciones no integrados en la RES.

Por otra parte, en ocasiones se han testado los límites y la eficiencia de las prestaciones de máquinas del BSC, (Mare Nostrum), mediante la realiza-

ción de simulaciones cosmológicas, por su alta demanda de hipercomputación y su complejidad. Así, la colaboración entre la hiper/supercomputación y la Cosmología, ha sido aquí como en otros lugares, altamente fructíferas.

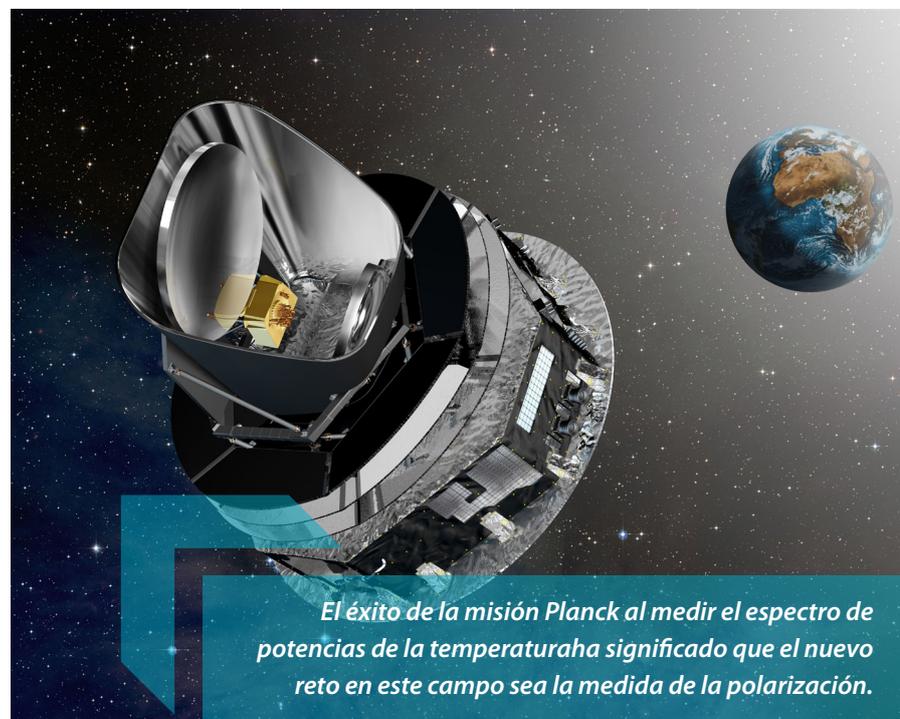
Los grupos españoles en este campo son muy competitivos y muy bien relacionados a nivel europeo. Por ejemplo, Pablo Fosalba del Grupo de Barcelona es el co-coordinador del Software Working Group del proyecto Euclid de la ESA, en el que participan también miembros del grupo de la UAM. Los más numerosos son los de IEEC (Barcelona) y UAM-IFT (Madrid)

4. Necesidades instrumentales

4.1 Fondo cósmico de microondas

La instrumentación en microondas se basa en dos tipos de detectores dependiendo de la frecuencia de observación: por debajo de 100GHz se utilizan amplificadores de bajo ruido mientras que por encima de dicha frecuencia los detectores más sensibles se

basan en dispositivos pasivos de estado sólido (bolómetros). El ejemplo más claro de esta separación tecnológica lo tenemos en los dos instrumentos de Planck, donde el instrumento de baja frecuencia (LFI, 30-70 GHz) está basado en amplificadores HEMT



El éxito de la misión Planck al medir el espectro de potencias de la temperatura ha significado que el nuevo reto en este campo sea la medida de la polarización.

mientras que el de alta frecuencia (HFI, 100-857 GHz) en bolómetros. La comunidad española del CMB, liderada por los grupos del IFCA e IAC, ha tenido una participación importante a nivel instrumental, con el desarrollo de parte de los radiómetros a 30 y 44 GHz y la electrónica de control del LFI. Además el grupo del Dpto. de Física Teórica y del Cosmos de la UGR ha contribuido con el regulador de la criogenia a 4K del HFI. La comunidad española también ha tenido y sigue

teniendo un papel relevante en el análisis de los datos y la obtención de los resultados cosmológicos, con investigadores liderando algunos de los artículos recientemente publicados (IFCA, IAC, UGR, UO, CEFC). El éxito de la misión Planck de la ESA en la consecución de los objetivos científicos esperados y, en particular, la medida del espectro de potencias de la temperatura en todo el cielo con resolución de 5 minutos de arco y con precisión por debajo de la varianza cósmica, ha signi-



Un interferómetro de gran formato con cientos de detectores supondría una mejora sustancial en sensibilidad

ficado que el nuevo reto en este campo sea la medida de la polarización. Con los datos combinados de polarización de BICEP2/Keck Array/Planck hechos públicos recientemente se ha obtenido el límite $r < 0.12$. Aunque el ruido instrumental de Planck permitiría alcanzar niveles de sensibilidad de $r \approx 0.05$, sin embargo al no disponer de un diseño optimizado para polarización se espera que esta medida esté limitada por efectos sistemáticos. Existen actualmente varios experimentos que se están desarrollando, como BICEP2, Keck Array, EBEX, LSPE, PolarBear, SPIDER, SPTPol, QUBIC, QUIET-II y QUIJOTE que esperan alcanzar una sensibilidad en el modo B en el rango de $r \approx 0.1-0.01$ (95% de confianza). Mientras que la mayoría de los experimentos están liderados por equipos de EEUU, QUIJOTE es un experimento hispano-británico liderado por los grupos españoles del IAC, IFCA y DICOM (UC). Consta de dos telescopios de 3 m y tres instrumentos cubriendo el rango espectral 10-50 GHz. Por un lado supone



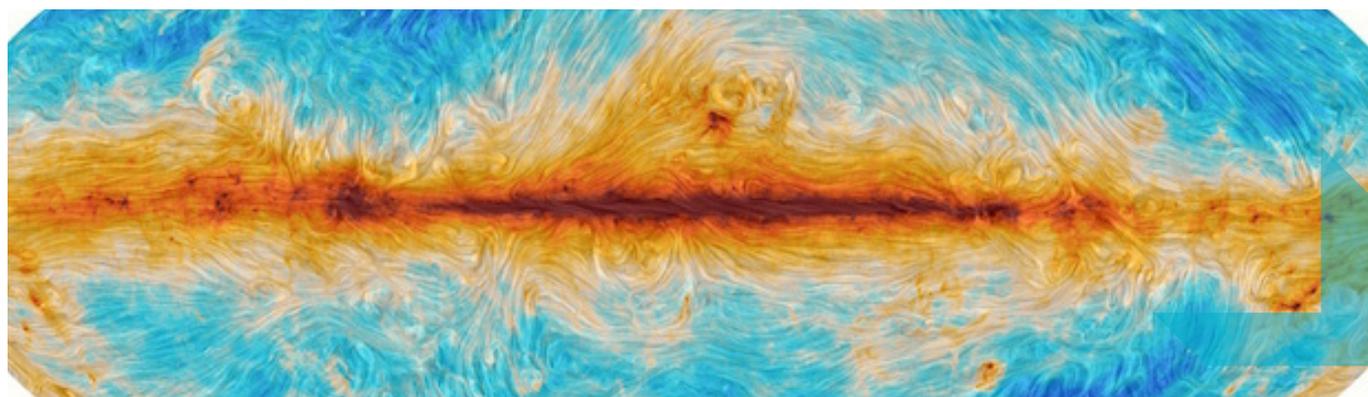
QUIJOTE es un experimento hispano-británico liderado por los grupos españoles del IAC, IFCA y DICOM (UC).

un importante complemento a la información obtenida por Planck a frecuencias más bajas donde la emisión “anómala” (debida a la emisión no-térmica del polvo) alcanza su máximo de emisión, y por otro se espera mejorar la sensibilidad por pixel en las bandas comunes con Planck. Actualmente dos telescopios y el instrumento MFI (Multi-Frequency Instrument, 10-20 GHz) están operativos y se ha comenzado a medir tanto la emisión sincrotrón como la anómala de nuestra galaxia. Se espera que en unos meses comience a operar el segundo telescopio y el instrumento TGI (Thirty Gigahertz Instrument, 26-36 GHz) y en otro año más el FGI (Forty Gigahertz Instrument, 35-47 GHz). QUIJOTE cubrirá unos 4000 grados cuadrados de cielo y permitirá alcanzar un valor de $r \approx 0.05$.

A más largo plazo un interferómetro de gran formato con cientos de detectores supondría una mejora sustancial en sensibilidad en relación a los experimentos actuales. Previamente hay que resolver los problemas de correlación que representa ese alto número de elementos.

En relación al programa científico de la ESA, se espera volver a proponer (en una futura llamada para misiones M5) un satélite del tipo “Cosmic Origins Explorer+” (CORe+), ya propuesto anteriormente para la medida de la polarización en todo el cielo en 19 bandas de frecuencia cubriendo un rango espectral de 60-600 GHz (de aprobarse, su lanzamiento probablemente sería alrededor de 2030). Con el doble de resolución frecuencial y 30 veces más sensibilidad que Planck, CORe+

espera obtener una sensibilidad en la señal de las PGW (dada por el modo B de polarización) de $r \approx 0.001$, mejorar la determinación de las condiciones iniciales cosmológicas, detectar los procesos no-lineales alrededor del periodo inflacionario mediante una mejora en la medida de la no-Gaussianidad y medir la masa de los neutrinos. Anteriormente también se había propuesto una misión tipo L como respuesta a la llamada L2/L3 de ESA, PRISM, que con un espectrómetro además de una cámara de imagen polarimétrica representaba una mejora sustancial respecto a CORe+ tanto en sensibilidad como resolución angular y frecuencial y con unos objetivos científicos mucho más ambiciosos. La comunidad española del CMB está participando activamente en la definición de dichas misiones.



La explotación científica de los datos extragalácticos extraídos de las imágenes de microondas (cúmulos SZ, radiogalaxias y galaxias infrarrojas) requieren también del seguimiento con telescopios ópticos de tamaño medio y grande (2.5-10 m), submilimétricos y antenas de radio. Telescopios del Observatorio del Roque de los Muchachos se están utilizando actualmente para la determinación del redshift así como las propiedades dinámicas de los cúmulos SZ detectados por Planck, y también podrían utilizarse los telescopios de Calar Alto y

los del Observatorio Astronómico de Javalambre. Observaciones con Herschel han aportado información esencial para la correcta interpretación de las fuentes detectadas por Planck.

Por último, la cross-correlación del FCM con cartografiados de galaxias profundos de amplias zonas del cielo permite una confirmación independiente de la existencia de la energía oscura, como ha sido demostrado con mapas del CMB de WMAP y Planck y surveys profundos en distintas bandas, en especial en radio con NVSS.

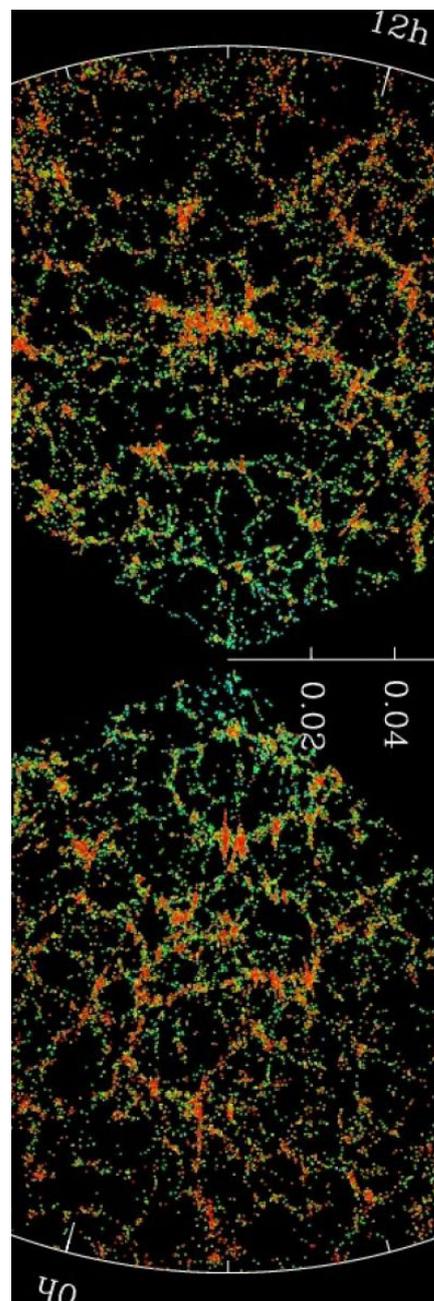
4.2. Cartografiado de galaxias

Los *surveys* cosmológicos requieren de instrumentación de gran campo que pueda detectar objetos hasta alto *redshift* ($z < 2$) para cubrir el volumen necesario. Por tanto, se necesitan telescopios suficientemente grandes con correctores de gran campo, espectrógrafos multiobjeto con gran capacidad de multiplexado y cámaras de gran campo.

El *Wide Field Survey Working Group* de Astronet identificó como prioritario para cosmología un espectrógrafo de amplio campo con elevado multiplexado. La combinación de telescopio/instrumento que cubrirán esta necesidad en los próximos años serán WHT/WEAVE, VISTA/4MOST, VLT/Moons, Mayall/DESI, HET/Virus, Subaru/PFS y Euclid/NISP.

Por lo que respecta a imagen y fotometría, diversos organismos (incluyendo ESO) han identificado también la necesidad de contar con cámaras de campo muy amplio (varios grados cuadrados) para llevar a cabo surveys de imagen multibanda con los que poder obtener *redshifts* fotométricos. En este campo podemos enumerar: JST-T250/JPCam, VST/Omegacam, WHT/PAUcam, VISTA, Blanco/DECam, CFHT/MegaCam, PanSTARRS, Subaru/HSC and Euclid/VIS+NISP.

La capacidad de producción instrumental en España ha mejorado considerablemente y eso ha permitido a la comunidad científica involucrarse en proyectos internacionales punteros desde sus fases más tempranas y participar



en términos de igualdad. Es imprescindible que la instrumentación siga apoyándose para poder continuar teniendo un papel relevante en los experimentos en marcha y poder formar parte de los proyectos venideros.

La instrumentación puntera orientada a la cosmología observacional, produce cantidades enormes de datos. Por tanto, otro aspecto fundamental para poder explotar adecuadamente estos proyectos es disponer de la capacidad adecuada para afrontar el análisis e interpretación de los datos.

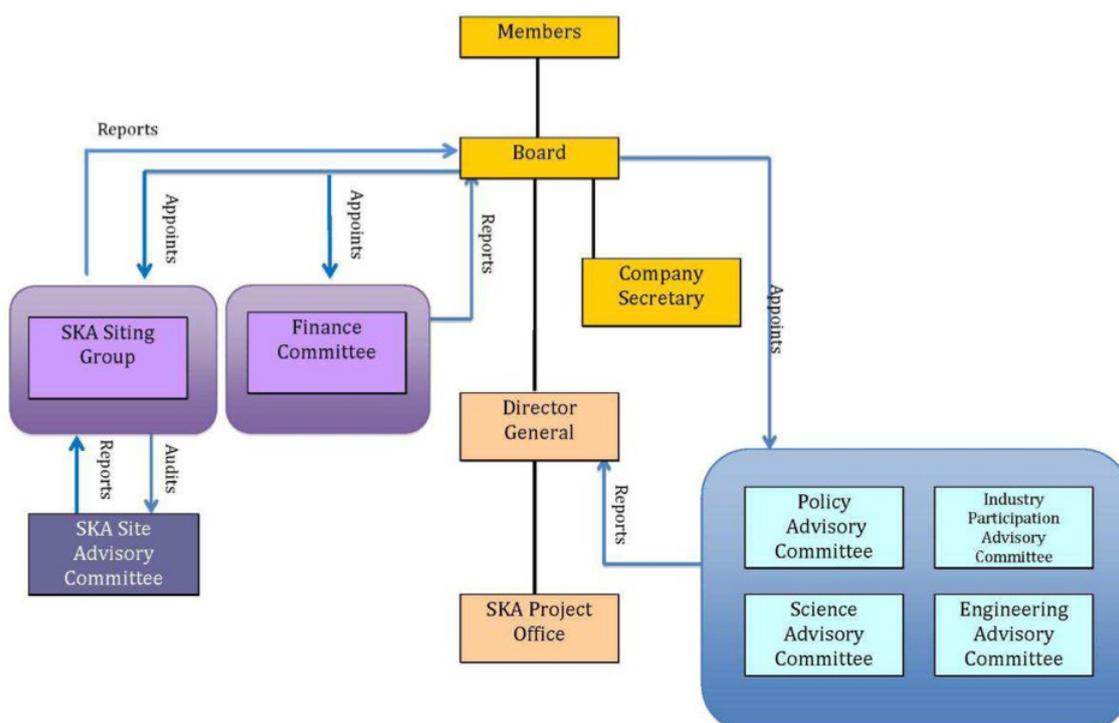
4.3. Astronomía de 21 centímetros

El SKA supone uno de los mayores desafíos instrumentales, tanto por su escala como por su complejidad, que va a abordar la ciencia internacional durante las próximas dos décadas. Se utilizarán tres tipos de instrumentos: 'dishes', 'mid frequency aperture arrays' y 'low frequency aperture arrays', para proporcionar una cobertura completa entre 70 MHz y 10 GHz. Además para cumplir los objetivos de SKA se debe superar, en particular, el estado actual del arte en tecnología de correladores de gran número de elementos. El esfuerzo concertado por parte de SKA para desarrollar estas tecnologías tendrá un enorme impacto en la industria y el comercio de alta tecnología durante los próximos años. El proyecto SKA se va a desarrollar en dos fases, una primera

(entre 2016 y 2020) en la que se incorporarán los *dishes* y los *low frequency aperture arrays*, y una segunda (SKA2), a desarrollar entre 2020 y 2024, con el conjunto completo de antenas y *arrays*. Para coordinar el desarrollo de estas fases y asegurar que se cumplen los objetivos de I+D+i requeridos para el funcionamiento del SKA se han establecido diversos consorcios regionales (entre los cuales figura el consorcio europeo, ESKAC), así como un organigrama organizativo (ver abajo), y se está ultimando la formalización de grupos de trabajo orientados principalmente a la fase de pre-construcción. Diversos grupos españoles, integrados en la red VIA-SKA, han manifestado su intención de participar en estos grupos de trabajo, particularmente en la

construcción de dishes, abastecimiento energético, detectores, electrónica, computación y procesamiento de señales.

Dado el enorme potencial científico y tecnológico de la astronomía de 21 centímetros en general y del SKA en particular resulta prioritario que las instituciones españolas, y en particular el MINECO, den los pasos necesarios para entrar a formar parte oficialmente de los grupos de trabajo de SKA y de al menos uno de sus dos precursores directos, MeerKAT y/o ASKAP. Esta entrada abriría el camino para que la industria española participe e incluso lidere proyectos de gran envergadura y duración, con un importante retorno en términos económicos, de competitividad y de crecimiento industrial.



4.4. Primera luz

Las necesidades instrumentales futuras están bien definidas (señalamos el objetivo científico más destacado de cada una de las instalaciones):

- **GTC** (EMIR): para observar Lyman- α en las bandas infrarrojas cercanas (J,H,K) a $z > 8$ y detectar la posible primera re-ionización incompleta causada por las estrellas de población III.
- **NGCryo** (ESA, M5): para el estudio de galaxias con formación estelar muy grande a desplazamientos al rojo altos.
- **ALMA**: para estudiar los GRBs a muy alto redshift ($z > 8$) que marcan la localización de las regiones de formación estelar extrema en el universo temprano.
- Micro y nano-satélites: para cosmología observacional, y en particular para la detección de las primeras galaxias en la época de la primera re-ionización.
- **JWST** (MIRI, NIRSPEC): para la detección directa de los primeros objetos luminosos, "mass assembly", evolución en masa, etc.
- **E-ELT** (HARMONI): para obtener espectroscopía detallada de emisores Lyman- α responsables de la "primera luz".

La participación española está siendo financiada por el Plan Estatal y las instituciones que participan en el desarrollo de la instrumentación. Sin embargo hay que dotar a los proyectos (sobre todo a los que están empezando) de un marco estable de financiación tanto para la participación tecnológica como para la formación de grupos científicos que puedan hacerse cargo de la importante dotación en tiempo garantizado (EMIR, MIRI, NIRSPEC, HARMONI) que va a recibir España.

4.5. Detección de materia oscura

Tal como se describe más arriba, el objetivo prioritario para la próxima década es construir detectores varios órdenes de magnitud más potentes, tanto detectores de cristales de germanio ultra puros, o tanques de Argón líquido, como una red de telescopios de rayos gamma de diversos tamaños, o detectores de neutrinos submarinos. Son proyectos internacionales, ambiciosos y muy costosos. Algunos están ya aprobados por distintos miembros de la UE (por ejemplo CTA por Alemania) o por USA (por ejemplo SuperCDMS, COUPP). El descubrimiento de un nuevo tipo de partícula que podría

ser responsable de la inmensa mayoría de la masa del Universo bien vale la pena la inversión. La participación española estaría en muy buena posición para liderar el análisis en las colaboraciones internacionales.

Al alto impacto que se espera tenga el CTA en la búsqueda de materia oscura debido a su mayor sensibilidad y cobertura espectral, hay que añadir también la mejora en la determinación del EBL de manera indirecta a través de la medida del espectro de rayos gamma de una muestra suficientemente grande de AGNs a distintos redshifts.

Además de las necesidades instrumentales, hay que hacer hincapié también en las necesidades de personal de los proyectos. Con los actuales recortes, muchos de estos grupos de investigación no han podido crecer para hacer frente a las necesidades experimentales, tanto de construcción de los detectores como del análisis de los datos. Para un correcto funcionamiento, todos ellos necesitan más personal técnico y científico. Y en el futuro, con los nuevos detectores planeados, sin duda se requerirá una inversión importante en material y personal.



4.6. Simulaciones cosmológicas

Como hemos visto, la meta en cuanto a simulaciones cosmológicas de utilizar volúmenes del orden de 10-100 Gpc cúbicos, con resolución espacial del orden de cientos de pcs, que incluyan la física de bariones, estrellas y agujeros negros, así como sus mutuas relaciones, está hoy lejos de ser alcanzada a nivel mundial, habiéndose realizado no obstante importantísimos avances parciales. Como hemos señalado más arriba, basándose en un informe de la European Technology Platform for High



Performance Computing (HPC Europei), la ESFRI (Research Infrastructures-Research-European Commission), identifica la Astrofísica y Cosmología como uno de los campos en los que la hiper/supercomputación ha jugado (y jugará) un papel fundamental. Y, precisamente, la "Cosmología y la Formación de Estructura a Gran Escala", y la "Formación y Evolución de Galaxias" son identificadas como 2 de las 6 sub-áreas de Grand Challenge en HPC.

La situación española en este campo es, a nivel del hardware de hiper/supercomputación, de una integración

en Europa altamente satisfactoria. En efecto, como hemos dicho, España es socio cofundador de PRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe), financiado en parte por el FP7 europeo y top level de la supercomputación en Europa.

El servicio europeo de HPC permanente ofrece a los investigadores españoles prestaciones de hiper/supercomputación altamente competitivas, a las que se accede sobre la base de competición en proyectos, a través de DECI (Distributed European Computing Initiative), ahora vía PRACE-2IP, con resultados de éxito por parte de los cosmólogos españoles. A nivel europeo, los astrónomos/cosmólogos tienen un 10% del share total (es decir, incluyendo el tiempo utilizado por la industria europea, alto) en el sistema.

En España se trabaja principalmente a través de la Red Española de Supercomputación (RES) y el Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (CNS-BSC), siendo muy alto el share de los astrónomos y cosmólogos en este centro. El superordenador Mare Nostrum, en el BSC desde 2005, es uno de los supercomputadores más importantes de Europa, habiendo sido el más importante en el periodo 2005-2007. Su potencia ha sido incrementada hasta llegar a casi 1 Pflop (diciembre 2012).

Existen además otros centros ligados a ciertas CCAA no integrados en la RES, así como

centros más pequeños (del orden de cientos de cores) ligados a instituciones.

Podemos decir que existe una eficiente disponibilidad de hardware de hiper/supercomputación para los cosmólogos españoles, y, también, a nivel de desarrollo de software, una cierta tradición de éxito en el desarrollo, por parte de éstos, de códigos de simulación numérica, incluida la hidrodinámica, así como de pipelines eficientes de análisis de las simulaciones.

En la próxima década, para no perder competitividad, se necesita mantener la inversión en infraestructura de hiper/supercomputación.

Concretamente, desde el PNAYA/RIA: 1) dotar a los grupos de infraestructuras locales suficientes como para que puedan realizar las fases de análisis de las simulaciones (téngase en cuenta que el tiempo típico de utilidad de una macrosimulación es de varios años); 2) infraestructuras de almacenamiento masivo de datos (cuyo tamaño esperable en breve será del orden de Pbytes) en red, no financiado ni contemplado por PRACE. En Física de Partículas existe ya el Punto de Información Científica (<http://www.pic.es>), dedicado al almacenamiento masivo de los datos del CERN.



5. Proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro

5.1. Fondo cósmico de microondas

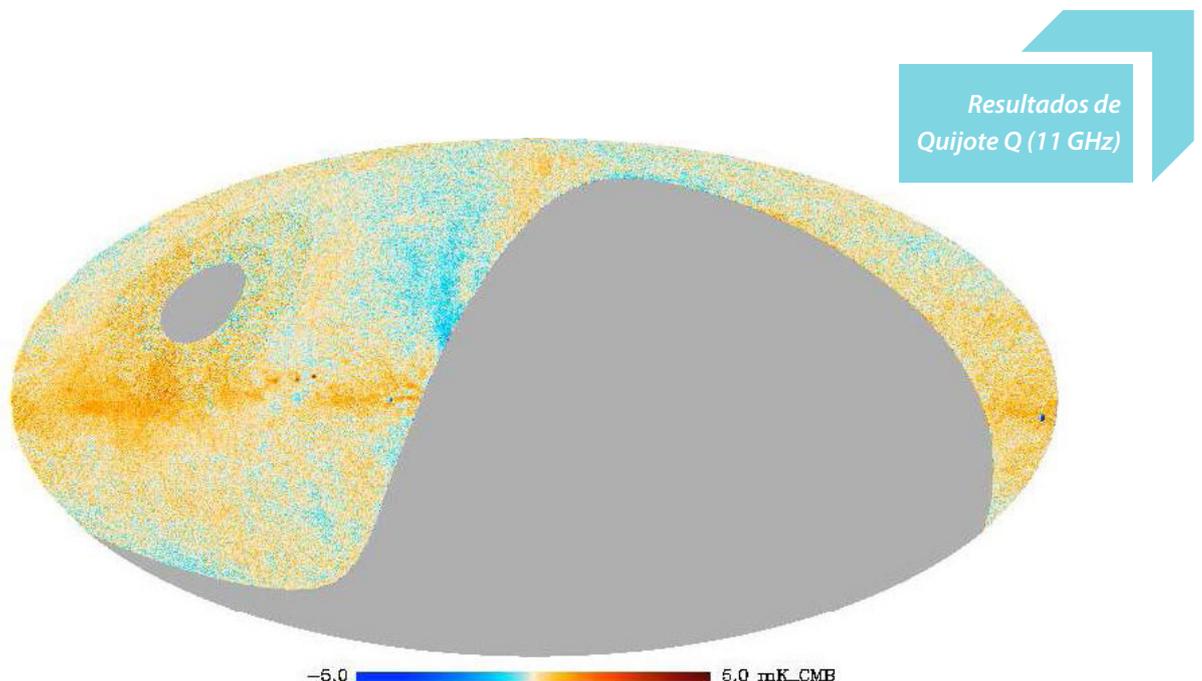
A pesar de las importantes aportaciones realizadas en el campo del CMB, la contribución española en este área no es equiparable al de otros países de su entorno debido a lo reducido de su comunidad y de sus recursos e infraestructuras. Existen actualmente varios proyectos consolidados liderados por grupos con una amplia trayectoria en el contexto internacional. IAC, IFCA y DICOM (UC) poseen una amplia experiencia en el desarrollo de instrumentos del CMB, y los dos primeros, junto con el grupo de Cosmología Física

del ICCUB, también en el análisis de datos y explotación científica. Además existe un rico tejido de investigadores ampliamente distribuido por la geografía española y con una contribución significativa al campo (UGR, CEFCO, UO, USAL, IEEC).

También es de destacar la experiencia adquirida por los grupos del ICE y del IFCA en el estudio de la cross-correlación del FCM con cartografiados de galaxias, siendo el del ICE uno de los primeros en detectar el efecto Sachs-Wolfe

Integrado y, más recientemente, el del IFCA ha coordinado la publicación de la colaboración Planck donde se detecta dicho efecto con los datos de Planck.

En la última década IFCA, IAC y DICOM-UC han mantenido una participación importante en la misión Planck de la ESA en todos sus aspectos: instrumental, reducción y análisis de datos, obtención de los productos (catálogos de fuentes y cúmulos SZ y mapas de CMB) y resultados científicos. Actualmente esta

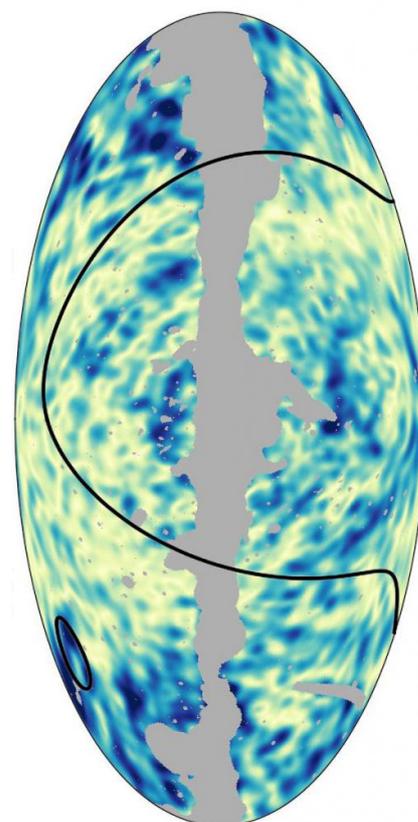


misión está en su última fase. Los resultados finales basados en los datos completos de temperatura y parciales de polarización se han hecho públicos en 2015. Los datos finales de polarización se esperan hacer públicos en 2016. Por otro lado, dichos grupos están desarrollando el experimento de polarización del CMB, QUIJOTE, cuyo consorcio incluye también a grupos de las universidades de Manchester y Cambridge. QUIJOTE, liderado por el IAC, ha comenzado a observar y se espera que en los próximos años obtenga mapas de polarización de varios miles de grados cuadrados con los que se podrá determinar el modo B de polarización con una sensibilidad muy competitiva. Uno de los dos telescopios de QUIJOTE así como el instrumento de 40 GHz están financiados a través del proyecto consolidar ingenio-2010 "Exploring the Physics of Inflation (EPI)", 2011-2015, coordinado por el IFCA, que además incluye entre sus objetivos el desarrollo de un demostrador de un interferómetro de microondas de gran formato. La superación de las dificultades relacionadas con la correlación de cientos de detectores permitiría una fuerte mejora en la sensibilidad con respecto a experimentos de imagen directa para los que el máximo número de detectores que se pueden acomodar está limitado por el espacio disponible en el plano focal.

La comunidad española participa activamente en la definición de la próxima generación de misiones espaciales para medir la polarización del CMB. Se contemplan dos posibilidades instrumentales principales en las propuestas a las convocatorias de la ESA. Por un lado una cámara polarimétrica para la medida de las anisotropías con una resolución de varios

minutos de arco y cubriendo un rango amplio de frecuencia alrededor de 100 GHz. Por otro, un espectrógrafo de baja resolución angular para medir las distorsiones del espectro de cuerpo negro. Además de la contribución a su definición se espera que los grupos españoles puedan optar también al desarrollo de partes del instrumento, como por ejemplo las cadenas de detección así como la electrónica del instrumento, partes en las que se tiene una gran experiencia. La fabricación de los instrumentos TGI y FGI de QUIJOTE así como su explotación científica, el desarrollo de un demostrador interferométrico de gran formato y la preparación para el desarrollo de la siguiente generación de misiones espaciales del CMB (en particular en relación a detectores radiométricos, bolométricos o tipo KIDs) representan acciones estratégicas de futuro en el campo del CMB.

Para poder mantener la competitividad y, en algunos casos, el liderazgo en el área del CMB y que la comunidad española juegue un papel de liderazgo en los experimentos de la próxima década, es necesario potenciar a los grupos que actualmente están desarrollando una actividad muy importante tanto en el desarrollo instrumental como en la explotación científica de los datos. Desde el punto de vista de desarrollos teóricos sería importante potenciar los grupos que actualmente mantienen una actividad destacada en temas relacionados del universo temprano, como son el del IFT, Dpto. de Física Teórica (UPV/EHU), el grupo de Gravitación y Cosmología (UB), Dpto. de Astronomía y Astrofísica (UV), el Dpto. de Física Teórica y del Cosmos (UGR), el grupo de Cosmología del CEFCa, el IAC y el IFCA.



Polarización del CMB (Planck)

5.2. Cartografiado de galaxias

Los proyectos e instrumentación enumerados más arriba se encuentran en diversas etapas de desarrollo. Algunos se encuentran en operación, otros en construcción y otros en fase de diseño. La mayoría están ya financiados, a nivel de infraestructura, otros todavía necesitan asegurar su financiación aunque no se prevé que esta se encuentre en riesgo. La mayoría de los proyectos están liderados por consorcios científicos ya formados, algunos ya cerrados, otros abiertos a nuevos participantes.

Desde la perspectiva española es importante facilitar la participación de nuestra comunidad en los proyectos más relevantes, en particular para poder contribuir desde el punto de vista científico global y además consolidar nuestras capacidades instrumentales es importante formar parte de proyectos de *surveys* de imagen y de espectroscopía y también en proyectos ejecutados desde el espacio. Pero es sobre todo fundamental garantizar la existencia de grupos consolidados de ciencia e instrumentación y dotarlos con los medios necesarios para aprovechar estas participaciones.

Nuestra comunidad ha dado importantes pasos en este sentido. Por ejemplo, de los grandes *surveys* enumerados, el primero que tiene previsto alcanzar el Stage IV en la medición de la energía oscura es J-PAS, un proyecto propuesto y liderado por España, en el que participan varias docenas de científicos de casi todas las instituciones astronómicas españolas. Este proyecto no solo está financiado por nuestro país en casi un 85% de su coste, sino que ha conseguido atraer 5M de euros de financiación extranjera que están siendo invertidos en instrumentación científica a ser instalada en nuestro país. También cuentan con una amplia representación española los proyectos DES, DESI y Euclid.

Desde el punto de vista instrumental, en España se ha diseñado y se ha construido en su integridad la cámara de PAU. También hay aportaciones importantes a otras cámaras como T80Cam, J-PAS-PathFinder, JPCam, DECam, DESI y WEAVE. Nuestra contribución también

es destacable en Euclid. También es de destacar la importancia de completar los cartografiados en curso, aunque sea parcialmente, con observaciones de campo amplio en el infrarrojo cercano, para lo cual el mejor instrumento disponible en España actualmente es la combinación de la cámara PANIC con el telescopio de 2.2m del Observatorio de Calar Alto en España, que cubre un campo de 30'x30'.

Es importante continuar potenciando estas iniciativas para que podamos tener un papel relevante en todos estos *surveys* de cosmología observacional y sobre todo, poder tener los medios suficientes para una adecuada explotación de sus resultados, a través de la financiación de los grupos científicos que están llevando a cabo estos proyectos.

De lo contrario se corre el riesgo de que las cuantiosas inversiones en infraestructuras realizadas hasta la fecha sean explotadas por otros, una situación especialmente sangrante en la presente situación



5.3. Astronomía de 21 centímetros

El principal escollo del desarrollo de la astronomía con 21 centímetros es, precisamente, que España no pertenece a ningún consorcio internacional en este sentido. El trabajo y recomendaciones de grupos como VIA-SKA son un paso importante en esta dirección.



España tiene la capacidad para colaborar activamente en este nuevo campo de investigación y desarrollo, y tanto la industria como los organismos públicos de investigación han manifestado su interés y compromiso. Es necesaria una respuesta igualmente firme y positiva, y en este preciso momento, por parte de la Administración Pública, en la forma de co-financiación por parte del MINECO, así como de dotación económica para proyectos de investigación de Plan Estatal y de colaboración con empresas, para poder culminar este proceso con garantías de éxito, o perderemos una oportunidad única. España debe firmar los acuerdos pertinentes para poder ser miembro de pleno derecho de SKA.



5.4. Primera luz

- **Grupo Herschel-SPIRE:** Como se ha comentado más arriba, el grupo Herschel/SPIRE del IAC está contribuyendo al descubrimiento y estudio de galaxias con formación estelar muy grande a desplazamientos al rojo altos ($z > 5$). Además de Herschel utilizan algunos de los telescopios con participación española: WHT y GTC en el ORM, radio telescopios de IRAM (PdBI y 30m), VLT, VISTA, APEX, ALMA y HST. En el futuro esperan utilizar el JWST, E-ELT, un telescopio espacial infrarrojo tipo NGCryo así como el Cornell-Caltech Atacama Telescope (CCAT).
- **ALBA:** Este grupo está liderado por el IAC y la Univ. de Florida y participan también investigadores de UB, UCM, CAB y CEFCA. Combinan el estudio teórico de la(s) época(s) de re-ionización con observaciones en el óptico y el infrarrojo. Son un grupo consolidado, que recibe financiación del Plan Estatal y del que se espera una larga trayectoria.
- **CAB:** El grupo del CAB (CSIC-INTA) es un grupo consolidado con un gran protagonismo en el diseño y construcción de MIRI y NIRSPEC y que ha recibido financiación de los programas nacionales. Como consecuencia de todo ello, dispondrá en el futuro de acceso a una substancial cantidad de tiempo garantizado para lo que necesitará de un equipo de investigadores que puedan gestionarlo. Este grupo también participa (como co-IP) en el equipo científico y en la construcción de HARMONI para el E-ELT.
- **IAC-HARMONI:** El IAC participa en el equipo científico y (como co-IP) en la construcción de HARMONI. El grupo tiene un carácter predominantemente tecnológico (el IAC se va a implicar directamente en la construcción del instrumento) y necesita desarrollar un equipo científico que sea capaz de prepararse para el aprovechamiento científico de HARMONI. Este proyecto ha recibido apoyo inicial por parte del Plan Estatal pero para garantizar la participación española en HARMONI se necesita un marco de financiación estable.
- **Grupo GRBs IAA:** desde hace tiempo utilizan IRAM y APEX para estudiar en milimétricas y submilimétricas los GRBs. En el futuro planean mejorar estos estudios con ALMA.

5.5. Detección de materia oscura

Los proyectos ANAIS, ANTARES, CDMS y MAGIC son proyectos consolidados. Sus extensiones aun no están aprobadas definitivamente, salvo el caso de SuperCDMS (USA). El experimento ArgonDM aun necesita un esfuerzo considerable, al menos la parte española.

Los grupos asociados a estos experimentos varían mucho de tamaño y experiencia. Por ejemplo, el grupo de MAGIC lleva muchos años trabajando en Física de Partículas de Altas Energías y probablemente será el líder natural en el experimento internacional CTA. El grupo

de ANAIS en Canfranc es también uno de los grupos con más experiencia en Europa en detección de Materia Oscura y sin duda formará parte del núcleo inicial de EUREKA cuando se apruebe. El grupo de ANTARES es un grupo grande y consolidado, lo que no está claro es que Km³NeT termine haciéndose en el Mediterráneo. Finalmente, el grupo español de CDMS es pequeño pero está en un experimento internacional puntero, por lo que una pequeña inversión de personal puede dar grandes beneficios, aunque no llegue a ser líder del experimento.

Los grupos españoles trabajando en detección directa o indirecta de Materia Oscura son relativamente pequeños en comparación con sus equivalentes en países de nuestro entorno como UK, Francia y Alemania. De cara al futuro, quizá el experimento CTA es el que tiene más posibilidades de dar lugar a un co-liderazgo español, de la mano del grupo del IFAE. El resto de los grupos necesitan un incremento significativo de personal para empezar a tener peso en los proyectos internacionales, incluso europeos.



5.6. Simulaciones cosmológicas

Los proyectos actualmente consolidados han sido enumerados más arriba en la sección 3.6. En este campo el *hardware* y el *software* están fuertemente correlacionados. Se necesita invertir en *manpower*. Se necesita formar equipos competitivos y sostenibles, que incluyan al mismo tiempo científicos e ingenieros de primera línea, tal como se está haciendo en otros países de nuestro entorno por motivos estratégicos. Para ello es necesario incrementar la dotación en personal de ambos tipos.

El desarrollo de códigos es cada vez más importante desde el punto de vista estratégico, tal como recoge el informe de ASTRONET (pág. 156). En este campo, en el que existe tradición en España, para poder optimizar el aprovechamiento de las grandes posibilidades que ofrece hoy el hardware de hipercomputación, los equipos científicos necesitan absolutamente la

incorporación de ingenieros informáticos, lo mismo que lo necesitan los equipos que desarrollan instrumentación astronómica. El *asesoramiento (externo)* prestado por el BSC-CNS ha posibilitado proyectos importantes de los equipos españoles. Pero para seguir siendo competitivos es preciso ahora la *incorporación* de forma sostenible y estructurada de algún profesional de alto nivel en los equipos.

En España existen profesionales de ambos tipos de altísimo nivel. Quisiéramos recordar el carácter multidisciplinar de la hiper/supercomputación, y el carácter estratégico de su desarrollo, que sin duda **vertebrará y condicionará cualquier desarrollo empresarial tecnológico de I+D+i en el futuro**. También, que España está muy bien situada en este campo, y que, concretando al campo de sus aplicaciones a la Astrofísica y Cosmología, se requiere un esfuerzo

adicional, no muy costoso, por parte de los poderes públicos en una inversión limitada y altamente rentable, para crear equipos con perspectivas de sostenibilidad.

Finalmente, cabe destacar la importancia del Observatorio Virtual (VO) como e-infraestructura de investigación, que ha sido claramente identificada por la Unión Europea la cual ha venido apoyando el desarrollo y puesta en operación del Observatorio Virtual europeo desde 2006 a través de diferentes proyectos de los programas marco VI y VII. El Observatorio Virtual español juega un papel importante a nivel internacional y ha estado y está presente en muchos de los grandes consorcios nacionales (Consolider-GTC, J-PAS, ...). Por tanto, identificamos como acción estratégica para el futuro mantener y fomentar el desarrollo y uso del VO y de las grandes bases de datos astronómicas.

6. Actualización en 2020 de esta sección¹

1. Fondo Cósmico de Microondas

Después del avance conseguido por la misión Planck de la ESA, confirmando el modelo Λ CDM con una precisión en sus parámetros mejor o del orden del 1%, en mayo de 2019 la misión LiteBIRD de JAXA ha sido seleccionada para ser lanzada en 2027. Su principal objetivo es la detección de la huella dejada por las ondas gravitacionales primordiales predichas por la inflación cósmica en los modos B de polarización del CMB. En esta misión internacional participan los grupos españoles del IFCA, IAC y IDR/UPM.

En relación con experimentos desde tierra, cabe destacar el fuerte desarrollo experimental de los últimos años en Atacama (CLASS, ACT, POLARBEAR/Simons Array, Simons Observatory) y el Polo Sur (BICEP3, BICEP Array, SPT, SPO), con experimentos liderados por grupos de EEUU albergando decenas de miles de detectores y que están bien en operación o en construcción. La continuación de estos experimentos será CMB-S4, el experimento definitivo terrestre del CMB con medio millón de detectores que se espera comience a operar en 2027.

La contribución española sigue centrada en QUIJOTE, que recientemente ha producido los mejores datos a bajas frecuencias con el

instrumento MFI (10-20 GHz), y ha comenzado a observar con el nuevo instrumento TFGI (25-47 GHz). Estos datos se complementarán con dos nuevos experimentos en el Observatorio del Teide: LSPE-STRIP (bandas de 40 y 90 GHz) y Groundbird (bandas de 145 y 220 GHz). El liderazgo en la baja frecuencia se espera consolidar con un nuevo instrumento MFI2 para QUIJOTE y con el futuro proyecto europeo ELFS (European Low Frequency Survey), que complementará a los futuros experimentos terrestres y desde satélite, observando entre 10-120 GHz en todo el cielo con telescopios de clase 6-m.

2. Cartografiados de galaxias

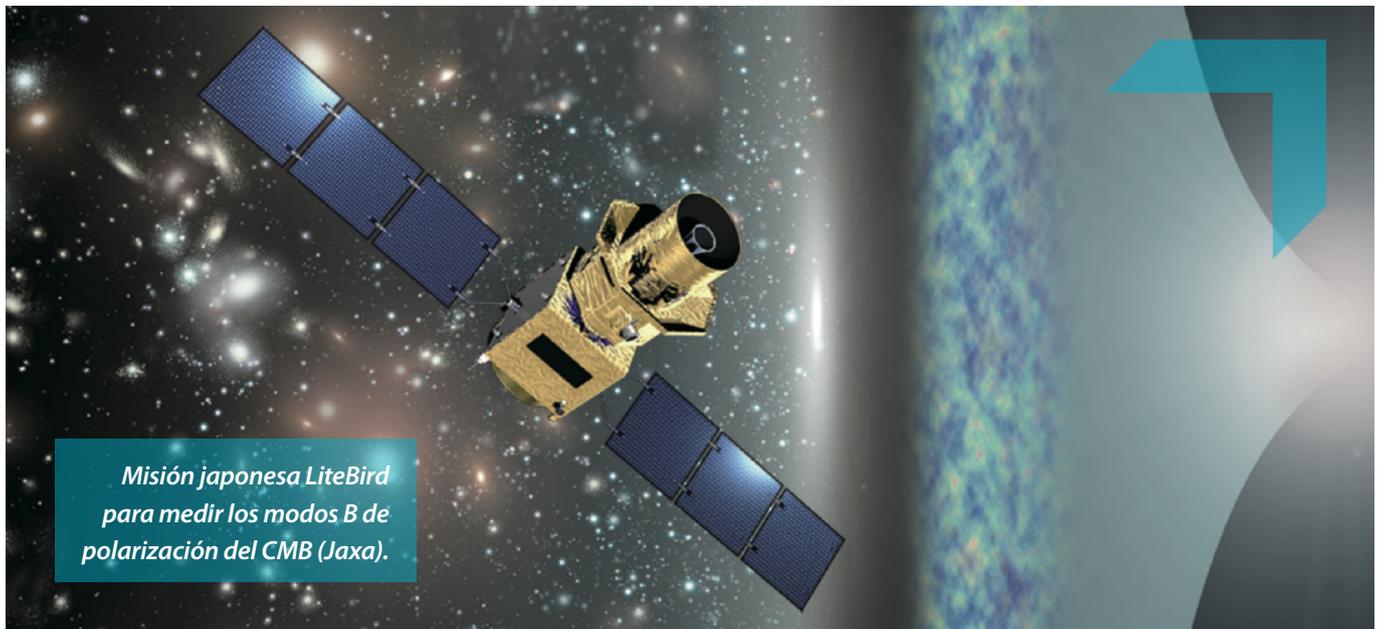
Durante estos últimos años, los grandes cartografiados en funcionamiento han estado recopilando nuevos datos y publicando sus resultados; y los proyectos de futuro han continuado avanzando en sus fases de implementación. Dentro de los cartografiados espectroscópicos, BOSS y eBOSS han determinado y determinarán la escala de las oscilaciones acústicas de bariones (BAO) en un gran rango de redshifts. Ambos proporcionan una de las ligaduras a parámetros cosmológicos utilizadas en la mayoría de los análisis actuales. Otros proyectos espectroscópicos como DESI, PFS, WEAVE y 4MOST se encuentran

en sus últimas fases de construcción e implementación y comenzarán pronto a tomar datos.

En el apartado los cartografiados de imagen, DES, KiDS/Viking y HSC/Subaru han concluido con su toma de datos (excepto el último) y han empezado a publicar sus datos. Estos cartografiados, midiendo efectos de lente gravitacionales débiles en grandes áreas del cielo, proporcionan nuevas ligaduras a los modelos cosmológicos, en particular, en la densidad de materia, Ω_M y en la amplitud de fluctuaciones, σ_8 . En la actualidad sus resultados producen discrepancias con las mediciones basadas en los datos del CMB. El futuro en esta área es el cartografiado LSST que comenzará en breve.

Una parte esencial en el análisis de estos cartografiados de imagen es la determinación de redshifts fotométricos. En ese apartado, los nuevos cartografiados utilizando filtros estrechos que permiten una mejor medida de los redshift fotométricos son importantes y numerosos en nuestra comunidad, convirtiéndola de hecho en referente internacional de esta disciplina: ALHAMBRA, SHARDS, PAUS, J-PLUS y J-PAS. ALHAMBRA y SHARDS ya finalizaron su toma de datos y buena parte de sus publicaciones. PAUS y J-PLUS llevan unos años re-

¹ La presente actualización de la sección de Cosmología del estudio de prospectiva de la RIA, finalizado en 2015, consiste en un breve resumen de los hechos más relevantes acontecidos desde entonces. Se han actualizado los 6 temas en los que se dividió el estudio de prospectiva de Cosmología en 2015, siendo los autores de la actualización Enrique Martínez-González (1), Francisco Javier Castander (2,6), Diego Herranz (3), Evencio Mediavilla (4) y Juan García-Bellido (5).



Misión japonesa LiteBird para medir los modos B de polarización del CMB (Jaxa).

copilando datos. El primero ha demostrado que puede determinar redshifts con la precisión predicha y pronto empezará a publicar sus resultados científicos. El segundo, con más de 2000 grados cuadrados observados, confirma las expectativas científicas en su primera decena de artículos publicados. El cartografiado J-PAS empezará a tomar datos de modo sistemático con JPCam en un futuro inminente. En 2019 se hizo público el primer grado cuadrado de J-PAS con sus 59 filtros, confirmando las prestaciones científico-técnicas del sistema y la precisión prevista en los redshift fotométricos.

La nueva etapa de grandes cartografiados vendrá con los que se desarrollen desde el espacio. La misión espacial europea Euclid tiene una fuerte participación española. Su lanzamiento está previsto para el año 2022 y aportará datos de espectroscopía e imagen sin precedentes hasta la fecha. El proyecto equivalente americano es WFIRST con un lanzamiento previsto en la segunda parte de la década de los 2020.

3. Astronomía de 21 centímetros

En junio de 2018 España ha pasado por fin a formar parte de los países miembros de SKA convirtiéndose así en el undécimo país miembro. Actualmente 29 investigadores de doce centros españoles (IAA, IAC, IFCA UC-CSIC, IFIC UV-CSIC, USAL, UGR, IEEC, OAN, CAB-INTA, IRAM, ESAC/ESA, CEFCA) participan en nueve de los once principales grupos científicos del SKA.

En el momento de realizar este informe los principales precursores (ASKAP, HERA, MWA, MeerKAT) y pathfinders (LOFAR, eEVN, e-MERLIN, CHIME, etc) de SKA han entrado en funcionamiento, proporcionando ya descubrimientos que vaticinan una nueva era de oro de la radioastronomía: desde las primeras imágenes en muy alta resolución del centro de nuestra galaxia obtenidas recientemente por MeerKAT a la detección y estudio de más una veintena de estallidos rápidos de radio (FRB, por sus siglas en inglés) mediante ASKAP, doblando el número existente de tales sucesos obser-

vados hasta la fecha y ayudando a resolver el misterio de los "bariones perdidos".

Pero tal vez el resultado más relevante hasta la fecha haya sido la observación por parte del experimento EDGES (parte del precursor ASKAP) de una absorción en la señal global de 21cm en torno a 78 MHz que podría deberse a la aparición de las primeras estrellas a $z \sim 15-20$. De confirmarse, estaríamos ante la primera observación directa del "amanecer cósmico".

4. Primera luz

A la espera de los resultados de la futura instrumentación que desarrollará grandes programas observacionales para estudiar las primeras estrellas y galaxias (e.g. JWST, ELT, con una importante participación Española en MIRI, NIRSPEC y HARMONI), ha habido en los últimos años resultados muy destacados. La detección de la absorción en 21 cm con un redshift $z \sim 18$ mencionada en el apartado anterior es, sin duda, una de ellas. También se han publicado importantes avances en la identificación de

estrellas extremadamente pobres en metales que pueden informarnos sobre los procesos de formación de sus progenitores. Planck ha aportado uno de los resultados más notables, combinando observaciones del CMB (temperatura y polarización) que han permitido describir la historia de la reionización en función del redshift. Estos resultados de Planck (específicamente la posibilidad de que la reionización se produjera a $z=8.8$) han generado una interesante discusión sobre el posible papel dominante de los cuásares y otros AGNs en la generación de la radiación ionizante.

Sin embargo, otras evidencias como la detección en imágenes profundas del HST de galaxias a alto redshift magnificadas por el efecto lente gravitatoria apuntan a un papel relevante de las galaxias de baja luminosidad en la reionización del universo. Finalmente, a pesar de las técnicas desarrolladas y puestas en práctica para medir su masa con mayor precisión en un número cada vez mayor de objetos, el origen de los agujeros negros supermasivos que residen en el centro de las galaxias y su co-evolución con los bulbos de las galaxias, siguen siendo intrigantes sobre todo cuando hay evidencias de la presencia de estos agujeros negros a redshifts altos ($z>6$).

A este respecto, la detección por LIGO de agujeros negros de masa inesperada y spin cero, comentada en el siguiente apartado, añade grandes interrogantes sobre la formación y crecimiento de los agujeros negros.

5. Materia Oscura

Desde 2015 las perspectivas en el campo de detección de materia oscura han cambiado dramáticamente. La ausencia de señales por

las tres vías complementarias de detección directa (Super-CDMS, Xenon-1T, LUX, etc.), detección indirecta (Fermi-LAT, MAGIC, HESS, etc.) y en aceleradores (LHC), varios órdenes de magnitud por debajo de las expectativas, han supuesto un varapalo a la idea de materia oscura en forma de partículas de tipo WIMP.

Aún así, hay varios proyectos aprobados y en construcción para la búsqueda de axiones, como el experimento IAXO del CERN, en el que participan grupos españoles como el de la Univ. Zaragoza. Desde 2015 los datos del experimento ANAIS de Canfranc han sido analizados y descartan concluyentemente la supuesta detección de materia oscura por DAMA-NaI.

Por otra parte, la detección de ondas gravitacionales por los interferómetros LIGO-Virgo han abierto la posibilidad de testar la idea de que la materia oscura esté compuesta en parte o en su totalidad por agujeros negros primordiales, formados en el origen del universo. Esto ha generado una enorme expectativa y se han propuesto varios experimentos de microlentes gravitacionales con cartografiados galácticos como DES y LSST, fluctuaciones de microcausticas a distancias cosmológicas con HST y JWST, así como interferómetros de tercera generación bajo tierra, como el Einstein Telescope (EU) y el Cosmic Explorer (USA), y la misión espacial Laser Interferometer Space Antenna de la ESA-NASA.

6. Simulaciones cosmológicas

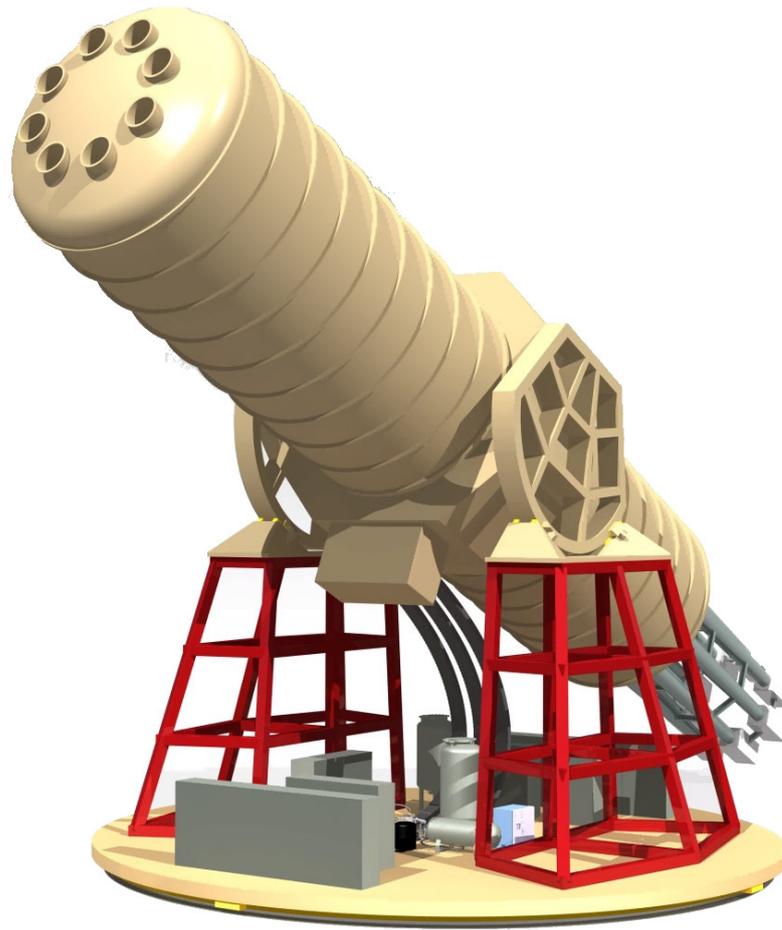
El campo de la supercomputación ha continuado avanzando en estos últimos años con supercomputadores más potentes que han permitido la producción de mejores simulaciones cosmo-

lógicas. Respecto a 5 años atrás, las capacidades en capacidad de computación (Flops) se han multiplicado por aproximadamente un factor 4 en los mayores supercomputadores. En España, la red de supercomputación agrupa a 12 supercomputadores, siendo MareNostrum del BSC el más potente con unos 10 PetaFlops.

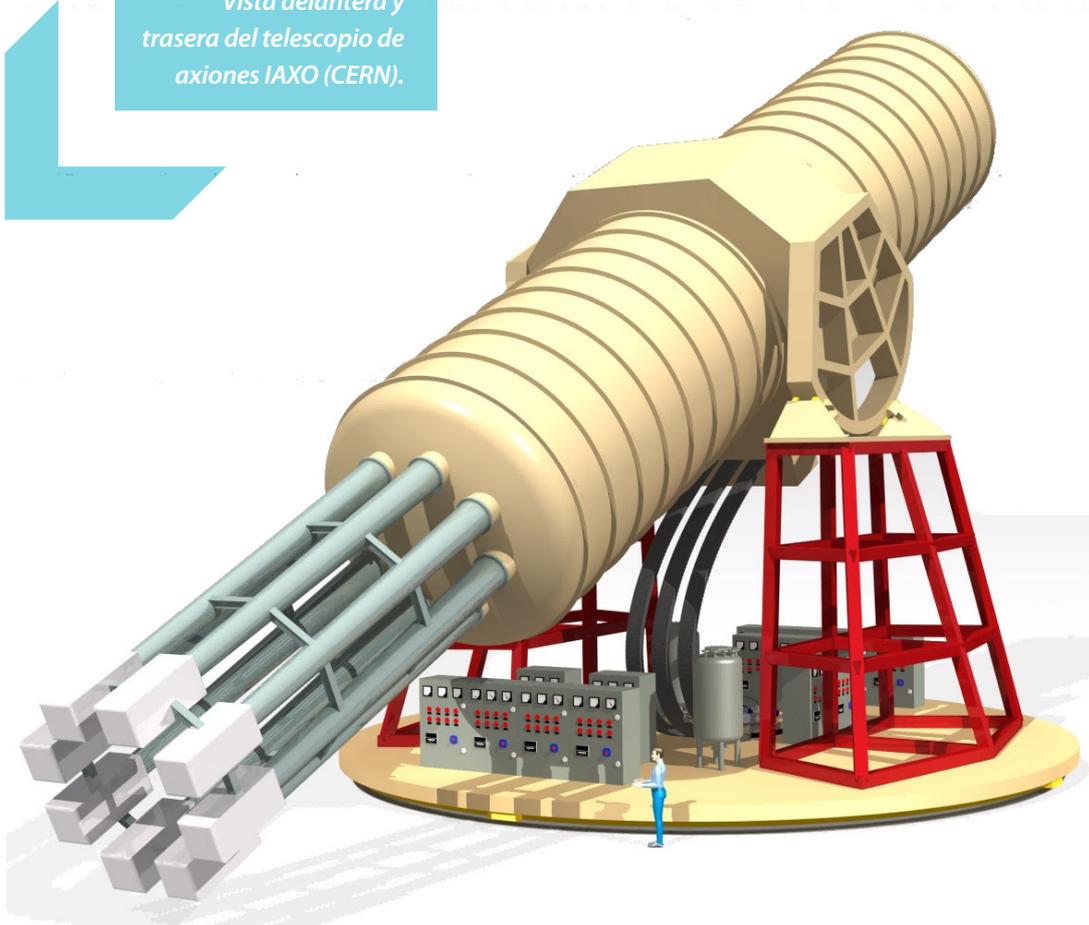
Las simulaciones de N-cuerpos más grandes que se han corrido hasta la fecha incluyen: Euclid Flagship, Outer Rim, MultiDark, Abacus, Millenium XXL, JUBILEE, Dark Sky, MICE; y también re-simulaciones de volúmenes pequeños como: Aquarius, Via Lactea-II, GHALO, CLUES. Dentro de las simulaciones hidrodinámicas las simulaciones más importantes son las de los grupos de EAGLE, Illustris y Horizon.

Todas ellas han aportado avances para entender la formación de galaxias, la evolución del universo y la planificación y análisis de los grandes cartografiados. En particular, el cálculo de las matrices de covarianza para el análisis de datos de cartografiados cosmológicos requieren de muchas simulaciones, por lo que se han desarrollado métodos para producir muchas simulaciones de manera rápida con métodos aproximados como COLA, PATCHY, EZmock, PTHalos, PINOCCHIO, QPM, HALOgen.

Otros avances incluyen simulaciones de diversos modelos de energía oscura y de gravedad modificada. La comunidad española participa, y en algunos casos lidera, algunos de estos desarrollos de simulaciones como Euclid-Flagship, MultiDark, UNIT, GALFOBS, MASLET, THE THREE HUNDRED, CLUES, MICE. Y también métodos aproximados como PTHalos, L-PICOLA, ICECOLA, PATCHY, EZmocks y HALOgen.



Vista delantera y trasera del telescopio de axiones IAXO (CERN).



*Imagen del cúmulo de galaxias SDSS J0333+0651
tomada por el telescopio espacial Hubble
(créditos: ESA/Hubble & NASA).*



Estudio de la Galaxia y las galaxias externas

Índice

1. INTRODUCCIÓN p. 44

2. OBJETIVOS CIENTÍFICOS PARA LA DECADA p. 44

2.1. Formación y evolución de galaxias p. 44

2.1.1. Poblaciones estelares y
evolución química y dinámica
de galaxias p. 44

2.1.2. Galaxias activas p. 46

2.1.3. Formación estelar y medio
interestelar en galaxias. Astroquí-
mica extragaláctica p. 48

2.1.4. Grupos y cúmulos de gala-
xias. Influencia del entorno en la
evolución de las galaxias p. 50

2.1.5. Galaxias a alto corrimiento
al rojo (redshift) p. 51

2.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos p. 52

2.2.1. Arqueología galáctica p. 52

2.2.2. Estructura y dinámica del
disco galáctico p. 53

2.2.3. El centro galáctico: forma-
ción estelar y poblaciones estela-
res en un entorno singular p. 54

2.2.4. Formación, evolución y disrup-
ción de sistemas estelares p. 55

3. ESTADO ACTUAL p. 56

3.1. Formación y evolución de galaxias p. 56

3.1.1. Poblaciones estelares y
evolución química y dinámica
de galaxias p. 57

3.1.2. Galaxias activas p. 58

3.1.3. Formación estelar y medio
interestelar en galaxias. Astroquí-
mica extragaláctica p. 60

3.1.4. Grupos y cúmulos de gala-
xias. Influencia del entorno en la
evolución de las galaxias p. 61

3.1.5. Galaxias a alto corrimiento
al rojo (redshift) p. 62

3.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos p. 62

4. NECESIDADES INSTRU- MENTALES p. 64

4.1. Formación y evolución de galaxias p. 64

4.1.1. Poblaciones estelares y
evolución química y dinámica
de galaxias p. 64

4.1.2. Galaxias activas. p. 66

4.1.3. Formación estelar y medio
interestelar en galaxias. Astroquí-
mica extragaláctica. p. 68

4.1.4. Grupos y cúmulos de gala-
xias. Influencia del entorno en la
evolución de las galaxias p. 69

4.1.5. Galaxias a alto corrimiento
al rojo (redshift) p. 70

4.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos p. 71

4.2.1. Arqueología galáctica p. 71

4.2.2. El centro galáctico p. 73

5. PROYECTOS CONSOLIDA- DOS Y ACCIONES ESTRATEGI- CAS PARA EL FUTURO p. 74

5.1. Formación y evolución de galaxias p. 74

5.1.1. Poblaciones estelares y
evolución química y dinámica
de galaxias p. 74

5.1.2. Galaxias activas p. 75

5.1.3. Formación estelar y medio
interestelar en galaxias. Astroquí-
mica extragaláctica p. 76

5.1.4. Grupos y cúmulos de gala-
xias. Influencia del entorno en la
evolución de las galaxias p. 76

5.1.5. Galaxias a alto corrimiento
al rojo (redshift) p. 77

5.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos p. 78

1. Introducción

El presente informe explora el estudio sobre La Galaxia y las galaxias externas desde cuatro vertientes: los retos científicos actuales (objetivos), el estado actual del tema en cuestión (estado actual), la instrumentación requerida para alcanzar los objetivos planteados (necesidades instrumentales) y las posibles acciones a emprender durante la próxima década por grupos ya

consolidados en nuestro país (proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro).

El informe se estructura en dos grandes bloques: Formación y evolución de galaxias y La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos, con las apropiadas subdivisiones que intentan incluir el amplio rango de temas involucrados.



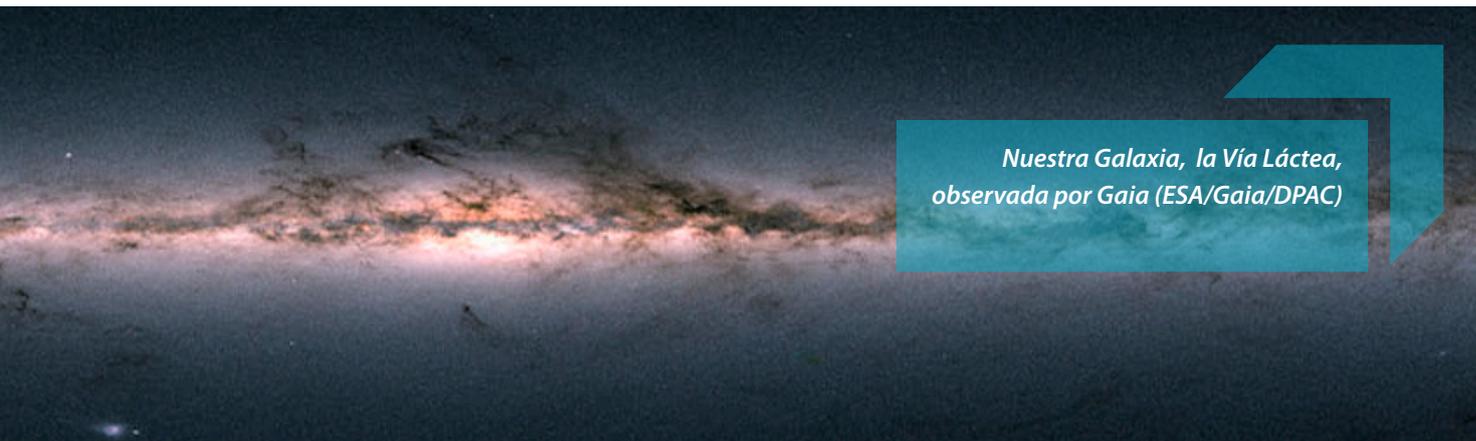
2. Objetivos científicos para la década

2.1. Formación y evolución de galaxias

2.1.1. Poblaciones estelares y evolución química y dinámica de galaxias

Conocer cuál es la trayectoria evolutiva que siguen las galaxias desde su formación hasta la época actual es uno de los retos más importantes a acometer durante la próxima década y la consecución parcial de este objetivo puede plantearse desde el intento de dar respuesta algunas de las siguientes preguntas:

- ¿Cómo se formaron las galaxias tras la época de re-ionización? ¿Cuál es el origen de la actual secuencia de Hubble?
- ¿Qué sucede dentro de las galaxias en el universo temprano y cómo se compara con lo que conocemos de las galaxias en el universo cercano donde podemos observar las velocidades de las estrellas y el gas en gran detalle?
- ¿Es el modelo cosmológico estándar (LCDM) compatible con el actual conjunto de datos? ¿Qué restricciones se pueden imponer a este modelo desde el punto de vista observacional?
- ¿Cuáles son las escalas temporales de consumo de gas y cuáles son las eficiencias de formación estelar en diferentes poblaciones de galaxias?



*Nuestra Galaxia, la Vía Láctea,
observada por Gaia (ESA/Gaia/DPAC)*

- ¿Cómo se puede trazar la formación estelar y de galaxias a lo largo de la historia del universo?
- ¿Cuál es la masa de una galaxia y cómo influye este parámetro en el resto de sus propiedades y en sus caminos evolutivos? ¿Cuál es la relación existente entre la cinemática de las estrellas y el gas y cómo describen éstas el estado dinámico de las galaxias?
- ¿Cuál es el papel de las galaxias enanas en la construcción de las galaxias masivas? ¿Cuál es el origen de las galaxias masivas observadas a alto desplazamiento al rojo?
- ¿Cómo se forman las galaxias espirales y cuál es el papel de sus componentes estructurales en su posterior evolución?
- ¿Cómo se ensambla la estructura y la dinámica de los diferentes tipos de galaxias? ¿Cómo pueden transformarse las galaxias a través de una evolución secular o de múltiples interacciones?
- ¿Cuál es el papel de los procesos menores de acreción o fusiones importantes de galaxias?

- ¿Cómo se desarrolla el proceso de acreción de gas y cuáles son sus consecuencias?

La mayor parte de la materia bariónica que ha constituido parte de las galaxias en algún momento se encuentra en la actualidad en forma de estrellas. Por lo tanto, las poblaciones estelares contienen, a través de sus abundancias químicas y sus distribuciones espaciales, información relativa a la historia de la masa bariónica de las galaxias y a su evolución temporal a través de complejos procesos de formación estelar.

El estudio de las poblaciones estelares de los diferentes tipos de galaxias y de la interrelación de estrellas, gas y polvo requiere la interpretación de observaciones obtenidas por telescopios de gran apertura y en un amplio rango de longitudes de onda, desde el UV extremo hasta las ondas de radio. Sin embargo, se puede obtener información muy relevante mediante el uso de la instrumentación adecuada instalada en telescopios de apertura mediana (de 2 a 4m) en muestras selectas de galaxias cercanas. De hecho, estos estudios son indispensables para poder interpretar correcta-

mente la gran cantidad de datos que se espera obtener a partir de los extensos cartografiados ya disponibles o a realizar en el futuro.

La espectroscopía de resolución moderada permite realizar en el universo local un examen crítico de los mecanismos físicos que participan en los procesos globales de formación y evolución de galaxias tales como: fusiones, brotes de formación estelar, núcleos galácticos activos, retroalimentación por supernovas, flujos refrigerantes etc ... Esto es crucial para interpretar después la información, mucho menos detallada, que se obtiene para galaxias más lejanas, a alto desplazamiento al rojo, para así poder construir una imagen coherente de la evolución de las galaxias a través del tiempo cósmico. Los estudios dinámicos requieren, además, la obtención de imágenes de alta resolución espacial hasta una escala de 0.01 segundos de arco.

Hasta ahora, las propiedades derivadas espectroscópicamente a través de las galaxias se han venido caracterizando mediante distribuciones radiales. Sin embargo, esto en realidad responde a una limitación observacional derivada de

la necesidad del uso de aperturas fijas y/o espectroscopía de larga rendija. Afortunadamente, el advenimiento de espectrómetros multi-rendija (MOS), unidades de campo integral (IFU) con gran campo de visión (FoV) y cámaras ópticas multi-filtro amplio campo de visión ofrece la oportunidad de obtener una nueva generación de observaciones basadas en muestreos que contabilizan cientos de regiones de hidrógeno ionizado (HII) y proporcionan una completa cobertura de las galaxias en dos dimensiones.

Por otra parte, las galaxias no son completamente simétricas con respecto a un eje; por ejemplo, la existencia de

los brazos espirales cambia el escenario en el cual una única dimensión es suficiente para explicar lo que sucede en el disco de una galaxia. En realidad, esto requiere una descripción bidimensional completa de modo que los brazos espirales, las barras y cualesquiera otras estructuras presentes, tales como las que aparezcan como consecuencia de interacciones o fusiones puedan ser tenidas en cuenta.

La técnica desarrollada recientemente de la espectroscopía de campo integral (IFS) ha abierto una nueva ventana a la investigación en el campo de la evolución de las galaxias permitiendo el

paso de una descripción unidimensional a otra en dos dimensiones. Las observaciones con IFS pueden complementarse con datos multi-filtro, que compensan su resolución espectral limitada ($R \sim 20-50$) con una mayor resolución espacial ($\sim 1''$ o mejor) y un campo de visión contiguo de varios grados cuadrados. Teniendo en cuenta los ambiciosos cartografiados a realizar usando estas técnicas en un futuro próximo, nos encontramos ahora en el momento adecuado para diseñar las metodologías, herramientas y técnicas necesarias para acometer muchos problemas científicos cuyo estudio puede proporcionar importantes avances en el campo.

2.1.2. Galaxias activas

Una fracción considerable de galaxias, conocidas como Núcleos Galácticos Activos (AGN), alberga potentes fuentes de energía en sus centros cuyo origen no se puede adscribir solamente a las estrellas allí presentes. Estos núcleos emiten radiación en todos los rangos de energía y abarcan un enorme abanico de luminosidades, con LINERs, galaxias Seyfert y cuásares (QSOs) en orden de menor a mayor luminosidad. Actualmente, se cree que la energía emitida por estos objetos la proporciona la acreción de materia por un agujero negro supermasivo (SMBH) situado en el centro de la galaxia huésped. Esta materia, que ha perdido su momento angular, se mueve en espiral alrededor del SMBH formando un disco de acreción. En las proximidades del SMBH,

las partículas relativistas son aceleradas y colimadas a lo largo de las líneas de intensos campos magnéticos en las partes internas del disco y son eyectadas a lo largo del eje de rotación del sistema formado por el disco y el SMBH, dando lugar a los chorros relativistas extendidos que se observan en un cierto número de AGN, pero:

- ¿Qué mantiene a estos chorros colimados a lo largo de grandes distancias (alrededor de 100 kpc)?
- ¿Cuál es el mecanismo de aceleración de partículas en chorros y lóbulos de galaxias activas? ¿Cuál es el origen de los rayos cósmicos de más altas energías?

En la actualidad se piensa que todas las galaxias con bulbos

masivos hospedan un SMBH en su centro y que la masa de este SMBH es proporcional a la masa del bulbo en que residen, estableciéndose así una relación entre estas masas que se mantiene en un rango que cubre más de cuatro órdenes de magnitud en masa. Esta relación parece sugerir que el crecimiento del SMBH se ha producido al mismo ritmo que el propio crecimiento del bulbo de la galaxia. El paradigma actual postula que la acumulación de materia en el bulbo se detiene por efecto del propio AGN (retroalimentación) a través de la interacción del jet con el gas que rodea al SMBH y/o la potente radiación emitida por el AGN. Sin embargo, este paradigma actual no está exento de problemas. Algunas preguntas básicas que surgen son:

- ¿Cuál es el origen de los SMBH?
- ¿Cuáles son las características de los SMBH situados en los centros de las galaxias? ¿Cuál es su conexión con las propiedades de la galaxia que lo alberga?
- ¿Cuál es el mecanismo que controla la relación entre la masa del agujero negro y la dispersión de velocidades en los centros de las galaxias?
- ¿Cuál es el mecanismo de acreción dominante en AGN? ¿Es la física de la acreción universal? ¿Existe algún tipo de evolución entre los diferentes tipos de AGN?
- ¿Está el modelo unificado totalmente comprobado? ¿Cuáles son los parámetros más importantes en este modelo unificado?

Los AGN de más alta luminosidad parecen haber sido mucho más numerosos en el universo

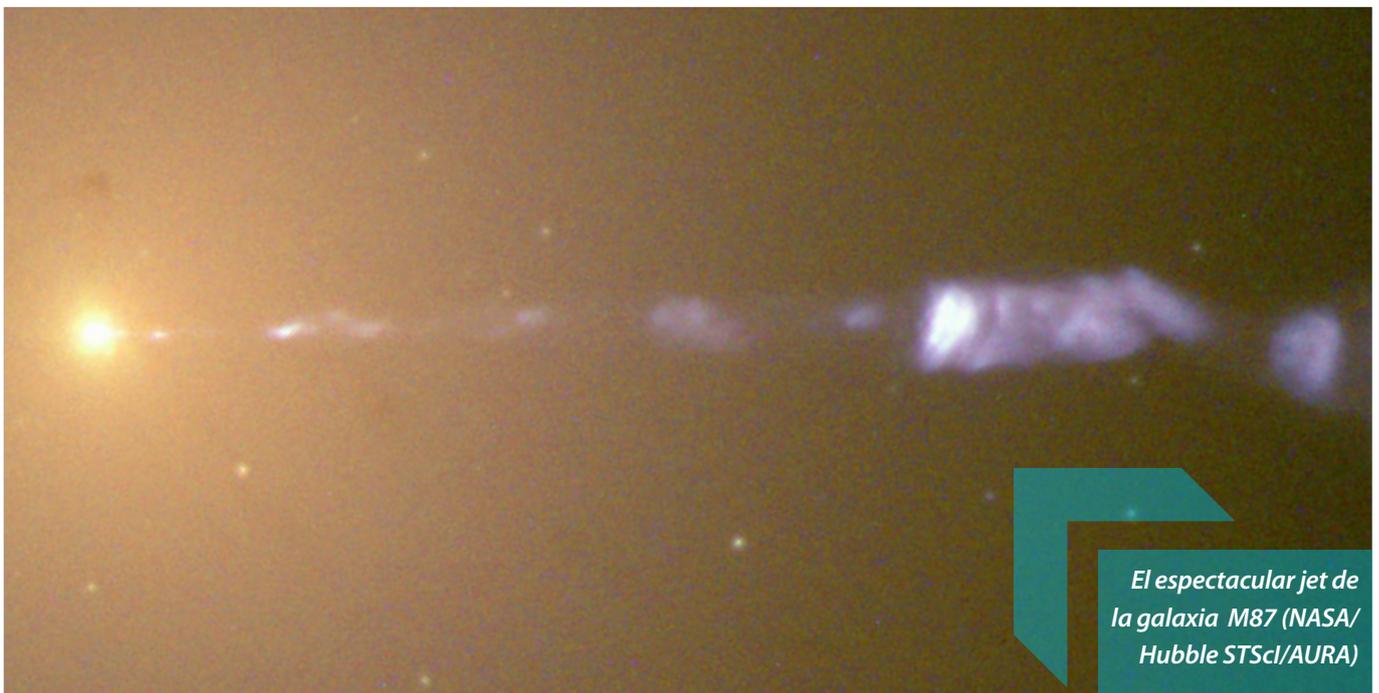
temprano y esto sugiere que (1) los SMBH se formaron en las primeras épocas del universo; y (2) que las condiciones necesarias para la formación de un AGN (por ejemplo, la disponibilidad de gas frío cerca de los centros de las galaxias) eran más comunes en el pasado.

También parece sugerir que muchos objetos que fueron cuásares luminosos en el pasado, son en la actualidad AGN mucho menos luminosos o incluso objetos inactivos. La evolución de los AGN de baja luminosidad es mucho más difícil de establecer debido a la dificultad de observar estos objetos a elevados desplazamientos al rojo, debido a su menor luminosidad, y porque la contribución relativa de la galaxia huésped es mucho mayor. Por otra parte, actualmente se reconoce la existencia de una conexión estrecha entre formación estelar y "actividad" en los centros de galaxias aunque resulta difícil establecer una relación causa-efecto entre ambos procesos.

También en este contexto hay importantes preguntas a responder:

- ¿Cómo es la evolución con el tiempo cósmico de la población de AGN?
- ¿Cuál es la conexión entre SMBH y formación estelar en galaxias y cómo afecta esta conexión a su formación y evolución en el tiempo?

Un estudio adecuado de esta conexión requiere observaciones espectroscópicas con alta resolución espacial y espectral que permita la obtención de información cinemática de modo que se pueda estudiar de forma adecuada las propiedades físicas del gas y las estrellas de cada una de las diferentes componentes cinemáticas identificadas. En ausencia de observaciones espacialmente resueltas, la conexión entre la emisión en el IR y en ondas de radio para galaxias fuertemente emisoras es sin duda uno de los elementos que más información puede proporcionar.



El espectacular jet de la galaxia M87 (NASA/Hubble STScI/AURA)

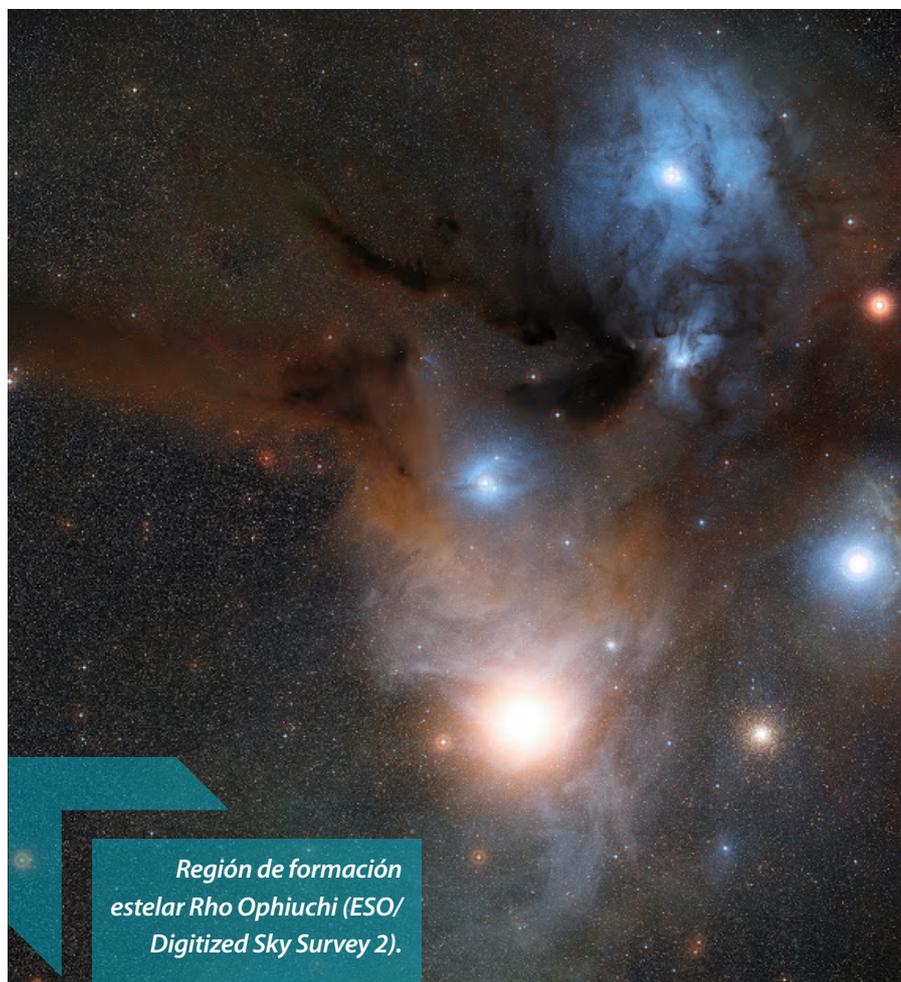
2.1.3. Formación estelar y medio interestelar en galaxias. Astro-química extragaláctica

Los procesos de formación estelar juegan un papel clave en la evolución cósmica de las galaxias. La formación estelar parece haber sido más elevada en el pasado que en la actualidad y la existencia de una estrecha relación entre la historia de la tasa de formación estelar promedio del universo y su contenido en masa y metales está ampliamente aceptada. Una gran parte de las galaxias con formación estelar activa son sistemas dominados por gas y por la luz emitida por grandes y masivos cúmulos de estrellas. Estos objetos con brotes de formación estelar extremos, conocidos bajo el nombre de

“Starbursts”, pueden ser muy luminosos y representan un modo de formación estelar que parece ser ubicuo en el universo, y que está presente en objetos que van desde regiones HII extragalácticas en el universo local, hasta galaxias primigenias en el universo lejano que parecen datar de épocas próximas a la reionización. A menudo, se trata de objetos altamente oscurecidos y emiten una gran parte de su energía a longitudes de onda infrarrojas, clasificándose como galaxias luminosas o ultra-luminosas en el infrarrojo (LIRG y ULIRG respectivamente). Sufren una rápida evolución y son el foco de

muchos estudios, en particular a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas que nos permiten penetrar las capas masivas de gas y polvo existentes en estos objetos, y caracterizar las condiciones físicas extremas de sus regiones. Estos objetos pueden a su vez servir como ejemplos para entender las galaxias oscurecidas por polvo (DOGs) a elevados desplazamientos al rojo. Todavía no está claro cómo las propiedades detalladas de las galaxias con brotes de formación estelar extremos difieren de las correspondientes en galaxias normales y algunas de las preguntas clave están todavía sin responder:

- ¿Difieren las condiciones físicas del medio interestelar y su química, los procesos de formación estelar, la evolución de AGN en galaxias con formación estelar extrema de aquéllos en galaxias normales?



Región de formación estelar Rho Ophiuchi (ESO/ Digitized Sky Survey 2).



Las estrellas masivas son los agentes responsables del enriquecimiento químico del universo: evolucionan muy rápidamente, pierden una buena parte de su masa durante su evolución y finalizan su vida en explosiones de supernova retornando material reciclado al medio interestelar. Por tanto, el impacto de los starbursts en la evolución de las galaxias y por ende en la evolución cósmica del universo puede resultar de gran magnitud.

Sin embargo, la interrelación de los procesos de formación estelar con el gas molecular y neutro, el polvo y el contenido estelar en galaxias es compleja y difícil de configurar en sus detalles. La masa total en gas molecular es un parámetro clave en la evolución de galaxias con núcleo activo y/o formación estelar vigorosa y también de los vientos asociados con éstas, pero ¿cómo se pueden obtener estimaciones fiables de estas masas?; ¿se pueden derivar factores de conversión para distintos estimadores de masa de gas molecular (por ejemplo, CO, HCN, HCO⁺)?. Otras preguntas relevantes surgen:

- ¿Qué papel juegan las moléculas y el polvo en los mecanismos de retroalimentación presentes en las galaxias con intensos brotes de formación estelar?
- ¿Cuáles son las escalas temporales para el consumo de gas y las eficiencias de formación estelar en diferentes poblaciones de galaxias?
- ¿Cuál es el impacto de las propiedades de las nubes moleculares en la evolución de las galaxias?
- ¿Cuál es el papel evolutivo de las galaxias con brotes de formación estelar extremos ("starburst") en relación con las galaxias normales?
- ¿Cuáles son las especies moleculares y sus líneas de emisión claves para proporcionar diagnósticos certeros que permitan distinguir galaxias con brotes de formación estelar oscurecidos de galaxias con un núcleo activo (AGN)?

Por otra parte, el estudio y la comprensión de la formación estelar se completa con observaciones detalladas en el rango óptico que proporcionan información sobre la tasa de formación estelar (SFR) y las propiedades del medio interestelar, que puede obtenerse en un amplio rango de distancias de manera sistemática.

Arriba: Polvo en Corona
Australis (Créditos:
Loke Kun Tan).

2.1.4. Grupos y cúmulos de galaxias. Influencia del entorno en la evolución de las galaxias

En simulaciones numéricas de la evolución de la estructura a gran escala del universo, los cúmulos de galaxias aparecen situados en los nodos de la tela de araña cósmica. Con masas de hasta $10^{15} M_{\odot}$ representan las mayores estructuras colapsadas del universo. La dinámica de estos cúmulos está dominada por la alta densidad y la gran proporción de materia oscura en ellos y por los profundos potenciales gravitatorios existentes.

Estudios dinámicos muestran que alrededor del 80% de la masa de los cúmulos de galaxias se encuentra en forma de materia oscura. El resto consiste de masa

bariónica constituida principalmente de gas difuso a alta temperatura ($T \approx 10^7 \text{ K}$) que emite radiación X. Estos cúmulos proporcionan pues una gran oportunidad para investigar procesos fuera del equilibrio en astrofísica de plasmas. Pero a su vez permiten el estudio de lo que podemos llamar "ecosistemas astrofísicos", es decir un volumen que representa un denso microcosmos prácticamente desacoplado del Universo, constituyendo excelentes laboratorios para estudiar la evolución de las galaxias y sus interacciones en entornos de alta densidad. Estos estudios deberán dar respuesta a preguntas como:

- ¿Cuáles son los efectos del entorno en la evolución de las galaxias?
- ¿Cuál es la importancia relativa de los distintos procesos implicados?
- ¿De qué manera induce el entorno transformaciones morfológicas de galaxias?
- ¿Cómo es la evolución de las galaxias en grupos compactos?
- ¿Cuál es la historia de la producción de metales en galaxias y en el medio intergaláctico entre ellas?
- ¿Cómo evoluciona la estructura a gran escala del Universo?



*Fragmento del Hubble Ultra
Deep Field versión 2012
(NASA, ESA, R. Ellis -Caltech).*

2.1.5. Galaxias a alto corrimiento al rojo (redshift)

Hoy en día está comúnmente aceptado que tanto el ensamblaje de la mayor parte de la masa de las galaxias como la tasa de formación estelar en el universo y el crecimiento de los agujeros negros supermasivos en los centros de galaxias tuvieron lugar a *redshift* $z > 1$ y muestran un máximo a $z \sim 2$. Por lo tanto resulta crucial dar respuestas a preguntas básicas para alcanzar una comprensión completa de cómo procede la evolución de las galaxias:

- ¿Cómo se formaron y evolucionaron las primeras estrellas, galaxias y agujeros negros supermasivos?

- ¿Cómo contribuyeron al enriquecimiento en metales y a la producción de polvo?
- ¿Cuál fue su papel en la reionización del Universo?
- ¿Cómo se formaron y evolucionaron las primeras estructuras a gran escala?
- ¿De qué manera las interacciones entre galaxias han conformado el universo que observamos en la actualidad?
- ¿Hasta qué punto reproducen los modelos teóricos actuales las propiedades de las galaxias en el universo primitivo?

Durante los últimos años, estudios recientes han abordado estas cuestiones proporcionando información muy relevante. Exploraciones con HST como CANDELS, combinadas con observaciones procedentes de telescopios infrarrojos como Spitzer y Herschel han sido capaces de poner cotas a parámetros galácticos fundamentales como tasas de formación estelar, edades, metalicidades, masas y tamaños de galaxias a redshifts del orden de 2 y, en algunos casos, mayores. También las imágenes infrarrojas con alta resolución espacial obtenidas con HST están proporcionando una gran cantidad de información sobre el origen y la evolución de la secuencia de Hubble en el universo temprano. Estos avances en el terreno observacional están motivando en paralelo el desarrollo de trabajos teóricos, en particular simulaciones hidrodinámicas de alta resolución capaces de interpretar los datos y explicar cuáles son los agentes cósmicos que controlan la acumulación de masa de las galaxias, el crecimiento de sus agujeros negros centrales y las transformaciones morfológicas de galaxias durante la evolución del universo.



2.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos

El objetivo de la “cosmología local” (“near-field cosmology”) es dar respuesta a algunas de las preguntas mencionadas más arriba relativas a la formación y evolución de las galaxias, inspeccionando cuidadosamente, casi diseccionando, las galaxias cercanas, especialmente nuestra Galaxia y las galaxias pertenecientes al Grupo Local. De hecho, los mecanismos de formación y evolución de las galaxias se hallan codificados en la localización, cinemática y

química de las estrellas para la derivación de las cuales resulta crítica la obtención de la edad y la composición química de las estrellas, así como de las órbitas seguidas por ellas. Gaia, la misión espacial europea lanzada a finales de 2013, resultará fundamental en este contexto. Gaia producirá durante los cinco años que se espere dure la misión, datos de altísima calidad sobre posiciones y movimientos propios de alrededor de mil millones de estrellas de la Vía

Láctea con la finalidad de obtener un amplio censo de las órbitas, edades y composiciones químicas de las estrellas en nuestra Galaxia que haga posible la reconstrucción de la historia de su formación y su posterior evolución. Sin embargo, para un cierto número de objetivos, la misión Gaia podría no ser suficiente en sí misma y se beneficiará enormemente de información espectroscópica adicional procedente de telescopios anclados en tierra.



2.2.1. Arqueología galáctica

El origen y la evolución de las galaxias como nuestra propia Vía Láctea es una de las cuestiones fundamentales de la astrofísica moderna. En particular, los modelos de materia oscura fría predicen un escenario de agrupamiento jerárquico en el cual la historia del ensamblaje de una galaxia puede diferir en gran medida de la historia de formación estelar en la misma. Sin embargo, mientras que los modelos LCDM alcanzan un éxito notable en cuanto a la descripción de la estructura a gran escala del universo se refiere, este éxito no resulta comparable a escalas más pequeñas (grupos y cúmulos de galaxias) donde al

menos tres problemas potencialmente parecen emerger: 1) el número de galaxias satélites de la Vía Láctea es inferior al número de satélites que el modelo predice que deberían estar asociados al halo (Moore et al. 1999); 2) la relación masa-luminosidad de las galaxias no se ajusta a las predicciones; y 3) el momento angular por unidad de masa medido en la Vía Láctea es menor que el predicho por los modelos. Se han propuesto una gran variedad de mecanismos físicos con el fin de resolver estos problemas para así mantener los rasgos generales del escenario LCDM. Para discriminar entre estos posibles mecanismos, se

requiere un conjunto de datos observacionales que describan con la más alta de las precisiones los diferentes subsistemas galácticos que forman la Vía Láctea

- ¿Cómo se formó nuestra galaxia y cómo se formaron sus componentes? ¿Cuál ha sido el mecanismo de formación del halo estelar galáctico, in-situ o acreción?
- ¿Cuál es la distribución de materia oscura en la Vía Láctea? ¿Cómo se relaciona esta distribución con el paradigma CDM?
- ¿Cuál es la masa total de la Vía Láctea y la forma del potencial gravitatorio galáctico?

2.2.2. Estructura y dinámica del disco galáctico

En nuestros días, en la era de Gaia, debemos adoptar una aproximación holística para estudiar la evolución dinámica del disco de nuestra galaxia. Para ello han de desarrollarse complejos modelos quemo-dinámicos que nos permitan entender la interrelación dinámica y química de gas, estrellas y materia oscura, tanto en un escenario estático como también en un entorno cosmológico. Sin embargo, para proporcionar un marco autoconsistente deberíamos tener presente que tanto el número de parámetros libres del modelo como el número de observables que potencialmente pueden aportar restricciones al mismo, es enorme y requiere un complejo tratamiento. Como ejemplo, actualmente se cree que la mezcla radial de estrellas en el disco galáctico puede jugar un importante papel en la evolución quemo-dinámica del disco galáctico; sin embargo, aunque simulaciones hidrodiná-

micas y de N-cuerpos encuentran que esta mezcla radial podría ser considerable, sólo la comparación con las observaciones determinará finalmente la importancia de este fenómeno en la evolución del disco. El objetivo principal para la próxima década es obtener un censo completo de las órbitas, edades y composiciones químicas de las estrellas en el disco de nuestra propia galaxia. La misión Gaia se focalizará en los movimientos estelares, un elemento clave para la determinación de sus órbitas que a su vez es necesaria para la derivación del potencial gravitatorio total (a partir del cual podemos obtener la distribución de masa en la Vía Láctea y el contenido y la distribución de materia oscura). Para llevar a cabo este análisis, deberemos acometer, entre otros, estudios que nos proporcionen pistas sobre procesos dinámicos tales como el origen de las corrientes de estrellas observados en el espacio de las

fases y sus relaciones con las resonancias inducidas por los componentes no simétricos radialmente – los brazos espirales y las barras galácticas – o la caracterización dinámica de pasados eventos de acreción. Se requieren tanto métodos de cálculo computacional paralelo masivo como un enorme esfuerzo observacional para llevar a cabo este análisis. Nuestra aproximación holística para la próxima década requiere no sólo Gaia sino también misiones astrométricas futuras y exploraciones espectroscópicas desde tierra.

- ¿Cómo se formó el disco galáctico y cómo ha sido su posterior evolución?
- ¿Cuál es la naturaleza de los brazos espirales?
- ¿Se puede establecer un modelo quemo-dinámico realista del disco de nuestra Galaxia?

*Impresiones
artísticas de la Vía
Láctea vista de
perfil (ESO/NASA/
JPL/R. Hurt) y de
corrientes de marea
en la otra página
(Jon Lomberg)*



2.2.3. El centro galáctico: formación estelar y poblaciones estelares en un entorno singular

El centro galáctico (GC) es la región de la Galaxia con los más intensos campos de radiación, magnéticos y de marea, donde la extinción interestelar es muy elevada ($AV \sim 30$), el campo estelar muy poblado y existe un agujero negro masivo (Sagitario A*). También, por unidad de volumen, es la región más activa de formación estelar dentro de la Vía Láctea. Es por lo tanto un laboratorio crucial para el estudio de núcleos galácticos y su papel en el contexto de la evolución de galaxias, y para la investigación de la interacción entre agujeros negros masivos y su entorno, además de los procesos

de dinámica y formación estelar en sistemas densos. Sagitario A* nos permitirá realizar pruebas cruciales de la Relatividad General en el futuro a corto o medio plazo.

Adicionalmente, es de prever que el centro galáctico contenga una cantidad elevada de materia oscura cuya detección resulta fundamental para entender la formación y evolución galáctica. A altas energías, observaciones en rayos gamma nos pueden permitir realizar una búsqueda exhaustiva de aniquilación de partículas de materia oscura en el centro galáctico.

*Centro galáctico
observado en
el visible (ESO).*



2.2.4. Formación, evolución y disrupción de sistemas estelares

La mayor parte de la materia visible en el universo está condensada en estrellas, con densidades más de 30 órdenes de magnitud más elevadas que la densidad media del universo y 20 órdenes de magnitud más elevada que la densidad de las nubes interestelares a partir de las cuales se forman. Por lo tanto, una pregunta fundamental no es cómo los bariones terminan formando parte de las estrellas, si no cómo algunos de ellos permanecen en forma de gas interestelar caliente y de baja densidad. Este enigma yace en el corazón de una teoría predictiva de la formación estelar, uno de los objetivos principales de la astronomía moderna. Todavía estamos lejos de poseer una solución global a este problema complejo cuya respuesta depende en gran medida de la existencia de un conjunto de datos empíricos bien estructurado y completo, así como de la construcción de herramientas de simulación confiables y precisas.

En la actualidad, está ampliamente aceptado que las estrellas se forman en sistemas altamente jerarquizados que se parecen en cierto modo a la estructura escalonada del medio interestelar o, por lo menos, a la morfología de las regiones más densas. Este patrón jerárquico,

tanto espacial como temporal, presenta condensaciones singulares, los cúmulos estelares, cuyas características principales los hacen firmes trazadores de los procesos de formación estelar en galaxias. La estructura jerárquica se extiende desde complejos estelares (o grandes porciones de brazos espirales en galaxias "floculentas" o algodonas), y cúmulos embebidos, hasta estrellas individuales dentro de dichos cúmulos. La escala de los cúmulos es la mejor métrica para medir y analizar el rango espacial completo en la formación de sistemas estelares. El estudio de la formación de los cúmulos estelares y su conexión no lineal con los procesos que conducen a la generación de estrellas es un programa clave que se encuentra enmarcado en varios objetivos científicos:

- ¿Cuál es la influencia de la estructura geométrica de una nube donde se forman estrellas sobre la estructura espacial interna de la población estelar a la que dará lugar?; ¿cuál es su evolución temporal?; ¿cuáles son las variables internas y externas que controlan la eficiencia de la formación estelar en cúmulos?

- ¿Dónde y cómo se forman las estrellas masivas en la Galaxia?; ¿está la fracción de estrellas masivas ligada a la masa y/o la estructura espacial del sistema estelar donde se formaron?; ¿se forman las estrellas de baja y alta masa a través del mismo mecanismo aparte de un factor de escala?
- ¿Cómo se forman las estrellas dentro de un cúmulo?; ¿son coetáneas?; ¿cuán precisamente podemos medir las masas de estrellas individuales en un cúmulo?; ¿existe una masa estelar típica en los mismos?; ¿es ésta universal?. Y si es así, ¿qué significado tiene esto en términos físicos?

Estas preguntas se pueden enmarcar en cuatro líneas de investigación definidas:

- 1) Formación y evolución de cúmulos abiertos
- 2) Cúmulos globulares como trazadores de sistemas galácticos y de su evolución química.
- 3) El Cinturón de Gould y los grandes complejos estelares
- 4) Formación estelar a gran escala y su conexión con la estructura espacial y cinemática de la Vía Láctea.



3. Estado actual

3.1. Formación y evolución de galaxias

El avance experimentado en los últimos años en el campo de la formación y evolución de las galaxias se debe principalmente al desarrollo de instrumentación cada vez más sofisticada tecnológicamente, a una modelización cada vez más detallada de los distintos procesos físicos en juego, que permite la interpretación de las observaciones obtenidas, y a un esfuerzo cada vez mayor de combinar estos resultados con los obtenidos mediante simulaciones numéricas de resolución cada vez mayor. Un papel de primer orden corresponde sin duda al Telescopio Espacial Hubble (HST) y al muestreo espectroscópico de galaxias en el universo local (hasta redshift de 0.1 aproximadamente) proporcionado por el Telescopio de 2.5m de la Fundación Sloan (Sloan Digital Sky Survey; SDSS). Otros muestreos y cartografiados, si bien diseñados con otros objetivos, han proporcionado, y siguen proporcionando, datos de gran valor para el estudio de las propiedades de las galaxias. Un resumen de los cartografiados ya realizados o en marcha puede encontrarse en el informe del Panel de Cosmología.

La comunidad española ha adquirido ya una notable experiencia en la explotación de estos muestreos, liderando los proyectos ALHAMBRA (Advanced Large, Homogeneous Area Medium Band Redshift Astro-

nomical survey, <http://www.alhambrasurvey.com/>), llevado a cabo entre 2005 y 2012 desde el Observatorio Hispano Alemán de Calar Alto (CAHA) y disponible ya públicamente al conjunto de la comunidad astronómica, y CALIFA (Calar Alto Legacy Integral-Field-Spectroscopy Aerial survey; <http://califa.caha.es/>), programa de legado de CAHA recientemente completado. Investigadores pertenecientes a instituciones españolas han tenido también una participación activa en muestreos como z-Cosmos realizado con el instrumento VIMOS con VLT (ESO). En la actualidad existe representación española en proyectos como DESI, e-Boss y el futuro Euclid.

La observación desde el espacio, complementaria a la observación desde tierra permite realizar observaciones en dominios espectrales no alcanzables desde tierra y resultan imprescindibles para muchos de los estudios a realizar en el campo galáctico y extragaláctico, como también lo es la alta resolución espacial alcanzable con telescopios fuera de la atmósfera terrestre. La instrumentación espacial ha permitido un avance espectacular en las últimas décadas en todos los rangos del espectro y en muchos de los principales problemas astrofísicos, por ejemplo: (1) El telescopio espacial Hubble ha permitido obtener datos de imagen y



Representación artística de la formación estelar en una fase temprana del universo (créditos: Adolf Schaller/STScI).

espectroscopía de alta resolución angular en regiones espectrales no visibles (UV) o difíciles de observar desde tierra (IR cercano); (2) Los telescopios infrarrojos espaciales han permitido obtener imágenes y espectroscopía en el IR (cerca, medio y lejano), destacando los observatorios ISO (ESA), Spitzer (NASA), Akari (JAXA) y Herschel (ESA). Debido a la vida útil limitada de los telescopios espaciales infrarrojos, sólo Spitzer en su fase "caliente" sigue operativo y sólo en las bandas de 3.6 y 4.5 micras. (3) Los observatorios de altas energías (rayos X y gamma), principalmente Chandra (NASA), XMM-Newton (ESA) e Integral (ESA) así como varias misiones japonesas han permitido un avance sin precedentes en el conocimiento del Universo, y en particular de galaxias activas y QSOs, a energías altas.



3.1.1. Poblaciones estelares y evolución química y dinámica de galaxias

Aunque los muestreos fotométricos son de indudable valor, son los datos espectroscópicos los que resultan de mayor relevancia para el estudio de las poblaciones estelares en galaxias fuera del Grupo Local. Por otra parte, la interpretación de estos datos se fundamenta en los modelos de síntesis de poblaciones estelares. Las versiones más actuales de estos modelos asumen que las poblaciones estelares de galaxias se puede representar mediante una suma de poblaciones estelares simples, entidades que tienen la misma edad y la misma metalicidad. Bajo esta suposi-

ción, se puede usar la teoría de la evolución estelar para calcular las propiedades integradas de estas poblaciones estelares simples que pueden combinarse de diversas formas para reproducir las distribuciones espectrales de energía observadas. Esto requiere el uso de librerías estelares, es decir, de espectros correspondientes a estrellas de distintos tipos, bien empíricas, o calculadas mediante modelos de atmósferas estelares. Aunque se han producido importantes avances en la aplicación de esta técnica, todavía no se ha conseguido derivar satisfactoriamente

la historia de la formación estelar y la distribución metalicidades en galaxias a partir de observaciones espectroscópicas. Las incertidumbres en las fases avanzadas de la evolución de estrellas masivas y la conocida degeneración edad-metalicidad son los principales responsables de ello. Además, las librerías estelares usadas más frecuentemente (STELIB, MILES, Elodie) suelen estar restringidas a longitudes de onda ópticas, comúnmente entre 350 y 750 nm. La resolución de la degeneración edad-metalicidad requiere una línea de base más amplia que abarque también el UV y el IR.

3.1.2. Galaxias activas

En los últimos años se han producido importantes avances en nuestro conocimiento de los agujeros negros supermasivos que residen en los núcleos galácticos. Estos avances se refieren a dos aspectos fundamentales: el modelo estándar de acreción de materia por el agujero negro central y el modelo unificado según el cual los diferentes tipos de AGN son en realidad el mismo tipo intrínseco de objeto y las diferencias observadas se deben solo a su diferente orientación con respecto al observador y a un medio oscurecedor, postulado como un toroide

de gas y polvo axialmente simétrico y de tamaño de unos cuantos parsecs.

Todavía no existe un esquema coherente de cómo se produce el crecimiento de los agujeros negros, cuál es la conexión entre la masa de los agujeros negros y el bulbo en que residen, y cuál puede ser el impacto de posibles vientos producidos por ellos en la evolución de las galaxias. Está comúnmente aceptado que los agujeros negros en los centros de galaxias crecen principalmente gracias a la acreción de la materia disponible en su vecindad,

tiempo durante el cual la fuente central se manifiesta como un núcleo galáctico activo y, aunque se podría esperar que existiera una relación entre el crecimiento del agujero negro central y el del esferoide de la galaxia, puesto que ambos requieren un suministro de gas, el hecho de que los tamaños físicos implicados difieran en más de 9 órdenes de magnitud, hace difícil establecer una relación causal. Los resultados obtenidos hasta ahora revelan que las galaxias que albergan AGN muestran propiedades a gran escala similares a las de las galaxias normales,



no activas, de masas comparables y este parece ser también el caso a escalas mucho menores, del orden de entre 10 y 100 pc, aunque estos estudios están restringidos a AGN de baja luminosidad en el universo local. Las futuras observaciones de ALMA en su configuración final podrán proporcionar datos de resolución lineal comparable para AGN más lejanos y luminosos.

Tampoco el modelo unificado ha tenido un éxito completo y el postulado toroide no parece ser suficiente para explicar las observaciones más recientes en el

dominio de los rayos X obtenidos por Chandra y XMM-Newton principalmente. Estas observaciones, combinadas con otras procedentes de los rangos infrarrojo y de radio abren dos posibilidades para la estructura del toroide: una estructura dominada por polvo y del tamaño de 100 pc aproximadamente, lo que podría reproducir la distribución espectral de energía observada, o una estructura mucho más pequeña, de solo algunos parsecs, con aglomerados capaces de acomodar el amplio rango observado de temperaturas de polvo. De nuevo, ALMA es el instrumento que pro-

bablemente podrá discriminar entre estos dos modelos.

Una cuestión adicional es que aproximadamente el 50 % de las galaxias Seyfert 2 brillantes parecen no tener una región de líneas de emisión anchas oscurecida, puesto que ésta no aparece en observaciones de luz polarizada en el óptico. Esto puede deberse a la importante contribución de regiones circunucleares de formación estelar que diluyen las líneas anchas, o a que estos objetos son Seyfert 2 genuinas, carentes de región de líneas anchas.



Centaurus A. Combinación de imágenes tomadas en el óptico (ESO/WFI), el submilimétrico (MPIfR/ESO/APEX/A. Weiss et al.) y rayos X (NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al.).



3.1.3. Formación estelar y medio interestelar en galaxias. Astro-química extragaláctica

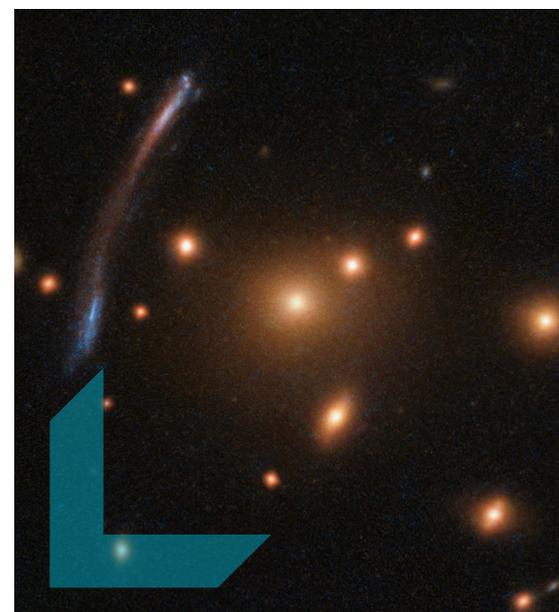
Los estudios de formación estelar masiva en galaxias han experimentado un gran desarrollo en los últimos años debido sobre todo a los telescopios espaciales como HST, Spitzer, Herschel, GALEX, Chandra y XMM-Newton que se han complementado con las observaciones obtenidas por los grandes telescopios óptico-infrarrojos de última generación, en el rango de los 10m de diámetro, instalados en tierra y los radiotelescopios que trabajan en los rangos milimétrico y submilimétrico y que han culminado con la llegada de ALMA. Con el advenimiento de nuevas infraestructuras como ALMA, para la cual astrónomos españoles tienen varios programas admitidos dentro de este campo, y una cercana colaboración entre observadores y teóricos, las técnicas de astroquímica están emergiendo como herramientas esenciales de diagnóstico para identificar la actividad en galaxias, trazando su estado evolutivo y por tanto contribuyendo a entender los fenómenos de formación estelar en diferentes poblaciones de galaxias.

Por otra parte, el estudio y la comprensión de la formación estelar se completa con observaciones detalladas en el rango óptico. Las líneas de emisión nebulares, principalmente [OII], [OIII], [NII], [SII], [SIII], H β , H α , proporcionan una rica informa-

ción sobre la tasa de formación estelar (SFR) y las propiedades del medio interestelar, que puede obtenerse en un amplio rango de distancias de manera sistemática. Gracias a los espectrómetros multi-rendija y las unidades de campo integral se obtendrá un conocimiento detallado de las propiedades del medio interestelar mediante el estudio de la metalicidad, la extinción, el parámetro de ionización y la densidad electrónica tanto de las regiones HII en galaxias cercanas como de galaxias normales y SB a alto desplazamiento al rojo. Por otra parte, las cámaras multifiltro de muy gran campo serán definitivas en el estudio de la tasa de formación estelar (SFR). Equipadas con filtros estrechos sensibles a las líneas de emisión nebulares, permitirán estudiar con una estadística sin precedentes la tasa de formación estelar en el Universo Local, su evolución con z y su dependencia con otras propiedades (por ejemplo masa, morfología y entorno). En este sentido la aportación de cartografiados como SHARDS, JPLUS, PAU y J-PAS será fundamental en la próxima década.

En el dominio ultravioleta, la misión GALEX ha sido el único instrumento reciente que ha proporcionado imágenes de gran campo en el UV y ha conducido

a importantes descubrimientos en el campo de la evolución de galaxias, entre otros, los discos extensos observados alrededor de muchas galaxias espirales y que parecen existir también en galaxias de otros tipos morfológicos. Estos discos son detectables en el UV gracias a la formación estelar reciente que tienen lugar en ellos. El hecho de que estos discos existan alrededor de galaxias que se pensaba que eran objetos evolucionados y pasivos, ha cambiado nuestras visiones sobre la formación de estas estructuras, apuntando claramente a la existencia de procesos de acreción de gas no procesado bien procedente del medio intergaláctico o de interacciones galaxia-galaxia.



3.1.4. Grupos y cúmulos de galaxias. Influencia del entorno en la evolución de las galaxias

Las cuestiones abiertas en este campo se centran alrededor de tres líneas: el estudio de la relación entre la morfología de las galaxias y la densidad del entorno en el cual residen (relación morfología-densidad), el estudio de la formación y evolución de las galaxias más brillantes de cúmulos, y el estudio del gas intracumular.

Durante los últimos años, cartografiados de galaxias como 2dFGRS y SDSS han proporcionado un número sin precedentes de información espectroscópica de galaxias en cúmulos, tanto en las zonas internas, más densamente pobladas, como en las externas, mucho más dispersas y se ha avanzado en el estudio de

las propiedades de las galaxias más luminosas ($M_r < -18.0$) de cúmulos cercanos y a desplazamiento al rojo moderado. Sin embargo, pese a la proliferación de nuevos muestreos, no existe un estudio de galaxias enanas en un número significativo de cúmulos. Investigadores de la comunidad española están trabajando activamente en la obtención de datos de estos objetos, lo que requiere el uso de espectrógrafos de gran campo con capacidades multi-objeto o equipados con IFUs. El uso de estos instrumentos puede incrementar la eficiencia de los cartografiados a obtener, en un factor de casi un orden de magnitud. Instalados en telescopios del orden de 4m (por ejemplo, WEAVE en el

WHT) podrán proporcionar observaciones de galaxias enanas en cúmulos cercanos, mientras que, instalados en telescopios de apertura más grande, permitirán su observación en cúmulos a desplazamiento al rojo intermedio. Estos instrumentos también permitirán la realización de estudios de las poblaciones estelares en las galaxias más luminosas de los cúmulos. Los estudios espectroscópicos anteriores se complementarán con observaciones realizadas con filtros estrechos en el rango óptico, tanto en lo concerniente a la detección y caracterización de grupos y cúmulos como en el estudio estadístico de las propiedades de galaxias centrales y satélites dentro de estas estructuras



*Cúmulo de galaxias
SDSS J0333+0651 (detalle
-créditos: ESA/Hubble & NASA).*

3.1.5. Galaxias a alto corrimiento al rojo (redshift)

En los últimos años se ha producido un avance espectacular en los estudios del universo distante, hasta la época anterior al final de la re-ionización del Universo, debido en gran parte a la cámara WFC3/IR del telescopio espacial Hubble (HST), que ha permitido descubrir galaxias en el rango de desplazamientos al rojo entre 6 y $\sim 10-12$, prácticamente inexplorado hasta hace muy poco. A ello se une el potencial de las lentes gravitatorias (galaxias y cúmulos de galaxias) para estudiar galaxias distantes de baja luminosidad y poco masivas gracias a la magnificación de la luz que producen estas lentes naturales de la luz de las galaxias lejanas, por ejemplo en los "campos frontera de Hubble" ("Hubble Frontier Fields"; HFF) y en estudios de galaxias submilimétricas descubiertas con el observatorio espacial Herschel.

Los cartografiados profundos y de gran área que se han llevado a cabo utilizando los telescopios es-

paciales Hubble y Spitzer y los telescopios de la clase de 8 a 10m han facilitado el estudio multi-longitud de onda de amplias muestras de galaxias lejanas y han sido cruciales en estudios de galaxias a desplazamientos al rojo mayores que 4. Por otra parte ALMA, el espectrógrafo infrarrojo MOSFIRE en el telescopio Keck y los nuevos instrumentos de los ESO-VLT (Very Large Telescopes), por ejemplo MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer), un espectrógrafo de campo integral panorámico que opera a longitudes de onda visibles y KMOS, un espectrógrafo multi-objeto con capacidad para obtener espectroscopía de campo integral y que opera a longitudes de onda infrarrojas, están facilitando un estudio más detallado de las condiciones físicas en estas galaxias, incluyendo la emisión estelar y el medio interestelar.

En un futuro cada vez más próximo, el telescopio espacial JWST permitirá obtener obser-

vaciones detalladas de aquellas galaxias ya descubiertas en imágenes profundas del HST pero demasiado débiles para ser objeto un estudio espectroscópico, incluso con los telescopios actuales de la clase de 8-10m. El JWST extenderá los estudios del HST del universo primitivo a mayores desplazamientos al rojo, proporcionando imágenes y espectros desde el rango visible al infrarrojo medio. Unos años más tarde los telescopios extremadamente grandes (Extremely large telescopes, ELTs), facilitarán observaciones espectroscópicas de alta resolución angular de galaxias distantes muy débiles gracias a su gran área colectora y a técnicas de óptica adaptativa.

Asímismo, gracias al avance en astronomía computacional, las observaciones actuales y futuras se podrán contrastar con las simulaciones detalladas y modelos del universo temprano.

3.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos

Las últimas décadas han presenciado un crecimiento sin precedentes en los datos relativos a las poblaciones estelares en nuestra galaxia y en las galaxias de nuestro Grupo Local que han hecho posible avanzar notablemente en el conocimiento de su estructura. Este avance proviene, en parte, de la explotación de te-

lescopios de gran diámetro, pero también de exploraciones especialmente dedicadas, realizadas con telescopios de apertura moderada. Además, diferentes estudios multi-frecuencia, desde los rayos gamma a las ondas de radio han tenido una importante contribución. Pero, sin duda, el mayor impacto hay que adju-

dicárselo a la misión astrométrica Hipparcos que entre 1989 y 1993 proporcionó medidas de paralajes de aproximadamente de más de un millón de estrellas con una precisión mejor que 0.03", entre ellas 120,000 con una precisión de tan sólo 0.001". Todos estos datos se plasmaron en el catálogo Tycho-2, con in-



formación sobre 2.5 millones de estrellas, lo que incluye prácticamente todas aquellas con magnitud menor que 11 en la banda V. El catálogo contiene información sobre sus posiciones, movimientos propios, colores y luminosidades.

Además, se han llevado a cabo una serie de muestreos de diversa índole como, por ejemplo RAVE (Radial Velocity Experiment) que ha proporcionado medidas de velocidades radiales y composición química de casi un millón de estrellas en el hemisferio sur usando el telescopio UK Schmidt (1.2m) y el espectrógrafo 6dF en el Observatorio Anglo Australiano. RAVE, en combinación con CORAVEL (Correlation Radial Velocities) ha identificado nuevos grupos en movimiento y, en combinación con los datos obtenidos con el espectrógrafo echelle ELODIE (Observatorio de Haute Provence) ha proporcionado medidas precisas de las

escalas de altura de los discos delgado y grueso de La Galaxia.

Otros muestreos relevantes son: 2MASS (The Two Micron All Sky Survey) que ha cartografiado todo el cielo en las bandas del infrarrojo cercano JHK; UKIDSS (UKIRT Infrared Deep Sky Survey) que incluye un muestreo de gran campo (4000 grados cuadrados) y un muestreo del plano galáctico (1800 grados cuadrados) en las mismas bandas.

También el telescopio espacial Spitzer Spitzer ha realizado un muestreo del plano galáctico y los datos de legado GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire) han proporcionado resultados espectaculares sobre la estructura espiral y la barra de nuestra Galaxia, así como de regiones de formación estelar en la misma. Incluso SDSS, aunque no estuviera diseñado para este propósito ha observado numerosas estrellas en las componentes delgada y gruesa del

disco galáctico, así como en el halo. La continuación de los muestreos de SDSS ha dedicado bastante tiempo a la realización de programas dedicados al estudio de la estructura y evolución de La Galaxia (SEGUE, Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration; APOGEE, The APO Galactic Evolution Experiment).

El catálogo final de Gaia (que se espera para 2020) revolucionará la Astronomía Galáctica en la próxima década dada la precisión, sin precedentes, de sus datos astrométricos. Para completar estos datos se hace estrictamente necesaria la realización de grandes cartografiados tanto fotométricos como espectroscópicos en ambos hemisferios (es también una recomendación de ASTRONET), pues solo combinando toda esta información nuestra Galaxia será el laboratorio local ideal para el análisis de los procesos de formación y evolución de las galaxias en el Universo.

*Imagen de MUSE de la
región correspondiente al
HUDF (ESO/MUSE).*



4. Necesidades instrumentales

Las necesidades instrumentales para abordar las cuestiones abiertas en el campo de la astrofísica extragaláctica son comunes a la mayoría de las áreas contempladas o se solapan entre ellas. En las secciones siguientes se relaciona la instrumentación más

relevante, aunque no exhaustiva, necesaria para el desarrollo de los objetivos propuestos más arriba. Esta instrumentación abarca todo el espectro electromagnético observable instalados bien en telescopios anclados en tierra, o en misiones espaciales.

4.1 Formación y evolución de las galaxias

4.1.1. Poblaciones estelares y evolución química y dinámica de galaxias

Como se puede deducir fácilmente de lo expuesto más arriba, la investigación en el campo extragaláctico requiere de observaciones en todo el rango de frecuencias, tanto desde el punto de vista de imagen como de espectroscopía. En los últimos años se han realizado importantes exploraciones de gran calado tanto el óptico como en el IR, que han permitido grandes avances en el descubrimiento y la confirmación de correlaciones fundamentales con un gran respaldo estadístico. Sin embargo, el completo entendimiento de las mismas requiere el seguimiento y estudio detallado de objetos individuales seleccionados cuidadosamente. Si bien, dada la naturaleza de esos objetos, en muchos casos se requerirá el uso de telescopios de gran apertura (8-10m), los objetos más cercanos podrán

ser estudiados con telescopios de menor apertura (2-4m). En cualquier caso, se necesita disponer de espectrógrafos de resolución baja a moderada, de apertura simple o larga rendija; el uso de capacidades multi-rendija aumentará la eficiencia de las observaciones, sobre todo en el caso de la observación de grupos o cúmulos de galaxias.

Dentro de la instrumentación disponible en territorio nacional se encuentran: ISIS@WHT (R= 2000-20000), TWIN@CAHA3.5 (R=3000-14000), IDS@INT (R= 1500-10000), ALFOSC@NOT (R=200-10000), CAFOS@CAHA2.2 (multi-rendija, R=600-3000), LIRIS@WHT (R=1000-3000, espectroscopía e imagen en el IR), NOTCAM@NOT (R=2500, 5500; también imagen). Además, los investigadores españoles tienen acceso a la instrumentación disponible en los telesco-

pios de ESO- VLT: FORS2, ISAAC, NACO, CRIRES, VISIR, X-Shooter. Este último es sin duda un instrumento extremadamente competitivo para el estudio de galaxias a distinto desplazamiento al rojo, dado su gran cubrimiento espectral, desde el corte atmosférico hasta 2.5μ .

En la próxima década, E-ELT aumentará la fracción del universo que podemos resolver en estrellas en un factor 10, permitiendo obtener observaciones de estrellas individuales en galaxias fuera de nuestro Grupo Local y aplicar las técnicas desarrolladas para la derivación de sus edades y composiciones químicas en el caso de nuestra galaxia. Posibilitará la determinación de las abundancias químicas, presumiblemente extremadamente bajas, de las primeras estrellas formadas y la derivación de la



función inicial de masa de las estrellas a distintas épocas cosmológicas, dilucidando así una de las preguntas fundamentales de la formación estelar: la universalidad o no de esta distribución.

La combinación de la imagen con la espectroscopía ha conducido al desarrollo de la Espectroscopía de Campo Integral (IFS) que, aplicada al estudio de galaxias cercanas, puede proporcionar una gran cantidad de información sobre: poblaciones estelares, formación estelar, propiedades del gas ionizado, cinemática, estructura galáctica y señales de efectos de entorno. En la próxima década, la aplicación de estas técnicas se extenderá a galaxias más lejanas a medida que los detectores ganan en resolución espacial y se desplazan hacia longitudes de onda más largas.

La Espectroscopía de Campo Integral es una técnica relativamente nueva que permite obtener espectros de fuentes extensas en función de su posición. Esta técnica ha florecido en los telescopios competitivos de gran apertura y en los últimos años se han construido muchos espectrógrafos equipados con Unidades de Campo Integral (IFU) (PPAK, SINFONI, VIMOS, GNIRS, MUSE, KMOS, etc. La demanda de estos instrumentos está creciendo rápidamente debido a la mejora en resolución espacial de los grandes telescopios existentes y en proyecto. Este rápido desarrollo desde el punto de la parte instrumental deberá acompañarse del correspondiente desarrollo en metodologías de análisis, interpretación y modelización teórica. Por ejemplo, es posible ahora por primera vez, mediante la combinación de datos de IFS y datos tradicionales de imagen de alta resolución, derivar una relación M/L

en galaxias resuelta espacialmente y, en combinación con datos de cinemática, obtener la relación M/L para las distintas componentes identificadas posibilitando así un estudio de bidimensional de la dinámica de galaxias. En lo que respecta a la evolución química, hasta ahora, debido a la falta de información en dos dimensiones, nuestros modelos adoptan la suposición de que la distribución de las abundancias de los distintos elementos químicos es acimutalmente simétrica y el importante asunto de la posible dispersión. La aplicación de técnicas de IFS permitirá obtener un excelente cuerpo de datos que proporcionarán distribuciones de abundancias en dos dimensiones que permitirán explorar la existencia de cambios en los patrones de distribución de abundancias químicas debidas a interacciones, fusiones o incluso acreción de estructuras satélites.

También la Espectroscopía de Campo Integral será sin duda la herramienta ideal para los estudios cinemáticos de galaxias. Los datos de IFS data permitirán obtener una descripción simple a la vez que completa de las propiedades de las galaxias en el caso bi-dimensional usando metodologías que se han desarrollado durante las pasadas dos décadas para cuantificar la morfología de galaxias a partir de imágenes. Pero también las opciones de multi-rendija, con un número moderado de las mismas, puede aportar información sobre las partes más separadas de objetos extensos o diferentes objetos independientes agrupados o no (objetos en grupos o cúmulos y objetos galácticos). Para ello, se requiere un campo de visión (FoV) mayor de 1 minuto de arco y la cobertura completa en el óptico con resolución espectros-

cópica moderada ($R=1000-5000$) es estrictamente necesaria.

Algunos de los instrumentos disponibles en territorio nacional que reúnen estas características son: OASIS/WHT ($R=1000-4000$, 33 segundos de arco de FoV y cubrimiento espectral desde ~ 4700 hasta $\sim 5400 \text{ \AA}$) and PMAS-PPAK @CAHA3.5m ($R=300-8000$, cubrimiento espectral del rango óptico completo, FoV de $\approx 74'' \times 64''$). Como complemento a la IFS, las observaciones multi-filtro abren una nueva ventana de oportunidad para los estudios bidimensionales en galaxias. Estas observaciones presentan una resolución espectral limitada ($R \sim 20-50$), compensada con una resolución espacial mejor que un segundo de arco y un FoV contiguo de varios grados cuadrados. Los cartografiados multi-filtro, como J-PLUS y J-PAS, permitirán el estudio en dos dimensiones de las poblaciones estelares y la formación estelar de cientos de miles de galaxias y, además, caracterizar la dependencia de sus propiedades con el entorno.

Desde el campo de la radioastronomía, las observaciones de alta resolución espacial en los dominios centimétricos y milimétricos (tanto líneas como continuo) son de una importancia crítica para interpretar adecuadamente las observaciones a través de modelos de evolución química. Las observaciones de CO a longitudes de onda milimétricas se pueden usar para estimar la fracción de gas en nubes moleculares y las observaciones de HI a longitudes de onda de radio pueden usarse no sólo para obtener el contenido de gas atómico sino también para obtener las curvas de rotación terminales de galaxias y para estimar la contribución de materia oscura a escala galáctica.

4.1.2. Galaxias activas

En lo que respecta a los núcleos galácticos activos (AGN), el uso de telescopios de gran apertura es esencial. Para entender el proceso de crecimiento de los agujeros negros y la relación entre las galaxias y los agujeros negros que albergan durante su formación y evolución, se requiere una buena caracterización de su demografía, es decir, necesitamos saber cuántos agujeros negros hay y cuál es la distribución de sus masas, en cada época cosmológica, es decir a cada desplazamiento al rojo. Esto implica realizar el seguimiento espectroscópico de candidatos seleccionados a partir de muestreos profundos en rayos-X. La mayoría de estos objetos son débiles ($R > 24$ mag) y su selección requiere el uso de telescopios de gran apertura, como GTC (~ 10 m). Una vez se hayan seleccionado los SMBH, el propósito final es la determinación de sus masas y la obtención de su función de masa. La mejor manera de determinar las masas de SMBH es hacerlo de forma directa, lo que, de nuevo, requiere el uso de telescopios de gran apertura para la mayor parte de la muestra (todos los objetos excepto los más cercanos).

También, las imágenes ópticas profundas con alta resolución pueden revelar la conexión entre los SMBH y sus galaxias huéspedes. Estas imágenes ópticas también nos darían información sobre el entorno de los SMBH incluyendo posibles evidencias de fusiones entre galaxias. Estos estudios necesitarían telescopios de gran apertura, como GTC, con la adición de técnicas de óptica adaptativa. Por otra parte, algunos (muchos) AGN muestran chorros colimados

hasta grandes distancias que emergen del SMBH a velocidades relativistas. El estudio de estos objetos también se beneficiaría de imágenes de alta resolución en el óptico/IR (con el uso de técnicas coronográficas, si fuera posible). Igualmente son imprescindibles las observaciones de alta resolución espacial de AGN en radiofrecuencias, especialmente para la caracterización y el estudio del origen de los chorros, o para determinar la masa central a través de medidas de máseres de agua. Por su parte las observaciones en rayos gamma serán fundamentales para entender los mecanismos de radiación y aceleración dentro de los chorros.

Por otra parte, la distribución espectral de energía del fondo de rayos X, que se cree resulta de la superposición de los espectros de AGN no resueltos, parece indicar que la población dominante de AGN hasta desplazamiento al rojo de aproximadamente 1 está formada por AGN oscurecidos de luminosidad moderada. Si esto es así, es probable que en la época de mayor actividad de AGN, alrededor de $z \approx 2$, la mayoría de los AGN no aparezcan en muestreos ópticos. El uso del rango IR es, en este caso, imperativo. También resulta imprescindible para distinguir entre objetos dominados por formación estelar o AGN. Pese a la dificultad de estos estudios, debemos insistir en que la evolución con el desplazamiento al rojo de la relación entre la masa de los SMBH y la dispersión de velocidades de los bulbos galácticos, proporcionará importantes cotas a los modelos de formación de galaxias y retroalimentación ("feedback"), una de las cuestiones más candentes de

la actualidad. El rango IR resulta imperativo para la obtención de imágenes y espectroscopía de alta resolución espacial. Por ejemplo, el instrumento MIRADAS, actualmente en desarrollo para GTC, podrá medir dinámicamente las masas de SMBH en un buen número de AGN y permitirán investigar aspectos relacionados con la acreción de materia.

La alta resolución y alta sensibilidad de ALMA permitirá obtener información sobre los AGN a más alto redshift, aparte de valiosa información sobre el entorno de los SMBH. Ejemplo de ello son los proyectos de investigación de dos galaxias LIRG: NGC1068 y NGC1614, liderados por astrónomos españoles que revelan cambios dramáticos en sus núcleos en temperaturas del gas y en su química en escalas de decenas de pc o menos, presentando importantes retos a los modelos actuales de impactos de AGN sobre el medio interestelar y la formación estelar de su entorno. Resulta notable la existencia de más de 15 proyectos en este campo con participación activa de la comunidad astronómica española, tres de los cuales están liderados por españoles.

Aunque proporcionan mucha menor resolución espectral, también hay que tener en consideración la aportación que se espera de los grandes cartografiados multi-filtro como J-PLUS o J-PAS por el carácter indiscriminado de su estrategia (sin selección previa de fuentes), su resolución espacial y la gran base estadística que proporcionarán. Por ejemplo, los futuros cartografiados multi-filtro, proporcionarán una identificación fiable y desplazamientos al

rojo precisos de QSOs con líneas anchas de emisión. Estos datos permitirán estudiar las propiedades de los QSOs, su evolución con z y su relación con el entorno con una estadística sin precedentes.

El dominio azul-UV es de gran importancia para el estudio espectroscópico de los AGN en el universo local. Sin embargo, la instrumentación proyectada para la próxima década en los grandes telescopios está más enfocada hacia el estudio de objetos a alto redshift y por tanto está sesgada hacia el IR. De hecho, el telescopio JWST, sucesor del HST, no permitirá observaciones en el UV por lo que hay mucha actividad en la comunidad UV para desarrollar otro telescopio espacial diferente del JWST y optimizado para el rango UV. Hay una participación española importante en el desarrollo de un futuro telescopio espacial UV, el Observatorio Espacial Mundial (World Space Observatory; WSO), proyecto liderado por Rusia con una posible participación de México.

A más altas energías, está en fase de construcción el proyecto Cherenkov Telescope Array (CTA) y se planea que su explotación científica comience parcialmente en 2017 y que su operación se extienda durante un plazo de 30 años a partir de que la construcción termine, hacia el 2020. Desde sus inicios España ha jugado un papel fundamental en los telescopios MAGIC (Roque de los Muchachos), lo que ha permitido el estudio de galaxias activas en el rango GeV/TeV. El Cherenkov Telescope Array (CTA) se plantea mejorar el alcance de MAGIC en un factor 10 combinando ~ 100 telescopios de dife-

rentes tamaño: 23m, 12m y unos pocos metros de diámetro, distribuidos de una manera óptima en dos observatorios, uno en el hemisferio sur y otro en el norte, con el objetivo de cubrir el espectro

desde 20 GeV a 200 TeV. La sensibilidad del observatorio es un orden de magnitud mejor que la de los observatorios actuales en un rango energético un orden de magnitud más amplio. A esto hay



LST-1, primer prototipo de los telescopios del Cherenkov Telescope Array.

que añadirle que su resolución en energía por encima de pocos cientos de GeV es mejor que el 10% y su resolución angular llega al minuto de arco a alta energía, aproximadamente un factor 2 mejor que Fermi.

El número de fuentes que CTA puede observar es al menos 10 veces superior al de las fuentes de alta energía catalogadas hasta la fecha tanto galácticas como extragalácticas. En particular, el incremento tanto en el número de AGN observados como en la calidad de los datos permitirá un progreso sustancial en el estudio de las fuentes en rayos gamma. Además, con observaciones puntuales se espera lograr la caracterización de todas las poblaciones de galaxias activas hasta desplazamiento al rojo de aproximadamente 2.5. También,

estudios detallados de la forma espectral y la variabilidad permitirán atacar cuestiones abiertas sobre la formación y composición de chorros relativistas en estos objetos, de los mecanismos de aceleración y la microfísica de los procesos radiativos que dan lugar a la emisión de alta energía.

El consorcio que construye CTA comprende más de 1000 investigadores de 28 países de todo el mundo. La mayor contribución en número de investigadores e ingenieros proviene de Alemania, Francia, Italia, Estados Unidos y España.

La participación española en CTA es de aproximadamente 100 personas en temas que cubren desde la planificación y desarrollo de la explotación científica del observatorio, hasta el diseño y cons-

trucción de elementos clave de telescopios. En particular, grupos de la comunidad española participan en la coordinación del Programa de Ciencia Clave de CTA, en el desarrollo del sistema de planificación de observaciones y procesado de datos, el sistema de monitorización y calibración de la atmósfera, los sistemas de gestión de datos, el desarrollo de la mecánica y electrónica de disparo para las cámaras, o el desarrollo de mecánica para las monturas de los telescopios de mayor tamaño.

De especial importancia son estos últimos desarrollos, que se probarán en un prototipo de telescopio de 23m que será instalado en el Observatorio del Roque de Los Muchachos en La Palma junto a los actuales telescopios de MAGIC en 2016.

4.1.3. Formación estelar y medio interestelar en galaxias. Astro-química extragaláctica

Los estudios de formación estelar en galaxias requieren observaciones en el IR y en el radio, a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, capaces de proporcionar también una alta resolución espacial. Aparte de los radiotelescopios e interferómetros en uso, el instrumento clave para la próxima década es sin duda ALMA. Permitiría estudiar las condiciones químicas y físicas que se dan en las nubes moleculares densas, a menudo oscuras. Los primeros datos de ALMA

están comenzando a aparecer, revelando resultados espectaculares. Con ALMA, los estudios de gas molecular en galaxias están explotando con órdenes de magnitud de mejora de sensibilidad y resolución. Esto quiere decir que, por primera vez, los estudios sobre las condiciones físicas, la dinámica y la química de las nubes moleculares extragalácticas están aproximándose al nivel de detalle disponible hasta ahora sólo para las nubes moleculares en nuestra galaxia.

En la parte más instrumental, un grupo de ingenieros español se ha encargado del desarrollo de los amplificadores criogénicos de todos los receptores de las antenas de ALMA en la banda 7.

Este trabajo se fundamenta en la experiencia adquirida por este grupo en el pasado a través del diseño y el desarrollo de amplificadores en colaboración con IRAM y la misión Herschel de ESA.



4.1.4. Grupos y cúmulos de galaxias. Influencia del entorno en la evolución de las galaxias

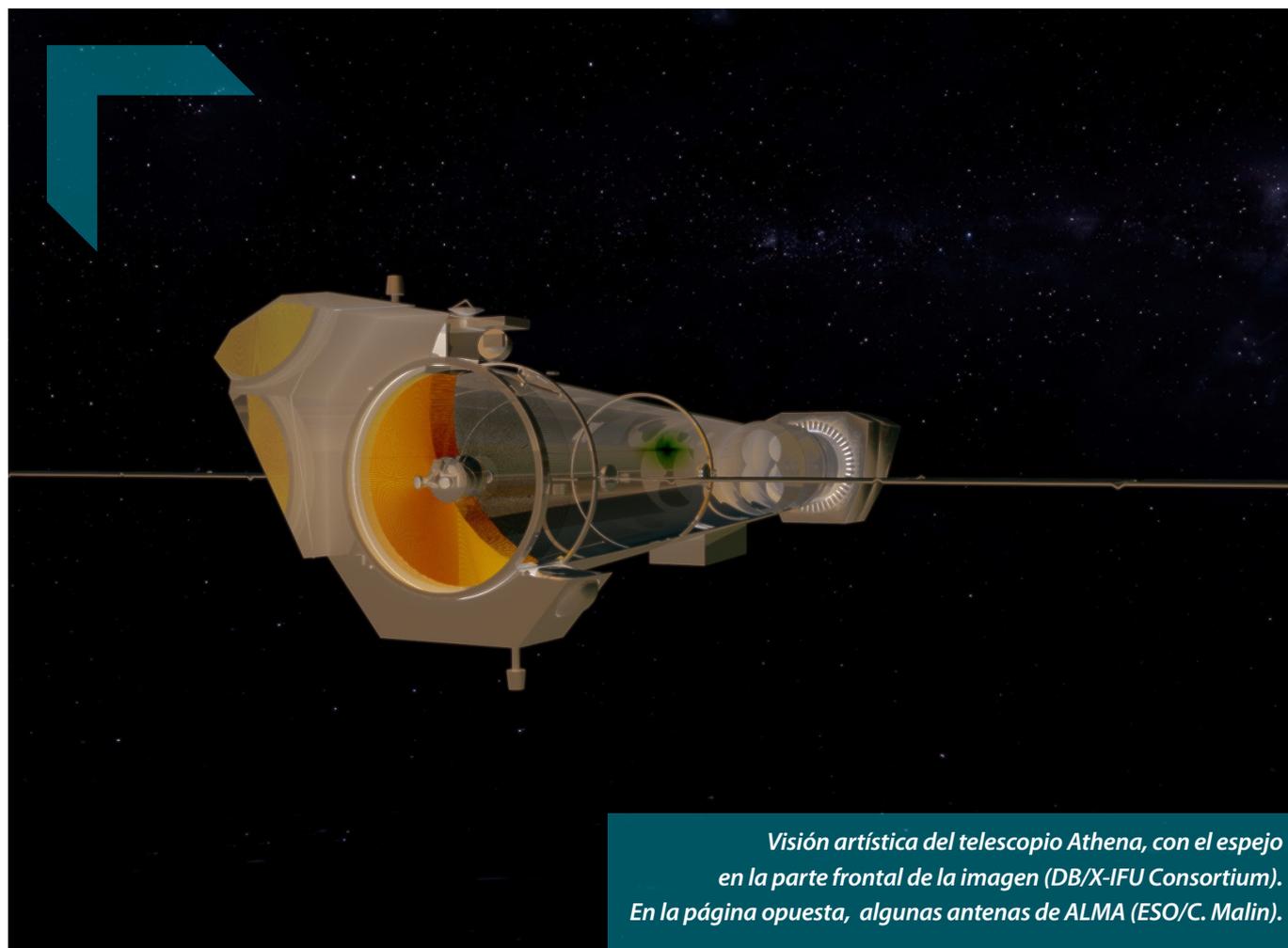
Los estudios de galaxias en cúmulos requieren imágenes profundas de gran campo y espectroscopía con espectrógrafos multi-objeto y con técnicas de IFS descritas más arriba

En el dominio de las ondas de radio, las observaciones de HI pueden usarse para obtener las curvas de rotación terminales de galaxias en cúmulos. La información que se puede derivar del estado cinemático de las regiones más externas de galaxias a partir de estas curvas de rotación terminales, se puede usar para estudiar una variedad de fenómenos en

grupos y cúmulos de galaxias, tales como el despojamiento de gas producido por presión de empuje y acoso entre galaxias.

La observación del gas intracumular muy caliente, requiere el uso de telescopios de rayos-X como Chandra y XMM-Newton. También en fase de desarrollo, seleccionada como misión L2, se encuentra ATHENA, un observatorio para la observación en rayos X enfocado al estudio del universo más caliente y energético. Dentro de los proyectos científicos que ATHENA podría acometer se encuentra la evolución de grupos

y cúmulos de galaxias. Los conocimientos actuales sobre estos sistemas viene sobre todo del universo cercano ($z < 0.5$). Un instrumento capaz de proporcionar observaciones con alta resolución espacial y espectral y alta eficiencia en el dominio de los rayos X conduciría a grandes avances permitiendo medir las propiedades termodinámicas y el contenido en metales de los primeros cúmulos de baja masa que pensamos se habrían formado a $z \approx 2$ y seguir directamente su evolución hacia los cúmulos masivos que observamos en la actualidad



Visión artística del telescopio Athena, con el espejo en la parte frontal de la imagen (DB/X-IFU Consortium). En la página opuesta, algunas antenas de ALMA (ESO/C. Malin).

Cúmulo Hickson 44, similar en ciertos aspectos al Grupo Local. Los puntos rojizos de la imagen son galaxias a alto redshift.

4.1.5. Galaxias a alto corrimiento al rojo (redshift)

La observación de galaxias a redshift entre moderado y alto requiere telescopios de gran apertura como, por ejemplo, VLT, GTC, Gemini, Subaru etc. Obviamente el dominio IR se hace cada vez más relevante en el estudio de estas galaxias. En galaxias a $z > 2$, el rango óptico (350-700 nm) extensivamente estudiado en objetos cercanos, se traslada al IR cercano.

Como se ha explicado anteriormente, existen un buen número de grandes muestreos de galaxias con distintos telescopios. Estos muestreos proporcionarán gran cantidad de galaxias con redshifts derivados fotométrica o espectroscópicamente que adecuados para un seguimiento espectroscópico utilizando grandes telescopios. El telescopio Espacial James Webb (JWST), con un diámetro de 6.5 metros y una superficie colectora unas 6 veces mayor que la del HST, está destinado, en parte, a la observación de galaxias lejanas y está diseñado para operar en el rango rojo-infrarrojo (de 0.6 a 28 μm a muy baja temperatura, lo que limitará su tiempo de vida a un período entre 5 y 10 años. JWST estará dotado de cuatro instrumentos principales: MIRI, una cámara y espectrógrafo de campo integral en el infrarrojo medio; NIRSpec, un espectrógrafo infrarrojo; NIRCam,

una cámara en el IR cercano y el FGS-NIRISS que combina un sensor de guiado, imagen y espectroscopía en el IR. MIRI es el primero de estos instrumentos en completarse. En su diseño y construcción han participado equipos de distintos países europeos, entre ellos España.

También el E-ELT (Telescopio Europeo Extremadamente Grande) resultará vital para el aumento del número de galaxias observables a alto redshift. Equipos españoles participan en el desarrollo conceptual de HARMONI, uno de los dos instrumentos científicos seleccionados para la primera luz del E-ELT. HARMONI es un espectrógrafo de campo integral que operará en el óptico e (0.47 to 2.45 μm) con un poder de resolución R entre 4000 y 20000 capaz de proporcionar espectros simultáneos de unos 32000 spaxels en el IR (8000 en el visible) y una resolución espacial de entre 0.004 y 0.04 segundos de arco por spaxel.

En el dominio de las ondas de radio, el Square Kilometre Array (SKA) aportará una información fundamental en el campo extragaláctico permitiendo la detección y selección de una enorme cantidad de objetos al alto desplazamiento al rojo.

Además, la alta resolución angular del SKA, combinada con su gran sensibilidad permitirá distinguir entre AGN y formación estelar en los centros de galaxias hasta $z \sim 7$. También permitirá la determinación de la proporción de AGN de baja luminosidad presentes en los distintos tipos de galaxias y obtener la función de masa completa de los SMBH.

SKA es un proyecto internacional planeado para entrar en funcionamiento al final de la presente década. Consiste en un interferómetro con aproximadamente 3000 antenas de 15m cubriendo distancias de unos 3000 km que observará en el rango de frecuencias entre 0.07 y 10 GHz con una resolución espacial de entre 2 y 40 mili segundos de y que multiplicará la sensibilidad disponible en instrumentos de su categoría por un factor 50.

El consorcio en que está integrado SKA incluye varios países europeos, entre ellos: Reino Unido, Holanda, Italia y Alemania y Europa en su conjunto, a través de acciones financiadas dentro del VII Programa Marco de la Unión Europea. Aunque nuestro país no forma parte de este consorcio, la comunidad astronómica española ha manifestado un claro interés en este proyecto.



4.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos

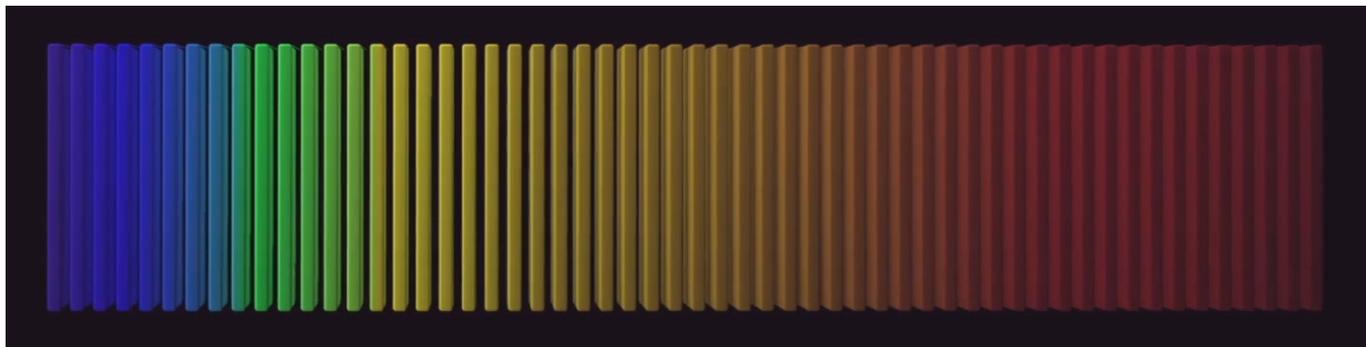
4.2.1. Arqueología galáctica

Por otra parte, en 2013 la comunidad europea de Gaia comenzó un gran cartografiado espectroscópico en el hemisferio sur que, en combinación con Gaia, producirá la primera panorámica global consistente de la relación entre cinemática y abundancias químicas en las estrellas de nuestra Galaxia. Este cartografiado habrá de completarse con cartografiados equivalentes obtenidos desde el hemisferio norte. WEAVE, el nuevo espectrógrafo multi-objeto a instalar en el WHT, resulta un instrumento ideal para la realización de cartografiados. Posee un amplio campo de visión ($>1^\circ$ de diámetro) y una gran eficiencia. Con este instrumento se

podrán obtener espectros de hasta 1000 objetos simultáneamente, en diversas configuraciones que proporcionan resoluciones espectrales entre $R = 4000$ y $R=20000$. WEAVE se considera un instrumento clave y de primera prioridad (vease ASTRONET Roadmap) y posiblemente es el instrumento idóneo para la realización de la contrapartida de GES en el hemisferio norte.

También, las características que definen los proyectos de cartografiado J-PLUS primero y, sobre todo, J-PAS los hacen altamente apropiados para este propósito, considerando que no existe otro de similares características que

aúne los necesarios, profundidad y resolución espectral. Los 54 filtros estrechos de sistema fotométrico de J-PAS pueden en realidad considerarse como una espectroscopía de muy baja resolución del halo galáctico. dado que cualquier cartografiado galáctico de gran campo es también un cartografiado del halo Galáctico, J-PLUS y J-PAS prometen ser la base de datos ideal para el análisis de las poblaciones estelares, así como la búsqueda de subestructuras (colas de marea, etc...) para una mejor comprensión de la naturaleza y formación de nuestra Galaxia. La combinación de GAIA con J-PLUS primero y luego J-PAS



generará un catálogo de millones de objetos en un espacio n -dimensional de variables, sin precedente. Los telescopios del hemisferio Norte encargados de la componente observacional de este proyecto son el JAST/T80 y JST/T250 del Observatorio Astrofísico de Javalambre del CEFCA. El proyecto engloba a varios centros de investigación y departamentos universitarios tanto españoles como de otros países, entre ellos de Brasil. Dentro de este contexto de colaboraciones para proyectos de gran alcance el CEFCA y el IAA han llegado a un acuerdo para la realización de un cartografiado para el estudio de la población más brillante del disco galáctico, el proyecto GALANTE@JAST/T80 .

A longitudes de onda infrarrojas es de destacar el papel a desempeñar por PANIC (Panoramic Near Infrared Camera para Calar Alto), una cámara de gran campo [FOV (31'x31')] que opera en el cercano infrarrojo (0.9 to 2.5 micras), con una resolución angular de 0.45 arcsec/pixel, instalada en el telescopio de 2.2m de Calar Alto. No es la primera cámara de estas características en el contexto mundial pero es la primera en España y los cartografiados diseñados para la misma permiti-

rán realizar una ciencia altamente competitiva en aquellas regiones galácticas invisibles a Gaia. Se ha creado un consorcio coordinado por REG para definir un cartografiado en regiones seleccionadas del disco y del halo, siendo su principal objetivo científico el estudio de la formación estelar a diferentes escalas espaciales. Un ejemplo del tipo de ciencia que se puede realizar con este cartografiado es la determinación de movimientos propios de estrellas de muy baja masa y enanas marrones en cúmulos abiertos y regiones de formación estelar todavía embebidas en polvo y gas. Dado que este proyecto iría dirigido a regiones de formación estelar cercanas ($d < 300$ pc), el catálogo 2MASS proporcionaría los datos astrométricos de primera época y junto con Gaia permitiría obtener la Función Inicial de Masa (IMF) hasta una masa inferior del orden de 1 masa de Júpiter y analizar en detalle la dinámica de la disrupción y destrucción de cúmulos en la cola de muy baja masa. Por otro lado, el relevamiento del halo galáctico ayudaría a definir mejor la separación estrella-galaxia en objetos muy débiles, permitiendo la detección y caracterización de estrellas de muy baja masa y enanas marrones de Población II así como la búsqueda de colas

corrientes de marea definidas por las estrellas M, método que ha demostrado tener resultados espectaculares utilizando 2MASS.

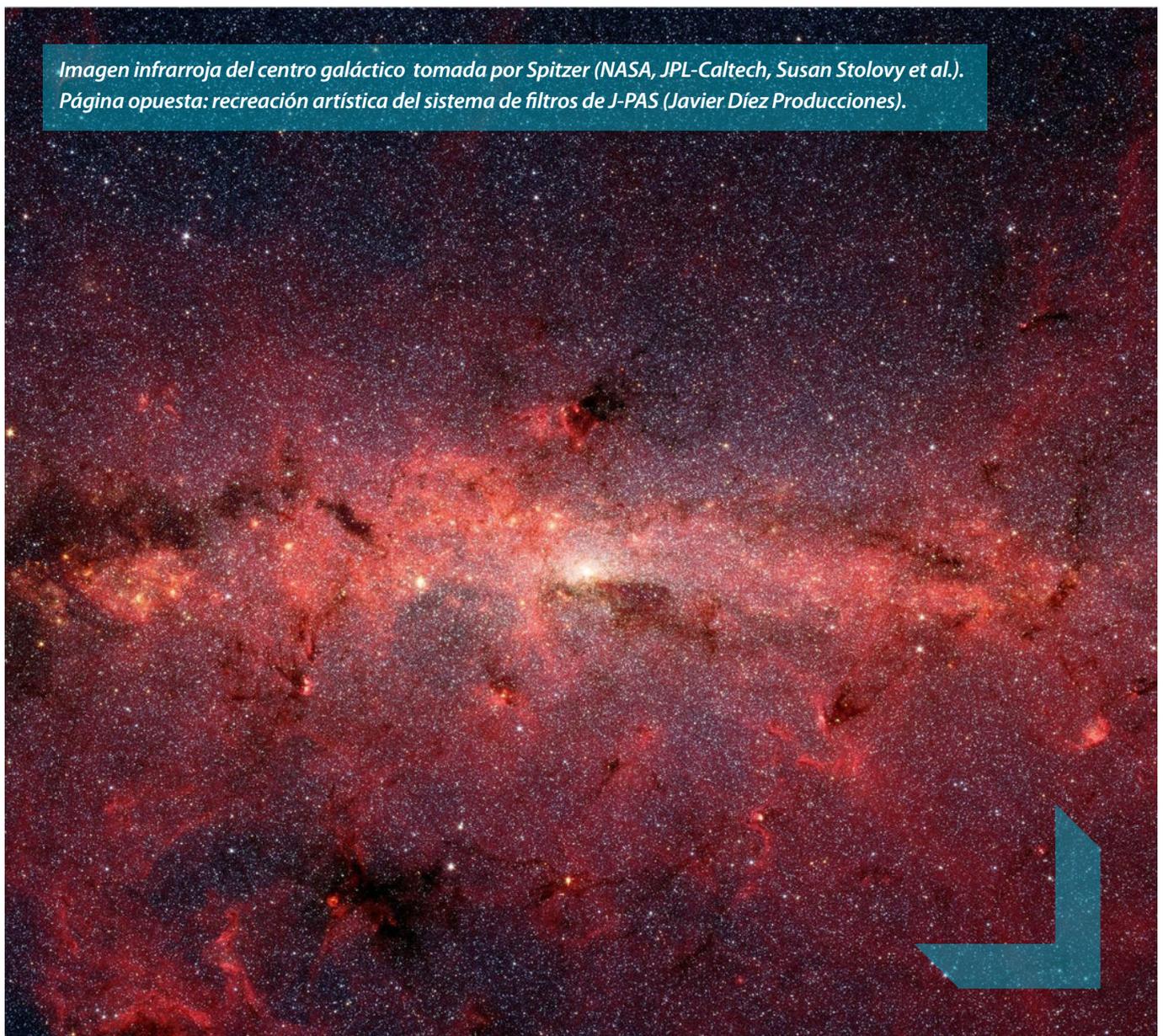
En el dominio de las ondas de radio, el "Galactic Australian Square Kilometre Array Pathfinder Survey" (GASKAP), uno de los proyectos clave aprobados para el Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP), precursor australiano del Square Kilometer Array, realizará un cartografiado del gas en la Vía Láctea (al sur de $dec=40^\circ$) y el sistema Magallánico (Nubes de Magallanes y Magellanic Stream) en la línea de HI (21cm) y tres líneas de OH (18 cm). Este cartografiado galáctico representará una mejora de un orden de magnitud en sensibilidad y resolución angular respecto de anteriores trabajos. GASKAP permitirá el estudio detallado de la estructura y cinemática galáctica a pequeña escala ($\sim 20''$), de la relación y evolución entre diferentes fases del medio interestelar (gas molecular y atómico), y de la interacción entre el gas en el disco y en el halo. La emisión máser de OH permitirá estudiar la pérdida de masa en regiones de formación estelar y estrellas evolucionadas, así como determinar la cinemática global de esta componente estelar en la galaxia.

4.2.2. El centro galáctico

Los estudios de relevancia sobre el centro galáctico requieren el uso de la más alta resolución espacial, alcanzable en el dominio IR. Dentro de la instrumentación de estas características disponible para la comunidad astronómica española se encuentran: NACO (y su sucesor ERIS) en uno de los telescopios VLT que proporciona

imagen en el IR (entre 1 y 5 μ) con óptica adaptativa; SINFONI y HAWK-I, también en los telescopios VLT, que combinan espectroscopía en el IR con técnicas de óptica adaptativa. También el uso de técnicas interferométricas se ajustan a las necesidades de estos proyectos, entre otros los instrumentos AMBER y GRAVITY en VLTI.

Entre la instrumentación disponible en telescopios ubicados en territorio nacional, CANARICAM, EMIR y CIRCE en GCT pueden proporcionar información valiosa y única. También NOTCAM en el telescopio NOT podría realizar un seguimiento del centro galáctico si está equipado con electrónica que permita una más rápida lectura, tal como está planeado.



5. Proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro



5.1 Formación y evolución de las galaxias

5.1.1. Poblaciones estelares y evolución química y dinámica de galaxias

El estudio de las poblaciones estelares en galaxias es un campo bien establecido en nuestro país y grupos de distintas instituciones trabajan muy activamente en él, en muchos casos agrupados en torno a grandes proyectos comunes y proyectos coordinados de investigación que vienen realizándose de una manera continuada. Ello hace que en buena medida las colaboraciones científicas se desarrollen en torno a instrumentación que garantiza la obtención de este tipo de datos. Algunos ejemplos de esto son: ALHAMBRA, arriba mencionado, que incluye grupos de 25 instituciones científicas, 19 de ellas españolas y que nació como proyecto observacional conjunto a realizar con el telescopio de 3.5m de CAHA y la cámara LAICA; SHARDS (Survey for High Absorption Red and Dead Sources; <http://guaix.fis.ucm.es/~pgperez/SHARDS/>), constituido alrededor de un programa de observación ESO/GTC para el estudio de la formación de galaxias masivas; el Proyecto SAURON (Spectrographic Areal Unit for Research on Optical Nebulae), un muestreo de 72 galaxias tempranas observa-

das con eSAURON en el WHT (La Palma Observatory) para realizar un estudio de la cinemática y las poblaciones estelares de galaxias aisladas y en cúmulos; CALIFA (Calar Alto Legacy Integral-Field-Spectroscopy Areal survey; <http://califa.caha.es/>), programa de legado de CAHA para la obtención de observaciones con el telescopio de 3.5m y el espectrógrafo de campo integral PMAS-PPAK, de una muestra de aproximadamente 600 galaxias cercanas; GOYA (Galaxy Origins and Young Assembly; <http://www.astro.ufl.edu/GOYA/home.html>) creado en torno a la explotación científica del espectrógrafo EMIR (Espectrógrafo Multiobjeto Infrarrojo), un instrumento de segunda generación a instalar en el Gran Telescopio de Canarias (GTC).

El mismo tipo de estrategia es aplicable a otros grupos para el estudio de brotes de formación estelar extremos en galaxias como ESTALLIDOS (<http://estallidos.iac.es/estallidos/Estallidos.jsp>) constituido por grupos de cuatro instituciones españolas con una gran presencia de colaboradores de instituciones extranjeras o RAVET (Real and

Virtual Early Type Galaxies), proyecto desarrollado para combinar observaciones de galaxias, modelos de poblaciones estelares y simulaciones cosmológicas teóricas en el estudio de la formación y evolución de las galaxias y en el que han participado grupos de al menos 4 instituciones españolas, también con colaboración extranjera.

En lo que respecta a los aspectos relacionados con la modelización también existen grupos en nuestro país que han contribuido notablemente al desarrollo de librerías estelares (por ejemplo MILES o MIUSCAT) y modelos de poblaciones estelares como realizados en el IAC (MIUSCAT), IAA (modelos de alta resolución) o en el CIEMAT (PopStar) entre otros.

Nuestro país tiene también una larga tradición en el estudio de las abundancias del gas interestelar ionizado, las distribuciones de abundancias de los elementos químicos en galaxias y la evolución química de las mismas, aunque estos grupos son más minoritarios, como por otra parte corresponde al área en la que se enmarcan.

5.1.2. Galaxias activas

En el campo de las galaxias activas, hay grupos españoles consolidados trabajando en los rangos radio, óptico, infrarrojo, rayos X y rayos gamma. Algunos grupos desarrollan un trabajo de gran impacto en LIRGS y ULIRGS a la que aportan su experiencia en el diseño y desarrollo de instrumentación infrarroja de vanguardia. Dentro de ellos, LIRGI (Luminous Infra Red Galaxies Inventory; <http://lirgi.iaa.es>) es un proyecto de legado del radiointerferómetro eMERLIN en el Reino Unido, que observa 42 de las galaxias LIRGs y ULIRGs más luminosas del universo local ($D < 250$ Mpc), en continuo y línea

espectral, en las bandas de 6 y 18 cm. La resolución angular es de $0.05''$ a $0.15''$, lo que permite el estudio de las regiones centrales de estas galaxias. El objetivo final es establecer una secuencia fenomenológica y una escala temporal para la evolución de los brotes nucleares de formación estelar masiva, usando de modo combinado observaciones en el infrarrojo lejano así como la información radio, en continuo y línea, del proyecto de legado LIRGI.

La existencia de ESAC cerca de Madrid posibilita la colaboración de científicos españoles con astróno-

mos especialistas que trabajan en el XMM-Newton Operation Center. Hay también grupos trabajando en la estructura de chorros relativistas y en la estructura de centros de galaxias activas con alta resolución espacial (<http://www.iac.es/proyecto/parsec/main/index.php>).

Los estudios observacionales anteriores se complementan con predicciones teóricas aportadas por grupos que utilizan modelos semi-analíticos de formación de galaxias para estudiar el origen y evolución de los SMBH y su conexión con el entorno en un contexto cosmológico.

5.1.3. Formación estelar y medio interestelar en galaxias. Astro-química extragaláctica

Astrónomos del OAN lideran dos proyectos de ALMA que se ocupan del estudio de la alimentación de la actividad endiscos de galaxias Seyfert. Dichos proyectos se han beneficiado de los resultados obtenidos en el pasado reciente en el proyecto NUGA, un survey realizado por el interferómetro de IRAM

Hay grupos españoles participando también en el programa de legado, PHIBBS2, un car-

tografiado de gas molecular en una muestra de más de 100 galaxias que abarcan un amplio rango de desplazamientos al rojo ($z= 0.5 - 2.5$). Este proyecto, que incluye a más de 20 investigadores de todo el mundo se desarrollará en gran medida gracias a la ampliación del Interferómetro de IRAM (NOEMA) a la que España contribuye de manera decisiva como miembro activo de IRAM.

En el dominio infrarrojo, todos los grupos europeos que participaron en la construcción de los instrumentos de Herschel se han agrupado en un único proyecto para construir el instrumento europeo, SAFARI, para el futuro telescopio espacial infrarrojo SPICA (JAXA-ESA). SAFARI permitirá observaciones 3D (imagen y espectroscopía de campo integral) en el infrarrojo lejano y cuenta con una importante participación española.

5.1.4. Grupos y cúmulos de galaxias. Influencia del entorno en la evolución de las galaxias

En nuestro país hay grupos consolidados trabajando en el estudio de la relación entre las propiedades básicas de las galaxias y su relación con el entorno, tanto desde el punto de vista observacional como de simulaciones numéricas. En la actualidad, se están realizando nuevos análisis de la relación morfología-densidad a la luz de los nuevos datos obtenidos. Un ejemplo de esto es el proyecto WINGS (Wide-field Nearby Galaxy cluster Survey; <http://web.oapd.inaf.it/wings/>) que ha obtenido imagen 77 cúmulos de galaxias cercanos, complementando estas observaciones con espectroscopía de unas 6000 galaxias en 48 cúmulos y fotometría infrarroja de 28 de ellos. El análisis del

muestreo de WINGS, en el que participan investigadores de al menos una institución española, está arrojando nueva luz sobre esta cuestión abierta.

Los datos obtenidos durante la última década, tanto en el óptico como en el dominio de los rayos X, han permitido también la identificación de entidades denominadas "grupos fósiles de galaxias". Estos grupos parecen ser sistemas evolucionados; se caracterizan por el defecto de galaxias brillantes y, al mismo tiempo, la presencia de un objeto extremadamente luminoso en el centro con un extenso halo de gas emisor en rayos X remanente del cúmulo original. Estos objetos podrían haber crecido a

través de procesos de fusión de las galaxias del cúmulo.

El proyecto FOGO (FOssil Group Origins), que cuenta con destacada participación española, nació con el propósito de realizar un estudio multifrecuencia sistemático de una muestra de 34 sistemas candidatos a grupos fósiles y constituyó la base de un proyecto de observación dentro del Programa de Tiempo Internacional (ITP08-4, ITP09-1) en el Observatorio del Roque de los Muchachos (telescopios TNG, INT, NOT, WHT), que obtuvo 52 noches de observación.

Grupos españoles también trabajan activamente estudiando

las tasas de formación estelar en galaxias en cúmulos en el universo local y a corrimiento al rojo moderado. Con el objetivo de comprender la evolución de galaxias en cúmulos, el proyecto GLACE, liderado por investigadores españoles, está realizando el cartografiado de un conjunto de líneas de emisión en el dominio óptico ([OII]3727, [OIII]5007, H β y H α /[NII]) en varios cúmulos de galaxias a redshifts $z \sim 0.40, 0.63$ and 0.86 , usando los filtros sintonizables de OSIRIS en el telescopio GTC. Este estudio abordará cuestiones clave sobre los procesos físicos que actúan sobre las galaxias en caída hacia el centro de los cúmulos durante el curso del crecimiento jerárquico de los mismos.



Grupo de galaxias Cheshire Cat, futuro grupo fósil de galaxias (NASA/STScI).

5.1.5. Galaxias a alto corrimiento al rojo (redshift)

En la actualidad hay grupos españoles participando en estudios de galaxias distantes utilizando GTC, VLT, Herschel, HST, Spitzer, VLT, IRAM, ALMA, etc. y otros telescopios sin participación española (por ejemplo el Keck) en el marco de colaboraciones internacionales. También se participa en el desarrollo de instrumentación relevante para estudios de galaxias distantes, que incluyen los nuevos instrumentos de GTC, WHT (PAUcam) y E-ELT (Harmoni) y telescopios espaciales de ESA, NASA y JAXA (JWST, Euclid, Athena y SPICA) y se ha participado en la construcción de instrumentación para GTC (OSIRIS) y ALMA y para telescopios espaciales (Herschel). El futuro de la investigación de los primeros mil millones de años del Universo es muy prometedor y los grupos españoles tienen ya acceso a las mejores instalaciones

para estos estudios y participan en el desarrollo de instrumentación avanzada tanto para grandes telescopios en tierra como GTC y E-ELT (por ejemplo con el instrumento Harmony) como para telescopios espaciales.

Los nuevos instrumentos de GTC (EMIR, Megara, FRIDA y Miradas) junto con OSIRIS y CIRCE permitirán a la comunidad española liderar muchos de los trabajos en este campo. Un ejemplo es el recientemente aprobado programa de larga duración de GTC SHARDS-Frontier Fields que aportará imagen profunda en muchos filtros de banda estrecha de los campos frontera del HST, equivalente a espectroscopía de baja resolución espectral de miles de galaxias, complementaria a los proyectos que se están llevando a cabo con otros grandes telescopios.

En todos estos estudios los grupos españoles tienen acceso a una buena parte de los mejores telescopios disponibles actualmente (e.g. GTC, HST, VLT, IRAM NOEMA y 30m, ALMA, etc.) o futuros (JWST, e-ELT, etc.) así como a instalaciones de super computación. En el rango del infrarrojo medio y lejano hay también una participación importante en la misión SPICA, colaboración de ESA y JAXA, que permitirá estudiar la formación de polvo en galaxias distantes durante la época de reionización y la formación estelar en ellas en el rango espectral no cubierto por JWST y ALMA.

Es deseable también la participación española en el SKA, que permitirá el estudio en radio ondas del hidrógeno neutro antes de la reionización por medio de observaciones de la línea de 21 cm desplazada al rojo.

5.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos

Existen diversos grupos trabajando en la estructura de nuestra galaxia y en galaxias del Grupo Local. Gran parte de los estudios dedicados a nuestra Galaxia se canalizan a través de las redes relacionadas con la misión Gaia.

La Red Española para la Explotación Científica de Gaia, se creó en 2010 y, en la actualidad, 140 investigadores de 32 instituciones diferentes forman parte de ella. Los principales objetivos de la red son: la preparación para la gran tarea que representará la explotación de la misión científica Gaia; (2) la transferencia a la comunidad científica la experiencia de los grupos que participan en la preparación de la misión Gaia; (3) la coordinación de los intereses comunes en líneas actuales y futuras de investigación; (4) el análisis de las sinergias con cartografiados actuales y futuros realizados tanto desde tierra como desde el espacio; y (5) la coordinación de la contribución española a las redes europeas de Gaia (GREAT, ITN).

El papel de las ICTS españolas

Aunque la participación en grandes proyectos es sin duda importante para que la Astrofísica española ocupe un lugar relevante a nivel internacional, estos grandes proyectos siempre requieren del complemento y apoyo de otros proyectos de menor envergadura, generalmente llevados a cabo por grupos pequeños constituidos por unos cuantos investigadores que, en gran medida, hacen uso de las ICTS. Por otra parte, la rea-

lización de los grandes cartografiados previstos con telescopios de apertura moderada (2-4m) o grande (8-10m), dará lugar a un gran número de proyectos de seguimiento que son idóneos para ser llevados a cabo en telescopios de apertura moderada con la instrumentación adecuada. Los cartografiados multifiltro previstos, tales como J-PAS@JST/T250 y JPLUS@JAST/T80 en el OAJ van a aportar también resultados relevantes en el estudio estadístico de poblaciones estelares en la Galaxia y en las Galaxias próximas, así como en el dominio de la *"Near Field Cosmology"*.

En lo que respecta a espectroscopía, la obtención simultánea de observaciones en el mayor rango de longitudes de onda posible es imperativo para la derivación de una espectrofotometría fiable, requisito fundamental en estudios de poblaciones estelares y abundancias del gas nebuloso, por ejemplo. Esto requiere el uso de espectrógrafos de más de un brazo. ISIS en WHT (La Palma) y Twin en CAHA 3.5m son dos de los instrumentos de acceso abierto en el hemisferio norte que cumplen con estas características y su uso es crucial para los grupos españoles. En lo que respecta a imagen en el óptico, la cámara de gran campo del INT (La Palma) sigue siendo un instrumento muy solicitado por la comunidad española para un gran número de proyectos. En lo que respecta al dominio infrarrojo la cámara infrarroja MAGIC en CAHA 3.5m y el espectrógrafo LIRIS en WHT son instrumentos que pueden acometer una gran

variedad de proyectos. Lo mismo puede decirse de la cámara infrarroja PANIC en CAHA 2.2m y el espectrógrafo multi-objeto/IFU WEAVE en WHT (La Palma), que ya han sido comentados más arriba.

En lo que respecta a la estructura galáctica, las ICTS españolas están jugando un papel clave en el hemisferio norte (2014-2016):

- 1) hay programas de largo plazo, con investigadores principales españoles, que se están llevando a cabo con WFC@INT, HERMES@MERCATOR, FIES@NOT
- 2) hay contribuciones españolas al proyecto SLOAN-APOGEE
- 3) CAFOS@CAHA2.2m está llevando a cabo la caracterización de las estándares espectroscópicas para los espectrómetros de Gaia.

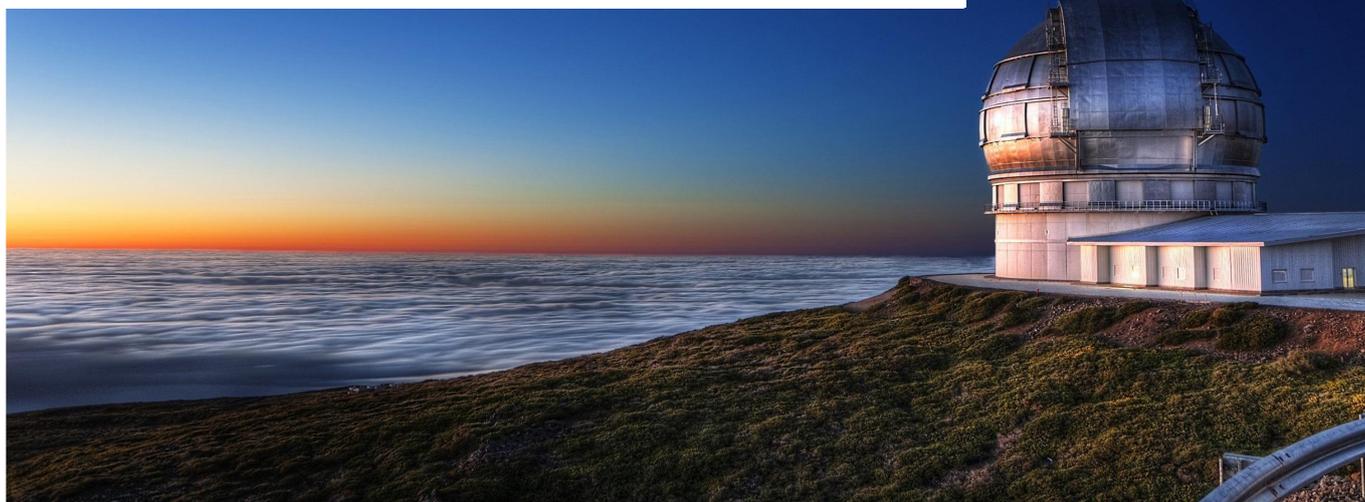
Pero, sin duda, GTC es el telescopio que debería dominar los próximos 10 años de la astronomía española en el hemisferio norte. Hasta ahora, su uso ha estado limitado por la instrumentación disponible, y también por la gran fracción de tiempo comprometido para grandes proyectos ESO-GTC, pero el advenimiento de los instrumentos en marcha para la próxima década, harán de él un instrumento clave para los estudios extragalácticos. Dentro de los instrumentos futuros esperados para GTC el modo MOS de OSIRIS y MEGARA (MOS e IFU) en el óptico, y EMIR y MIRADAS en el infrarrojo serán de la mayor utilidad para el desarrollo de muchos de los proyectos delineados más arriba.

- EMIR es una cámara de gran campo y un espectrógrafo multi-objeto de resolución intermedia en el infrarrojo. En modo multi-objeto podrá observar hasta 50 objetos simultáneamente.
- MEGARA (Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía) es una unidad de campo integral (IFU) y espectrografo multi-objeto (MOS) en el óptico (R~6000, 11000 and 18700). En modo IFU proporcionará una resolución espacial de hasta 0.42". En modo MOS, permitirá la observación de hasta 100 fuentes simultáneamente en una región de 3.5' x 3.5'.
- Finalmente, MIRADAS es un espectrógrafo echelle (R=20000) multi-objeto que operará en el infrarrojo, entre 1 y 2.5 μ .

Como nueva ICTS se incorpora el Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ) que ha sido concebido para llevar a cabo grandes cartografiados astronómicos multi-filtro de elevado interés científico en cuestiones

del ámbito de la Astrofísica y la Cosmología. El OAJ ha sido construido y gestionado por el CEFCa y cuenta con dos telescopios de muy gran campo de nueva generación de 2.55 m (el T250 o JST, Javalambre Survey Telescope) y 83 cm (el T80 o JAST, Javalambre Auxiliary Survey Telescope) de apertura. Con campos de visión de 3 y 2 grados de diámetro respectivamente, la instrumentación de primera luz consiste en cámaras panorámicas de gran campo, JPCam (1.2 Gpíxeles) y T80Cam (85 Mpíxeles), dotadas con bandejas de filtros que permiten obtener imágenes en diferentes bandas espectrales que proporcionan, finalmente, un espectro de baja resolución para cada píxel del cielo. La infraestructura dispone de un centro de datos dedicado (UPAD) para el archivo y procesado de los datos obtenidos en el OAJ. La UPAD cuenta con una capacidad de archivo de 5PB (1PB en sistemas de disco y 4PB en librería robótica) y 400 núcleos de procesado. El centro de datos proporcionará acceso a toda la comunidad a las imágenes y bases de datos científicas.

*Mar de nubes
junto a GTC.*



6. Actualización en 2020 de esta sección¹

Poblaciones estelares y evolución química y dinámica de galaxias

En los últimos años, diferentes grupos de investigación en este país han conseguido resultados notables en diferentes áreas críticas para comprender mejor la evolución de galaxias a través de sus poblaciones estelares y su dinámica. Por ejemplo, se han podido realizar comparaciones de historias de formación estelar detalladas, derivadas a partir de la observación de sus estrellas individuales, con estudios en galaxias no resueltas a partir de espectros integrados, validando así ambas estrategias. El objetivo fundamental es determinar el impacto en las historias de formación estelar tanto de procesos cosmológicos (ej. reionización) como locales (retroalimentación por supernovas, fuerzas de marea, migraciones estelares, etc.). Otros campos relacionados en los que la comunidad astrofísica española está haciendo importantes contribuciones incluyen: el estudio de poblaciones estelares múltiples en cúmulos globulares, las poblaciones estelares en los discos de galaxias espirales, la importancia de los procesos seculares en la evolución de galaxias, el impacto de las variaciones en la función inicial de masa, la importancia de la acreción de satélites, la evolución cósmica de las galaxias más masivas, etc.

Además, el estudio de las poblaciones estelares está recibiendo un nuevo impulso gracias, por un lado, a la disponibilidad de nuevas librerías estelares como la librería espectral de X-Shooter, la librería de MaNGA (MaStar) o la ampliación de MILES con estrellas con diferentes relaciones [Mg/Fe], y, por otro, a la ampliación de los modelos de síntesis hacia el NUV y el IR y la extensión a modelos muy jóvenes.

Desde el punto de vista observacional, uno de los hitos alcanzados en los últimos años ha sido la finalización de la construcción y la disponibilidad del instrumento MEGARA en el Gran Telescopio Canarias. MEGARA es un primer espectrógrafo de campo integral y multi-objeto de fibras de resolución intermedia ($R=6000-20000$) de alta eficiencia –basado en redes VPH. Fue instalado en GTC en la primavera de 2017 y está disponible como instrumento de uso común desde julio de 2018 en todos sus modos y de acuerdo a especificaciones. Hay que indicar que muchas de las características de MEGARA se encuentran también en instrumentos en desarrollo tales como MOSAIC@ELT, WEAVE@WHT, 4MOST@VISTA. La combinación única de resolución espectral y eficiencia de MEGARA está generando importantes resultados en el

estudio de objetos difusos, tanto galácticos como extragalácticos. En este último caso, la alta resolución espectral de MEGARA está permitiendo grandes avances en la modelización de poblaciones estelares (especialmente en discos y galaxias enanas de baja dispersión de velocidades) y en análisis de los momentos de mayor orden en el estudio de la dinámica estelar, del gas neutro y del gas ionizado.

Por otro lado, CALIFA ha representado el cartografiado más extenso jamás realizado hasta la fecha a nivel mundial en el modo espectroscópico 3D de un conjunto grande de galaxias de diferentes tipos morfológicos. Los datos obtenidos y calibrados se han liberado públicamente, constituyendo un gran legado para la comunidad internacional. El proyecto comenzó el 2010, y durante 350 noches distribuidas en 6 años se observaron más de 900 galaxias con la unidad de campo integral PPaK instalada en el telescopio de 3.5m de Calar Alto. CALIFA ha permitido estudiar la cinemática de las estrellas y del gas, las propiedades de las poblaciones estelares, y las historias de formación estelar de las galaxias, con información de sus propiedades en función de la distancia radial hasta 3-4 radios efectivos, pudiendo obtener las

¹ La presente actualización de la sección de Galaxias del estudio de prospectiva de la RIA, finalizado en 2015, describe de forma breve los aspectos más relevantes acontecidos desde 2015 en este campo de investigación. Se muestran los logros científicos de los proyectos que han culminado con éxito, el estado actual de los proyectos en desarrollo, y nuevas propuestas y proyectos planteados para un futuro próximo. Se han actualizado los campos "Poblaciones estelares y evolución química y dinámica de galaxias" (J. Gorgas, I. Márquez), "Galaxias activas" (I. Márquez, S. García Burillo), "Astro-química extragaláctica" (S. García-Burillo) y "La Vía Láctea y el Grupo Local" (E. Alfaro, F. Figueras).

propiedades globales y distinguirlas por zonas del disco y del bulbo. Estas características instrumentales y de selección de la muestra han hecho de CALIFA un proyecto único y pionero en los cartografiados 3D de galaxias para los estudios de evolución de galaxias. Hoy en día es considerado el precursor de otros cartografiados 3D que se desarrollan actualmente desde telescopios americanos y australianos.

Galaxias activas

Desde 2015 se ha contribuido a la comprensión de la estructura interna de las proximidades de los núcleos activos (AGN), con información procedente de todo el rango del espectro electromagnético (con XMM, Chandra, Swift, GTC, los VLT, Spitzer, WISE, ALMA, VLA, VLBI, entre otros), y para la plétora de AGN desde los de menor potencia hasta los cuántares. Se ha avanzado en la comprensión de la estructura de la BLR y del toro de polvo, con aproximaciones multi-frecuencia, desde rayos X a infrarrojo y radio pasando por el visible, y el uso de modelos que pueden reproducir los datos y permiten inferir propiedades estructurales que no se pueden resolver espacialmente, como la cinemática de las nubes de la BLR, o la composición del toro oscurecedor necesario en el modelo unificado, o incluso su misma presencia en el caso de AGN de baja luminosidad. En preparación para el JWST, se ha realizado una comparación exhaustiva entre diferentes modelos de toro (incluyendo el suave, el grumoso y su combinación) y se ha analizado cómo reproducen los datos reales de AGN de diferentes luminosidades. Asimismo se ha participado en el estudio estadístico de grandes muestras de AGN con información multi-

frecuencia, imprescindibles para entender su conexión con la evolución de las galaxias.

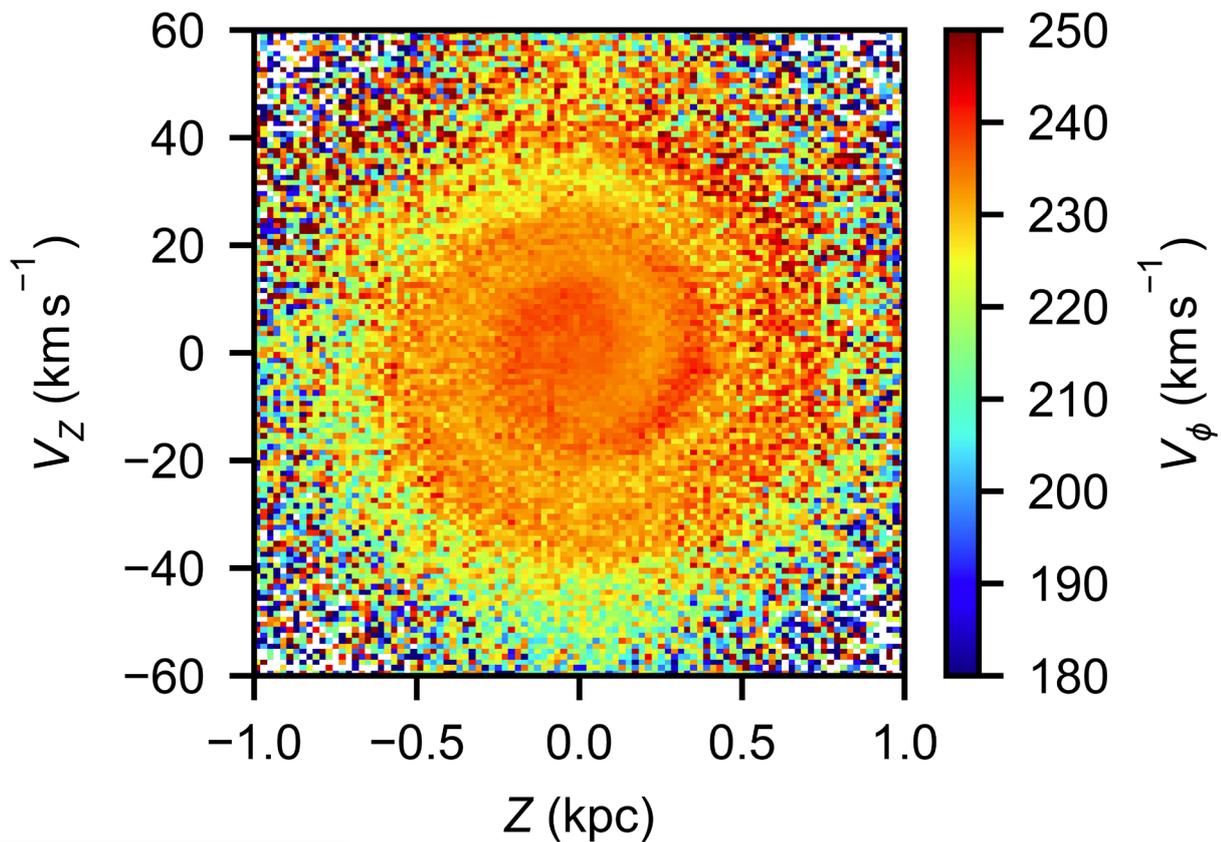
El Proyecto GATOS ("Galaxy Obscuration Torus and Outflow Survey") ha obtenido imágenes de las regiones centrales de una muestra de 10 galaxias activas Seyfert con una resolución espacial de algunos parsecs gracias a ALMA. Estas observaciones han permitido detectar la emisión de los discos de gas ('toros') en el entorno cercano de los agujeros negros centrales con un detalle sin precedentes. En particular, las nuevas imágenes del 'toro' de NGC1068 también obtenidas por ALMA ponen de relieve que el disco muestra una estratificación en densidad. Además, la dinámica del gas en el toro refleja los efectos de la retroalimentación ('feedback') de los vientos asociados al AGN. Estos resultados se han visto refrendados por la detección del 'toro' de la galaxia activa NGC5643, que al igual que en la galaxia NGC1068, muestra signos de una dinámica perturbada por los vientos y el chorro de partículas ('jet') que emanan del AGN.

Durante estos años se ha usado también ALMA para detectar, y en su caso, caracterizar las propiedades de los 'vientos moleculares' que son lanzados debido a la inyección de las grandes cantidades de energía asociada a los procesos de formación estelar o a la actividad nuclear en galaxias que se encuentran en interacción. Las observaciones de VLBI siguen siendo la única evidencia directa de los chorros relativistas en los AGN, y han contribuido a proporcionar un monitoreo sistemático del movimiento relativista en los chorros de AGN en escalas de parsec. Por otra parte, la información proporcionada por los rayos X ha permitido obtener una

visión mucho más detallada de cómo ocurren potentes vientos superrápidos y su posible efecto en los procesos de retroalimentación, invocados por los modelos de evolución de galaxias. A escalas espaciales superiores, se ha estudiado la eventual presencia de chorros en el gas ionizado y neutro en galaxias activas tipo LINER, con espectroscopía en el visible, encontrándose una contribución considerable de los vientos en este tipo de objetos. El uso de la espectroscopía de campo integral de muy alta resolución espacial con MEGARA está empezando a proporcionar resultados sin precedentes en cuanto a la detección de posibles componentes cinemáticas que no habían podido ser detectadas hasta ahora.

La utilización de simulaciones numéricas está ayudando a probar la conjetura de que las grandes fusiones alimentan los AGN duales del universo local, y a entender las discrepancias entre las predicciones y la detección de pares activos en términos de las limitaciones observacionales.

En cuanto al estudio del agujero negro supermasivo *per se*, el Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT) ha permitido obtener información a una escala espacial impensable hace unos años, gracias al uso de interferometría de muy larga base, y la coordinación de un enorme equipo internacional que ha utilizado los mejores radio telescopios del mundo junto con el desarrollo de nuevos algoritmos. El 10 de abril de 2019 se anunciaba la obtención de la primera imagen de las inmediaciones del horizonte de sucesos de un agujero negro con el EHT. La imagen de M87*, el agujero negro del centro de



*Distribución de estrellas en el plano
Posición vertical - Velocidad a partir de
datos del DR2 de Gaia, indicativo de
una perturbación del disco galáctico
hace unos 300-900 millones de años.*

la galaxia M87, mostraba un anillo de emisión, más brillante en la región sur del anillo, que envolvía a una región central más oscura, que corresponde a la sombra del agujero negro producida por la captura de fotones en el horizonte de sucesos. Debido a la enorme curvatura del espacio-tiempo en la proximidad del horizonte de sucesos, los fotones giran alrededor del objeto supermasivo produciendo el anillo de luz, y además se produce un efecto de lente que curva las trayectorias de las ondas lumínicas. Este resultado es perfectamente consistente con la teoría de la Relatividad General. Los próximos retos serán la obtención de la imagen de Sgr A*, el agujero negro ubicado en el centro la

Vía Láctea, o más propiamente la película de cómo evoluciona la estructura más interna (la vecindad del horizonte de sucesos) en escalas de minutos. Por otro lado, el EHT permitirá estudiar la conexión entre el agujero negro y el chorro (jet) relativista que emana de su corazón central.

Astro-química extragaláctica

El uso de interferómetros como el Atacama Large Millimeter Array (ALMA) está permitiendo caracterizar con un grado de detalle sin precedentes la cinemática, las condiciones físicas y la composición química del medio interestelar de un número creciente de galaxias externas. Gracias a la capacidad de ALMA para

detectar y resolver espacialmente la emisión de una gran variedad de compuestos moleculares, se pueden estudiar los procesos relacionados con la formación de estrellas así como los asociados a la alimentación y a la retroalimentación de los agujeros negros supermasivos (actividad nuclear).

Desde el año 2015 se han publicado varios trabajos donde se estudian las leyes de la formación estelar en diferentes poblaciones de galaxias, que abarcan desde objetos del universo lejano (proyecto PHIBSS) hasta galaxias próximas, tanto en aislamiento, como en interacción. Estos artículos ponen de manifiesto que existe una gran variedad de relaciones que las leyes de formación estelar siguen

dependiendo de los entornos dinámicos que afecten a estos procesos a escala galáctica.

ALMA ha revolucionado más específicamente el estudio de la química del gas molecular en galaxias externas. A finales del año 2017, se publicaron observaciones obtenidas por el interferómetro ALMA de la emisión del compuesto molecular C_2H en el disco de la galaxia activa prototípica NGC1068. La interpretación de estas observaciones mediante modelos químicos desarrollados en colaboración con investigadores del University College of London (UCL) ha permitido poner de manifiesto que la química de choques asociada al viento, si actúa en concierto con los fotones ultravioleta, es capaz de incrementar de forma espectacular la abundancia de ciertos compuestos químicos. A la luz de estos resultados, desde el año 2018 se han utilizado más datos obtenidos por ALMA en diversas galaxias activas y en galaxias con brotes de formación estelar en una gran variedad de especies moleculares (CS, SiO, HCN, HCO+) para caracterizar con mayor precisión las propiedades físico-químicas del gas en los diferentes entornos de los discos de diferentes poblaciones de galaxias.

La Vía Láctea y el Grupo Local

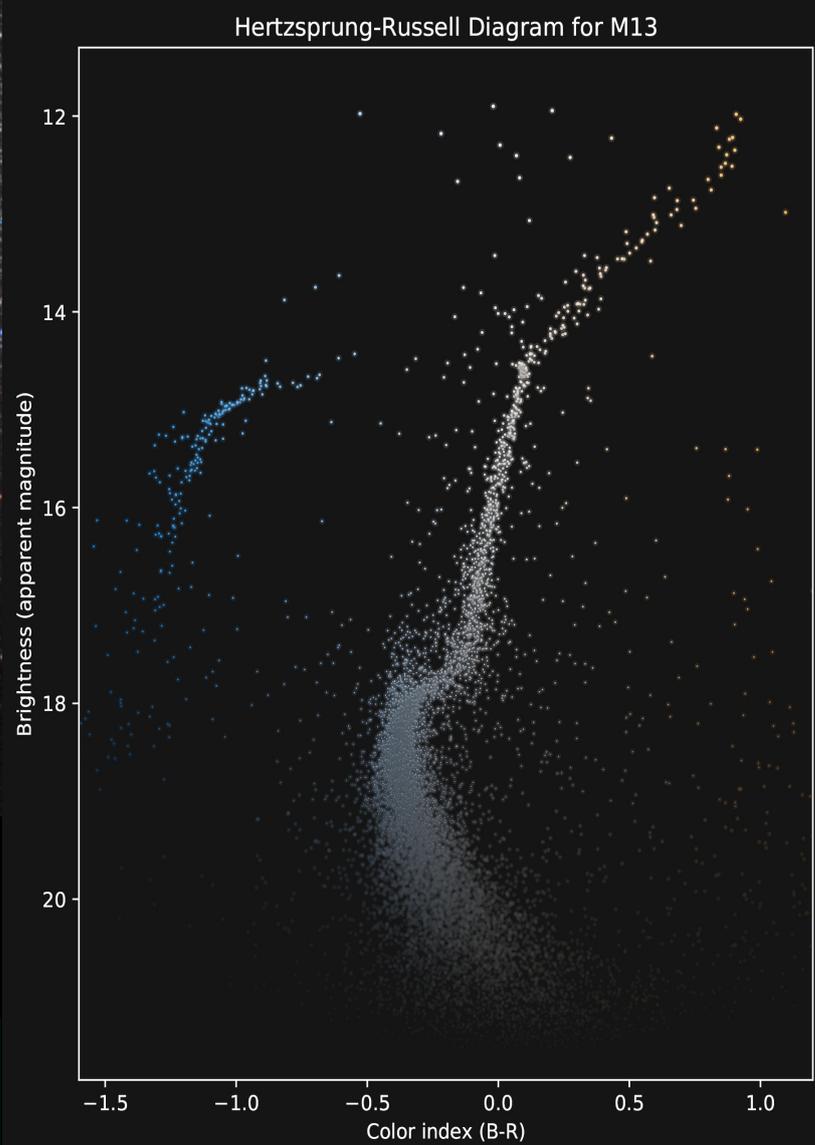
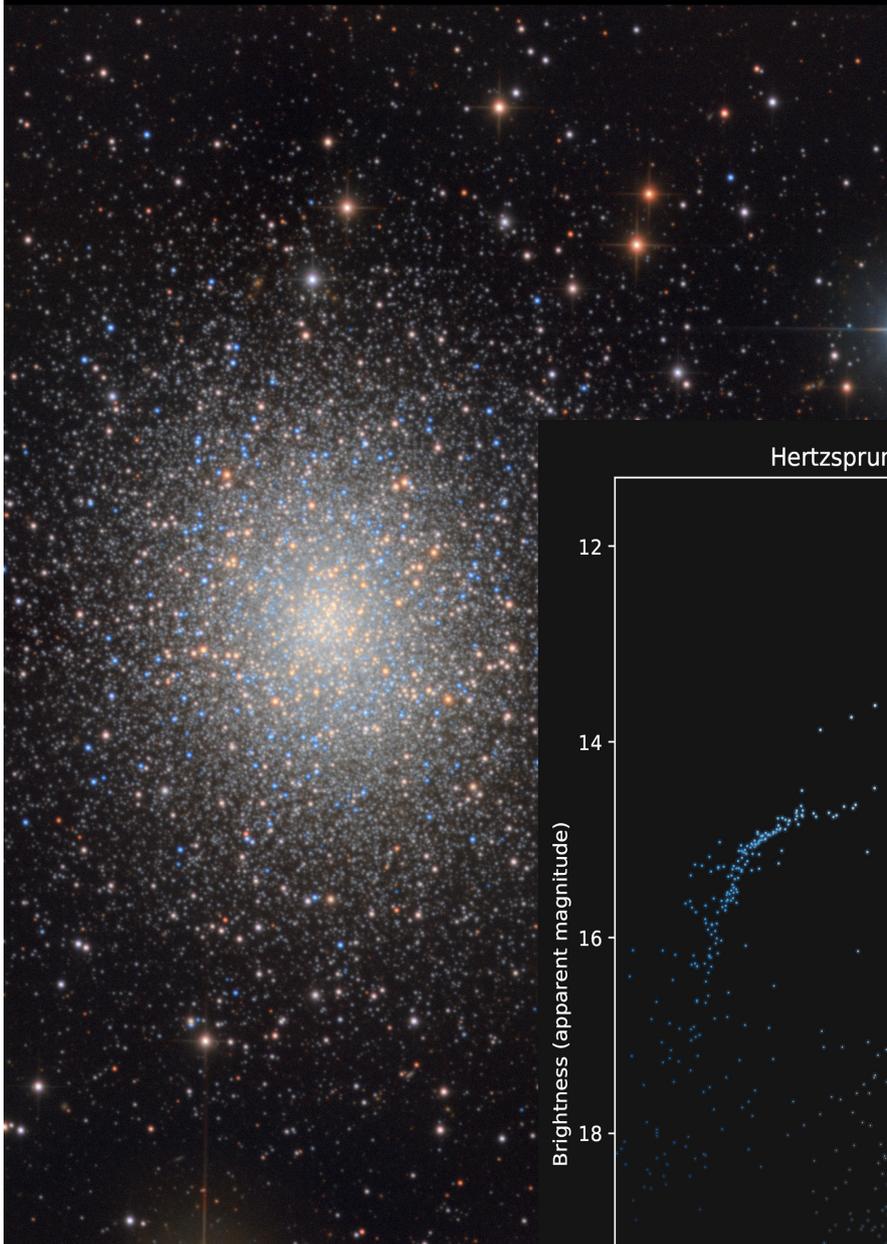
La impresionante calidad de los datos astrométricos, fotométricos y espectroscópicos aportados por la misión Gaia (DR1-2016 y DR2-2018), combinados con los primeros grandes surveys espectroscópicos (GES, APOGEE, LAMOST, GALAH), han permitido los primeros avances en arqueología galáctica de precisión. Entre otros: 1) se han podido identificar algunas de las colisiones que han dado forma a la galaxia que hoy conocemos; 2) los datos cinemáticos de la componente estelar del

disco de la Vía Láctea nos muestran un sistema dinámico claramente fuera del equilibrio; 3) estamos pudiendo trazar la evolución de algunos de los complejos procesos de interacción con las nubes de Magallanes, y 4) por primera vez hemos trazado parámetros orbitales de precisión para galaxias satélites. Esto es solo el inicio de los avances que se avecinan en arqueología galáctica. En un futuro ya inmediato podremos combinar nuevos datos de Gaia (eDR3: Q2-2020, DR3: Q3-2021, DR4: 2024) con los cartografiados fotométricos y espectroscópicos de EMIR@GTC, WEAVE@WHT (2020-2025) y 4MOST@VLT (2022-2027). Dispondremos de información completa (6D espacio fase y parámetros físicos y abundancias de hasta 15 elementos químicos) para millones de estrellas, pudiendo así constreñir complejos modelos de evolución química y dinámica de galaxias tipo Vía Láctea. En el desarrollo de esta línea de investigación se hace imprescindible el avance en paralelo de nuestra comunidad en el manejo de técnicas de Big Data, en el uso de herramientas del Observatorio Virtual y en la generación de simulaciones cosmológicas de galaxias tipo Vía Láctea.

En el periodo 2015-2020 han continuado los sondeos fotométricos y espectroscópicos de la componente estelar del disco galáctico (IACOB, GALANTE, GOSS y OCCASO, entre otros) y han comenzado a dar los primeros resultados otros nuevos cartografiados fotométricos (J-PLUS y J-PAS) que aportarán importante información sobre el disco y el halo Galáctico. A título de ejemplo, la combinación de espectroscopía de muy alta resolución con la astrometría de Gaia, está permitiendo explorar y por primera vez cuantificar los gradientes de abundancias

químicas en subsistemas Galácticos, como el disco y el bulbo, así como en regiones de formación estelar. Estos son observables imprescindibles para avanzar en la comprensión de los complejos procesos físicos involucrados en los mecanismos de fragmentación y formación estelar (IMF), pilares fundamentales en la evolución química del universo. Pero sin lugar a duda los datos cinemáticos de alta calidad provenientes de Gaia con la combinación de grandes cartografiados espectroscópicos, permitirán la detección y análisis de subestructuras del espacio fase que, seguro, nos proporcionarán una nueva visión de la naturaleza, origen y evolución de la Vía Láctea.

Es evidente que hay grandes áreas de la Galaxia no accesibles en el rango visible y que forman parte sustancial de los objetivos observacionales más relevantes y urgentes. Estos son el Centro Galáctico y algunas regiones de formación estelar todavía embebidas en su material primigenio, entre otras. Se ha comenzado un estudio de viabilidad de una nueva misión espacial de la ESO que podría resumirse en Gaia-NIR y cuyos objetivos principales serían: a) Exportar los logros astrométricos de Gaia a regiones solo visibles en el cercano infrarrojo, b) mantener la precisión del sistema de referencia óptico y c) mejorar los paralajes y movimientos propios de la misión Gaia incrementando su base temporal. Resulta evidente que la comunidad española no puede estar fuera de esta empresa, como así lo atestiguan la presencia de astrónomos españoles en diversos estudios previos. Esperamos que la entrada en régimen de crucero del espectrógrafo EMIR en el GTC proporcione datos únicos y relevantes de la Galaxia en este rango espectral.



*Diagrama HR del cúmulo M13.
La posición del "turn-off"
desde la secuencia principal
lo data en 12000 millones de
años (créditos: Gumusayak &
Vanderbei). Página opuesta:
recreación de una enana marrón
(NASA/JPL-Caltech).*

Física estelar y subestelar

Índice

1. ESTRELLAS Y OBJETOS SUBESTELARES p. 86

2. OBJETIVOS CIENTÍFICOS PARA LA DÉCADA p. 86

- 2.1. Estrellas de masa baja e intermedia p. 86
- 2.2. Estrellas masivas p. 88
- 2.3. Fases avanzadas de evolución: AGB, post-AGB y PNe p. 90
- 2.4. Últimas fases de evolución estelar p. 91
- 2.5. Objetos subestelares: enanas marrones, planetas aislados y exoplanetas p. 93

3. ESTADO ACTUAL p. 95

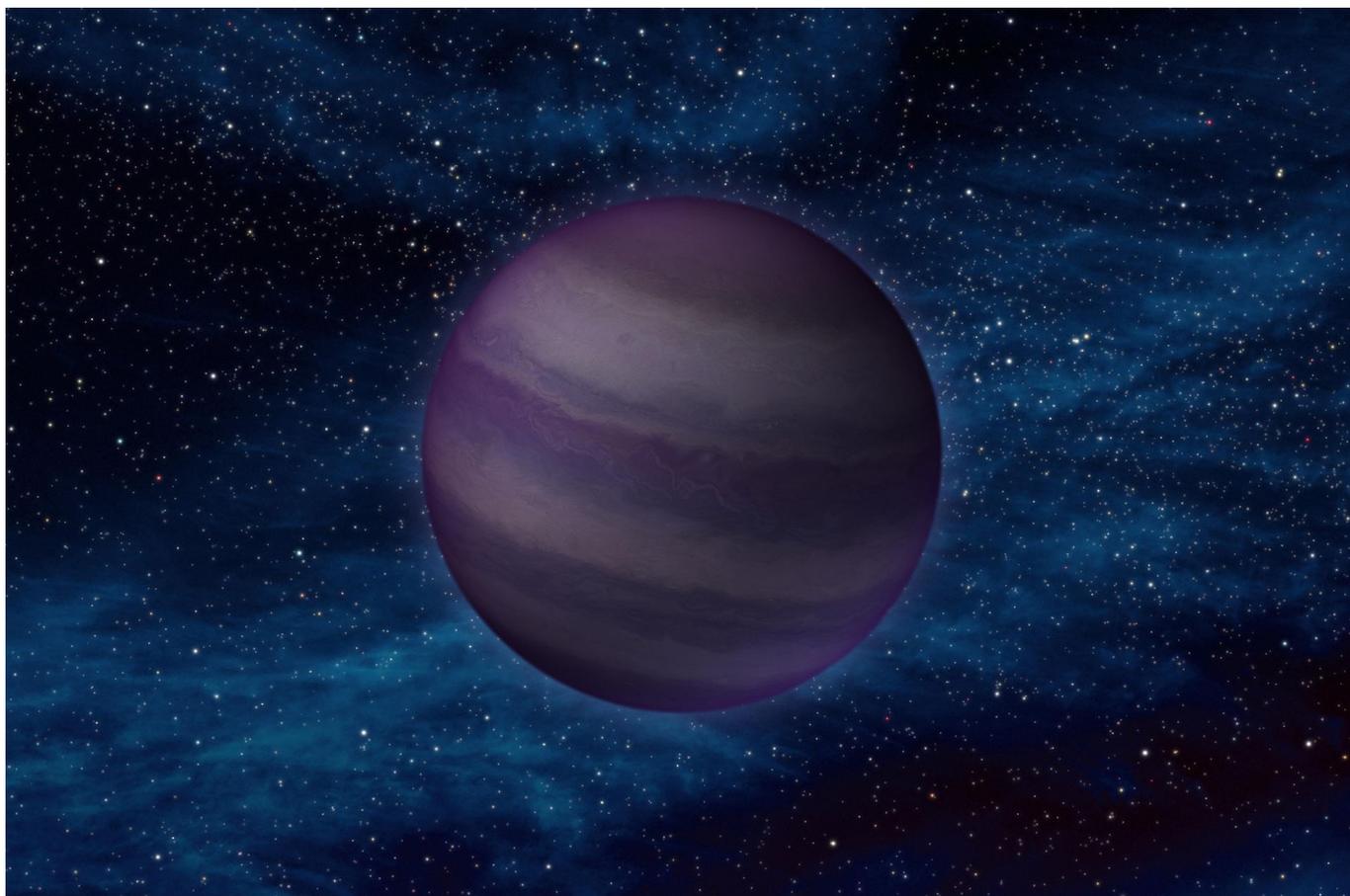
- 3.1. Estrellas de masa baja e intermedia p. 95
- 3.2. Estrellas masivas p. 97
- 3.3. Fases avanzadas de evolución: AGB, post-AGB y PNe p. 98
- 3.4. Últimas fases de evolución estelar p. 98
- 3.5. Objetos subestelares: enanas marrones, planetas aislados y exoplanetas p. 100

4. NECESIDADES INSTRUMENTALES p. 100

- 4.1. Telescopios terrestres y satélites p. 100
- 4.2. Ordenadores p. 103

5. PROYECTOS CONSOLIDADOS Y ACCIONES ESTRATÉGICAS PARA EL FUTURO p. 104

6. ACTUALIZACIÓN EN 2020 DE ESTA SECCIÓN p. 110



1. Estrellas y objetos subestelares



El estudio de la formación y evolución de las estrellas y objetos subestelares (enanas marrones y exoplanetas) constituye un campo de singular actividad en nuestro país.

Las estrellas son utilizadas como trazadoras de la estructura y evolución dinámica y química de las galaxias y el Universo. A grandes distancias observamos el brillo de las regiones que iluminan y nos permiten derivar sus propiedades físicas a través del tiempo. Sus últimos estadios nos permiten trazar la expansión del Universo y penetrar en él profundamente. Más cerca de nosotros, nos revelan detalles de la estructura de la Vía Láctea y sus épocas anteriores. Las enanas marrones y

los exoplanetas nos están desvelando los detalles de la formación de sistemas como nuestro propio Sistema Solar y en definitiva, la estructura de nuestro propio planeta y su papel en el Universo.

En este documento se presenta una perspectiva de la situación actual y de las necesidades futuras inmediatas de la investigación en este campo, desde las estrellas más masivas, las de masa intermedia y baja y las enanas marrones, a los objetos de masa planetaria. Evolutivamente, se contempla desde la formación de discos protoplanetarios a las fases avanzadas y los objetos compactos resul-

tantes de la evolución estelar (agujeros negros, estrellas de neutrones, etc.), incluyendo los fenómenos explosivos que presentan al final de su vida (como supernovas y GRBs).

Debe tenerse en cuenta que este documento es una primera aproximación a dicha perspectiva, y que es necesariamente incompleto, y probablemente sesgado. Una mayor participación de la comunidad (algunos de cuyos miembros han ayudado al equipo firmante a elaborarlo, lo que agradecemos profundamente) y una más cuidada reflexión son necesarias para una correcta exposición del estado actual y las necesidades futuras.

2. Objetivos científicos para la década

2.1. Estrellas de masa baja e intermedia

Contexto

Las estrellas se forman en nubes moleculares, que son regiones con cierta densidad de gas y polvo, como resultado de la aparición de núcleos densos de materia. En nuestra Galaxia se siguen formando estrellas hoy en día. Está ampliamente aceptado el hecho de que las estrellas se forman en sistemas altamente jerarquizados que siguen la es-

tructura fractal del medio interestelar. La estructura jerarquizada se extiende desde complejos estelares (grandes porciones de los brazos espirales de galaxias floclentas) a través de cúmulos embebidos a estrellas individuales en esos cúmulos. La escala de los cúmulos es la mejor métrica para medir y analizar todo el intervalo espacial en la formación de sistemas estelares.

El campo magnético de la Galaxia desempeña un papel fundamental en la formación estelar. La turbulencia hidromagnética actúa de manera selectiva permitiendo el colapso gravitacional en escalas pequeñas mientras que sostiene la estructura de la nube en las grandes escalas. El tamaño y las propiedades de los granos de polvo en el medio interestelar desempeñan un papel fundamental en este proceso. Los



procesos de formación dan lugar a la distribución de masas de las estrellas que se forman (la llamada Función Inicial de Masas), uno de los principales indicadores de estos procesos.

El campo magnético galáctico se transporta en el colapso gravitacional que da lugar a la formación de estrellas. En los sistemas jóvenes, precursores de sistemas planetarios como el nuestro, las estrellas jóvenes poseen unas magnetosferas muy poderosas que canalizan el flujo de acrecimiento durante la formación de la estrella. Estas magnetosferas son una fuente de radiación UV y X que desempeña un papel fundamental en la evolución de los discos protoplanetarios. La radiación UV controla la extensión de las termosferas planetarias, la interacción atmósfera planetaria-espacio y su evolución/estabilidad.

Las estrellas de baja masa tienen una vida larga ($\sim 10^{11}$ años) en comparación con las estrellas más masivas cuya vida puede ser inferior al millón de años. Es posible encontrar entre ellas algunas que se formaron hace unos 13.000 millones de años, cuando el Universo era muy joven. Tras la explosión como supernova de las primeras estrellas, el medio interestelar se enriquece muy rápidamente en elementos pesados. La composición química de las estrellas de baja masa más antiguas de la Galaxia nos permite medir los isótopos producidos en la nucleosíntesis primordial, que tuvo lugar tras el Big Bang, así como los productos de las primeras supernovas.

Tras una etapa estable, de miles de millones de años en la secuencia principal, las estrellas de baja masa inician la combustión de elementos

más pesados que el H y se transforman en gigantes rojas. Aunque la duración de esta fase es más corta (un 10% aproximadamente de la vida en la Secuencia Principal) su mayor brillo, especialmente en el infrarrojo, las hace excelentes trazadoras de la estructura galáctica e indicadores de distancias.

Objetivos

Los mecanismos de formación estelar siguen planteando numerosas preguntas. A nivel de la estructura estelar, misiones como CoRoT y Kepler han abierto nuevos interrogantes sobre la estructura interna de las estrellas. El uso de estrellas de masa baja e intermedia (hasta la fase de RGB) para trazar la estructura de la Vía Láctea y su historia pasada descansa sobre nuestro conocimiento de las propiedades de estas estrellas. Es fundamental comprender el papel del campo magnético en la formación de las estrellas y los sistemas planetarios.

Los objetivos se centran en responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la influencia de la dimensión fractal de una nube en la nueva población de estrellas que se está formando en su seno?
- ¿Cómo se forman las estrellas en un cúmulo?
- ¿Cómo interactúan las magnetosferas de las estrellas jóvenes con los discos de acrecimiento?
- ¿Cómo interactúan las magnetosferas estelares con las atmósferas planetarias germinales?
- ¿Cuál es la composición química de los discos planetarios?
- ¿Cómo se producen los jets? ¿cómo afectan los jets a la evolución de los discos?
- ¿Cómo afecta la evolución de

la estrellas y de su momento angular a la caracterización de sistemas planetarios?

- ¿Qué fracción de estrellas binarias se forman por evolución y cuántas por captura en las regiones de formación de estrellas?
- ¿Cómo afecta la binariedad a la evolución magnetosférica?
- ¿Cuál es la estructura 3D de la Vía Láctea? ¿Cuál es la estructura de su barra central? ¿Ha generado la interacción de esta barra con los brazos una formación estelar especialmente intensa?
- ¿Por qué es el parsec central de la Galaxia una región de formación estelar tan prolífica?
- ¿Existe una variación acimutal de abundancias en la Vía Láctea?
- ¿En qué medida la variación de la metalicidad de entre galaxias o incluso entre zonas de nuestra Galaxia, puede afectar a las características del polvo interestelar y al acoplamiento de las nubes con los campos magnéticos galácticos? ¿Cómo afecta este hecho a la función inicial de masas?
- ¿Cuál es la estructura interna de las estrellas de masa intermedia? ¿En qué observables astrosismológicos concretos podemos basar la evolución completa de dichas estrellas?
- ¿Qué observable astrosismológico puede revelarnos unívocamente la presencia de rotación estelar?
- ¿Cuál es el papel de las atmósferas estelares en los pulsos estelares?
- ¿Cuál es la composición química de las estrellas más pobres en metales? En particular, ¿cuál es la razón de abundancias de los diferentes elementos químicos en estas estrellas y qué nos dicen sobre las primeras épocas de la Vía Láctea?

2.2. Estrellas masivas

Contexto

Las estrellas masivas nacen con masas superiores a ocho veces la masa del Sol, lo que las condena a explotar como Supernovas al final de su vida, formando estrellas de neutrones y agujeros negros y produciendo Estallidos de Rayos Gamma. Las altas luminosidades implican poderosos campos de radiación que provocan intensas pérdidas de masa. Su evolución es muy rápida (viven entre 3 y 30 millones de años) y atraviesan fases con propiedades no bien conocidas, como las supergigantes (azules y rojas), las Variables Luminosas Azules y las Wolf-Rayet. Durante esta evolución liberan gran cantidad de material procesado nuclearmente a través de fuertes vientos estelares (pueden perder hasta el 90% de su masa) emitiendo gran cantidad de radiación en

forma de fotones de alta energía. Al ser muy calientes y luminosas pueden estudiarse individualmente en galaxias cercanas, en donde la física de estas estrellas puede aproximarse a la del Universo primitivo, y observarse colectivamente en regiones de intensa formación estelar a grandes distancias, incluso poco después de la reionización del Universo, que podrían haber causado. Su alta masa las predispone a formar sistemas binarios o múltiples, que pueden evolucionar a binarias masivas de rayos X y formar objetos compactos. La formación de las estrellas masivas (que discutimos en la siguiente sección) sigue pautas diferentes a las de las de menor masa, y aún no se conocen bien sus mecanismos. Hay un activo debate acerca de este punto, con diversos escenarios confrontados, no necesari-

amente excluyentes, incluyendo la posible fusión de estrellas antes de alcanzar fases avanzadas de su evolución. Esta combinación de sistemas múltiples y fusiones podría afectar a la distribución inicial de masas de las estrellas.

Las estrellas masivas constituyen el origen de fenómenos tremendamente energéticos y son un agente primario de la evolución química y dinámica de las galaxias y del Universo. Sin embargo, aún hoy plantean importantes interrogantes, lo que precisamente limita nuestra capacidad para entender la evolución de las galaxias y el Universo. Curiosamente, a pesar de todos los avances de la física estelar, carecemos todavía de algo tan básico como una idea clara de las distintas fases por las que pasa una estrella masiva en su evolución.

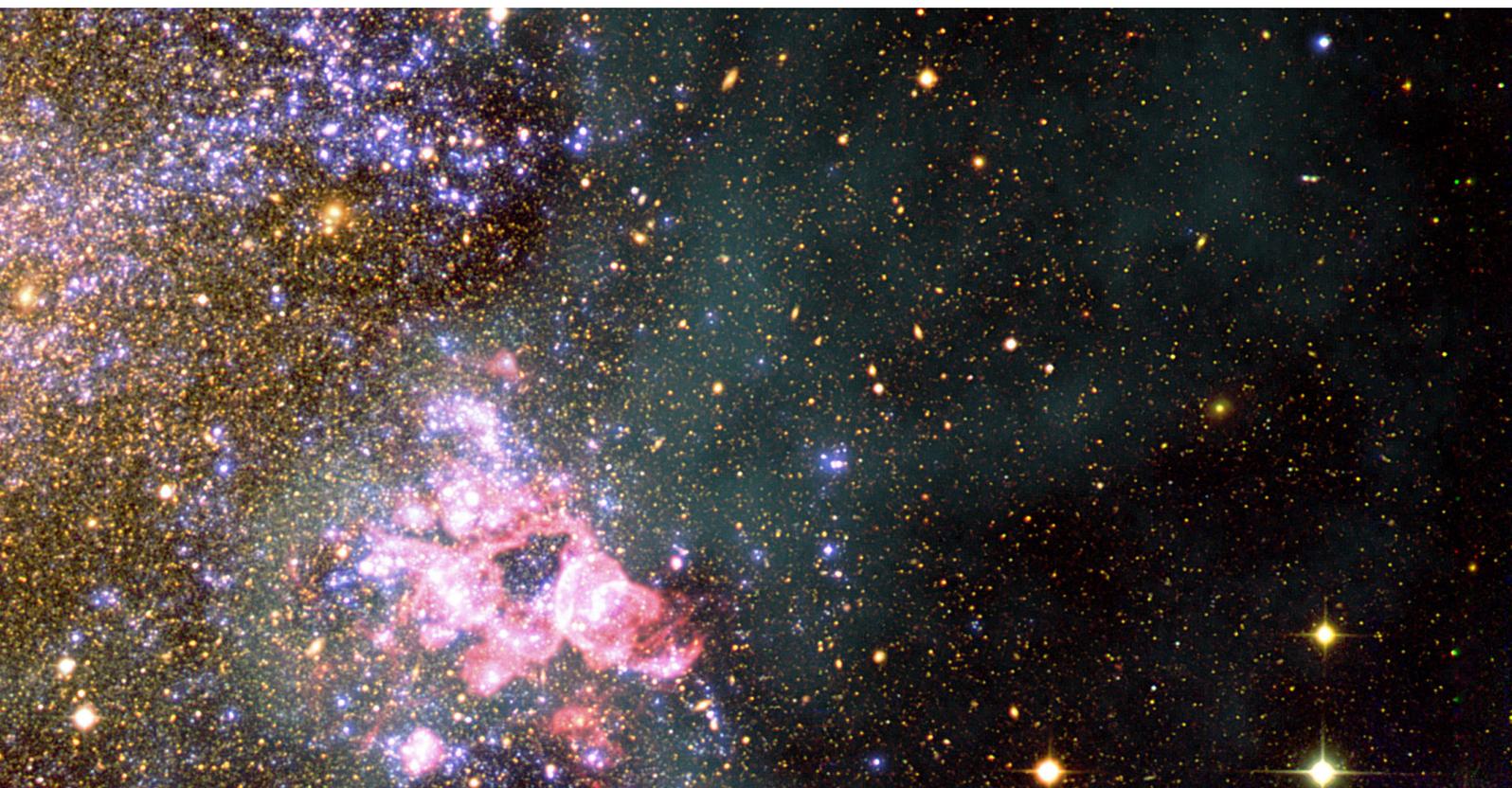


IC1613, una galaxia irregular enana en el Grupo Local a 0,7 Mpc de distancia, de muy baja metalicidad, próxima a la del Universo primitivo. Las estrellas masivas son claramente visibles en esta imagen por su coloración azulada y las zonas que iluminan a su alrededor (G. Pérez (IAC) y M. García (CAB) a partir de datos del WHT, GALEX y VLA).

Objetivos

Entre los principales objetivos a alcanzar en el campo de las estrellas masivas figuran los siguientes:

- El impacto: ¿Cómo eran las primeras estrellas que nacieron en el Universo? ¿Fueron responsables de la reionización del Universo? ¿Cómo cambian las propiedades de las estrellas masivas con el tiempo cósmico? ¿Cuál es su interacción con el medio que las rodea? ¿Cuál es su papel en el enriquecimiento químico del universo desde las primeras estrellas hasta la actualidad?
- Las condiciones iniciales: ¿Cuál es el mecanismo de formación de las estrellas masivas? ¿Cuál es la fracción de estrellas masivas en sistemas múltiples interactivos y cuál es su destino? ¿Cuál es su velocidad de rotación al nacer? ¿Hay un campo magnético fósil en las estrellas masivas?
- La masa de las estrellas masivas: ¿Cuál es la mayor masa que puede alcanzar una estrella? ¿Cuál es la distribución de masas (la llamada *Función Inicial de Masas*) para estrellas masivas? ¿Hay estrellas masivas formadas por la fusión de otras de menor masa? ¿Cómo podemos conocer la masa de una estrella aislada?
- La evolución de las estrellas masivas: ¿Qué produce la contaminación temprana de las capas superiores de la atmósfera por material procesado en el interior? ¿Cómo se ordenan los diferentes tipos espectrales que observamos a lo largo de la evolución de una estrella? ¿Cuál es la relación entre la masa inicial y final de la estrella, y cómo cambia con la metalicidad? ¿Cuál es el papel de la rotación, el campo magnético y las pulsaciones?
- El viento de las estrellas masivas: ¿Cuáles son la estructura y propiedades del viento de las estrellas masivas? ¿Por qué parece fallar la teoría de los vientos estelares para algunas estrellas? ¿Cómo varía la pérdida de masa estelar cuando nos acercamos a las condiciones del Universo primitivo? ¿Cuál es la pérdida de masa en las fases de viento intensos (Wolf-Rayets y Variables Azules Luminosas)? ¿Determinan éstas el residuo final (estrella de neutrones o agujero negro)?
- Las estrellas masivas en la Vía Láctea y otras galaxias: ¿Cuántas estrellas masivas hay en la Vía Láctea? ¿Dónde se encuentran? ¿Cuáles son las distancias a estas estrellas en la Vía Láctea? ¿Forma la Vía Láctea cúmulos muy masivos? ¿Cuántos hay? ¿Cómo se comparan con los cúmulos formados en otras galaxias? ¿Qué papel desempeñan los cúmulos de estrellas masivas en el centro Galáctico? ¿Cómo influyen en la energética y dinámica del material susceptible de ser capturado por su agujero negro masivo?





Nebulosa planetaria de la
Hélice (NASA/ESA/HST).

2.3. Fases avanzadas de evolución: AGB, post-AGB y PNe

Contexto

Tras una etapa estable en la Secuencia Principal que varía entre varias decenas de millones y miles de millones de años en función de su masa, las estrellas de masa baja e intermedia inician la combustión de elementos más pesados que el H. Antes de acabar su evolución, pasan por la fase AGB, expulsan su envoltura y se convierten en post-AGBs y PNe. Las AGBs son las principales productoras de elementos fundamentales para la vida como el carbono, de la mitad de los elementos más pesados que el hierro (a través del proceso) y de elementos con implicaciones cosmológicas como el Li. Sus núcleos, de carbono y oxígeno, son los progenitores de las enanas blancas, determinando su distribución en masa y la relación entre masa inicial y masa final. Esta fase es un buen laboratorio de astrofísica nuclear, en particular, para las reacciones de producción y captura de neutrones.

Las estrellas AGB son muy brillantes, particularmente en el infrarrojo, y pueden ser estu-

diadas de forma individual en galaxias cercanas. Las nebulosas planetarias son objetos en transición desde las últimas fases evolutivas de las estrellas de masa baja e intermedia hacia la etapa de enana blanca, en la que acaban convirtiéndose. Las nebulosas planetarias concentran gran parte de la energía emitida por su estrella central en unas pocas líneas de emisión, y pueden llegar a observarse en los cúmulos cercanos de galaxias, hasta Virgo y Coma. Ambos tipos de objetos ofrecen así una excelente oportunidad para investigar el Universo cercano.

Objetivos

Tenemos un conocimiento general de todas estas etapas pero quedan cuestiones fundamentales por resolver. Destacamos entre los objetivos a alcanzar:

- los mecanismos y ritmos de pérdida de masa que determinan, entre otras cuestiones, la duración de la fase AGB,
- la evolución desde la fase AGB a la formación de las PNe,

- los procesos físicos que determinan la mezcla de material en el interior de las AGBs y la nucleosíntesis asociada,
- la formación de polvo y moléculas – incluidas moléculas complejas, hidrocarburos y fullerenos,
- la composición química detallada de las atmósferas y envolturas circunestelares,
- las propiedades morfológicas y dinámicas de estas atmósferas y envolturas,
- la dependencia de todo lo anterior con la metalicidad inicial, desde las primeras poblaciones a las muy ricas en metales,
- la asociación de la morfología de la nebulosa planetaria con las propiedades de la estrella progenitora,
- la búsqueda de compañeras de la estrella que forma la nebulosa planetaria y el papel de la binariedad en la morfología de la nebulosa y su evolución,
- la composición química de la nebulosa planetaria y su dependencia con la masa de la estrella central.



2.4. Últimas fases de evolución estelar

Contexto

Al final de su evolución las estrellas forman una variedad de objetos: objetos compactos, binarias de rayos X y gamma, supernovas termonucleares y por colapso gravitatorio y GRBs. Todos ellos constituyen excelentes laboratorios de física nuclear, de partículas y de física en condiciones extremas, son claves para entender la evolución estelar y pueden producir intensas ondas gravitatorias.

El 95% de las estrellas son de masa baja e intermedia, y al final de sus vidas se convierten en enanas blancas (salvo en su extremo de menor masa, en que no llegan a encender el He), tras una fase AGB y PNe. La mayoría de las enanas blancas son de carbono y oxígeno, aunque hay enanas blancas de oxígeno y neon, que procederían de las estrellas intermedias más masivas, cuyo origen no se entiende completamente.

También hay una extensa población de enanas blancas de He aisladas, cuya formación solo nos explicamos en sistemas binarios.

Cuando las enanas blancas forman parte de un sistema binario pueden acretar materia desde una compañera, dando lugar a novas, binarias de rayos X o supernovas de tipo Ia (SNIa), explosiones termonucleares de enanas blancas en sistemas binarios. Las SNIa son las principales productoras de Fe y tienen un papel clave en Cosmología pues debido a su alta luminosidad y la posibilidad de calibrarlas a partir de su curva de luz, constituyen los mejores indicadores de distancia extragalácticos. Las SNIa han trazado la historia de la expansión del Universo, mostrando la aceleración actual (Nobel de Física 2011). Este descubrimiento sorprendente se basa en las características conocidas de este tipo de objetos, cuya comprensión resulta fundamental para caracterizarla.

El otro 5% de estrellas, que corresponde a las estrellas masivas, explota tras el colapso gravitatorio del núcleo (CCSNe, aunque las muy masivas podrían llegar a formar otro tipo de supernovas, como las Supernovas por Inestabilidad de Pares), emitiendo GRBs, formando

estrellas de neutrones y agujeros negros, y expulsando al medio interestelar material enriquecido con los elementos químicos producidos por las reacciones nucleares ocurridas en su interior a lo largo de toda su evolución, y en la misma explosión. A partir de este material se forman nuevas estrellas y planetas, y en definitiva, la vida. La energía, la radiación y la materia expulsada por las CCSNe son claves para la evolución de las galaxias, los cúmulos de galaxias y el Universo. Se cree que estos objetos precedieron la formación de las galaxias, marcando la evolución del Universo primitivo.

También los remanentes de estrellas masivas pueden formar parte de un sistema binario y acretar masa de una compañera. En este caso, la alta intensidad de sus campos gravitatorios causa la emisión de radiación a alta energía, en rayos X y en ocasiones en rayos gamma, al caer el material acretado. En las binarias X transitorias se encuentran los más firmes candidatos a agujero negro y, por tanto, la posibilidad de caracterizarlos. Estos sistemas son excelentes laboratorios de física fundamental.

Uno de los grandes retos de la física fundamental y la astrofísica es la detección de las ondas gravitatorias. Esperamos que las fuentes más potentes de ondas gravitatorias sean eventos violentos, como las fusiones de agujeros negros y de estrellas de neutrones. Detectarlas nos llevará a entender la física de estos objetos, contrastar la teoría de la relatividad general y nos abrirá sin duda nuevos horizontes. Simultáneamente es importante planificar y detectar la contrapartida electromagnética.

Objetivos

Aunque se ha avanzado mucho en este campo gracias a las simulaciones numéricas y a las observaciones, quedan por resolver cuestiones fundamentales. Citamos, por ejemplo:

- ¿Cuál es el origen de las distintas poblaciones de enanas blancas?
- ¿Cuál es la distribución de masas de las enanas blancas, y su relación masa inicial - masa final? ¿Y las de las estrellas de neutrones y agujeros negros estelares?
- ¿Cuál es la masa máxima de una estrella de neutrones (y mínima para formar un agujero negro estelar)? ¿Cuál es la ecuación de estado de las estrellas de neutrones?
- ¿Cuál es origen de las SNIa? la identificación de los progenitores aun espera una confirmación observacional y consistencia con los modelos de síntesis de poblaciones y ritmos observados
- ¿Cuál es el mecanismo de explosión de las supernovas term nucleares? ¿depende de la metalicidad? ¿Qué SNIa pueden utilizarse como patrones de distancia?
- ¿Cuál es la relación masa inicial-masa final en las progenitoras de CCSNe? ¿Cómo influyen en ella la metalicidad y la pérdida de masa durante las fases anteriores? ¿Cuánto material se libera y cuánto queda atrapado en el objeto compacto?
- ¿Qué fracción de los distintos elementos químicos es liberado al medio por cada progenitor? ¿Cómo varían esas fracciones en función de las propiedades de los progenitores? ¿Dónde se forman los elementos r (por captura rápida de neutrones)?
- ¿Cuál es el mecanismo de explosión de las estrellas masivas tras el colapso del núcleo? ¿A partir de qué masa y en qué condiciones se pueden formar supernovas por inestabilidad de pares?
- ¿Cómo se produce la acreción sobre los objetos compactos en sistemas binarios? En particular, ¿Cómo se transfiere el momento angular?
- ¿Cuál es el origen de los GRBs? ¿Cómo varían sus propiedades con el tiempo cósmico?
- ¿Cuál es el papel de la rotación y los campos magnéticos en todos los escenarios?
- ¿Cómo se origina la radiación gamma en las binarias de rayos gamma?
- ¿Cómo se produce la fusión de objetos compactos? ¿Cómo detectamos ondas gravitatorias? ¿Y axiones, WIMPs, y otras partículas exóticas?

Todas las fases explosivas mencionadas y la nucleosíntesis asociada, dependen del estudio experimental y teórico de las reacciones nucleares relevantes y los resultados son la base para entender la evolución química de las galaxias y el Universo.

La rotación y pérdida de masa del progenitor son fundamentales para entender las explosiones y su conexión con los GRBs, que se cree que se producen al formarse chorros relativistas durante el colapso del núcleo. Las simulaciones necesarias para entender estas fases requieren los ordenadores más potentes. Probablemente aún no tengamos una buena muestra de todos los posibles finales de una estrella masiva, como puede ser la desestabilización por pares (pair instability supernovae) que podría explicar la SN 2007bi, o explosiones que desconocemos.



Dos regiones que permiten estudiar las propiedades de estrellas y objetos subestelares jóvenes: Orión (abajo), hasta los 100 millones de años y las Pléyades e Híades (arriba), con edades entre 120 y 800 millones de años (crédito: Rogelio Bernal Andreo).

2.5. Objetos subestelares: enanas marrones, planetas aislados y exoplanetas

Contexto

Los objetos subestelares tienen una masa inferior a la mínima necesaria para la fusión nuclear del hidrógeno en su interior, esto es $M < 0.072 M_{\text{sol}}$ para una abundancia química solar. La masa de la frontera subestelar varía inversamente con la metalicidad. Los objetos subestelares incluyen a las enanas marrones con masas en el intervalo 0.012 - $0.072 M_{\text{sol}}$ y a los objetos de masa planetaria ($M < 0.012 M_{\text{sol}}$) que se encuentren flotando libremente (planetas aislados) o en órbita alrededor de una estrella o enana marrón, en cuyo caso es costumbre denominarlos exoplanetas.

(a) Enanas marrones y objetos aislados de masa planetaria (planetas aislados).

Debido a la carencia de reacciones nucleares de relevancia, no brillan como las estrellas, sus propiedades físicas varían notablemente con la edad, y para edades típicas del Sistema Solar son más parecidos a los planetas gigantes gaseosos (como Júpiter) que a las estrellas. Su existencia, predicha teóricamente desde la década de 1960, fue confirmada mediante observaciones en longitudes de onda del visible e infrarrojo cercano en 1995, año en el que también

se anunció el primer exoplaneta gigante en órbita alrededor de una estrella de tipo solar.

A pesar de que hoy en día se conocen centenares de enanas marrones y cuerpos de masa planetaria aislados, los mecanismos de formación por los que se originan no están descritos ni desde el punto de vista observacional ni desde el teórico. Algunos observables, como son la fracción de sistemas binarios, la razón de masas entre las enanas marrones binarias, la presencia de discos y envolturas alrededor de los cuerpos subestelares y el censo de la población en cúmulos estelares y asociaciones de estrellas jóvenes (función de masas) son fundamentales para proporcionar evidencias que apoyen o descarten distintos mecanismos y teorías para la formación subestelar. La caracterización de las atmósferas subestelares mediante síntesis espectral permite ahondar en las propiedades físico-químicas de gases neutros con condiciones de presión y temperatura a caballo entre los planetas del Sistema Solar y las estrellas de baja masa.

(b) Exoplanetas

El descubrimiento de los primeros planetas alrededor de estrellas similares al Sol en la década de 1990 inició una nueva era en los estudios planetarios. En apenas veinticinco años de investigación se han detectado más de 900 exoplanetas. La diferencia de brillo o alto contraste entre las estrellas y sus exoplanetas (superior a 10^6 en el visible e infrarrojo cercano) a las edades típicas del Sistema Solar y el tamaño de las órbitas de menos de ~ 50 UA imponen serias dificultades para la detección directa de los exoplanetas. En consecuencia, la mayoría de los descubrimientos proceden de técnicas indirectas

espectroscópicas y fotométricas: medidas de velocidad radial y detección de tránsitos exoplanetarios. Consisten en detectar la huella que el planeta imprime en la luz de su estrella. Los descubrimientos exoplanetarios a día de hoy revelan una enorme riqueza de sistemas planetarios con propiedades distintas a las del Sistema Solar. La caracterización de las atmósferas planetarias ha comenzado con el estudio espectrofotométrico de la luz estelar en su paso a través de la atmósfera planetaria, y también a partir de la luz recibida del planeta instantes anteriores y posteriores al tránsito secundario. Se espera así determinar la composición química y estado termodinámico de la atmósfera de los exoplanetas, lo que permitirá la búsqueda de signos de actividad biológica en planetas extrasolares.

Objetivos

Desde el descubrimiento de las enanas marrones y los exoplanetas (aislados o en torno a una estrella) hay cuestiones abiertas de gran importancia química-física. Muchas de ellas corresponden todavía a los conceptos más básicos:

- los mecanismos de formación de las enanas marrones, los exoplanetas y los sistemas planetarios extrasolares,
- la fracción de sistemas dobles y múltiples y la función de distribución de masas (críticos para comprender los mecanismos de formación),
- las distintas fases de evolución de todos estos sistemas,
- las propiedades físicas de las atmósferas subestelares con temperaturas en el intervalo de los 2500 K a los pocos centenares de grados,
- cómo influyen las propiedades de la estrella en la formación y evolución de sus exoplanetas,



Detalle del cúmulo HP 1, en el bulbo galáctico, cuyas estrellas están entre las más antiguas de la Galaxia (Gemini / AURA / NSF).

- cómo influye la formación de un planeta o un sistema planetario en las propiedades de su estrella,
- el papel de las estrellas y de su actividad magnética en la estabilidad y evolución de las atmósferas planetarias.

Entre los objetivos más perseguidos por las comunidades nacionales e internacionales y, a la vez costosos en términos de exigencias tecnológicas y económicas, se encuentran:

- la detección de exoplanetas rocosos en la zona de habitabilidad de sus estrellas (órbitas en las que los planetas pueden mantener agua en estado líquido),
- la caracterización de las atmósferas exoplanetarias en un rango amplio del espectro electromagnético y para un elevado número de exoplanetas, y
- la búsqueda de trazadores biológicos en atmósferas exoplanetarias.



3. Estado actual

3.1. Estrellas de masa baja e intermedia

El estudio de la formación de estrellas de masa baja e intermedia se aborda en España desde distintas perspectivas. Hay grupos que estudian fases muy tempranas a través de observaciones radioastronómicas, examinando tanto los núcleos en colapso como las eyecciones de materia que acompañan al proceso de colapso gravitatorio. Estos grupos estudian la emisión infrarroja de los discos protoplanetarios y de los discos formados por restos del material alrededor de la estrella, mientras que otros grupos estudian la emisión visible y variable de las

fotosferas de las estrellas pre-secuencia principal. Otros grupos a su vez estudian la interacción entre las magnetosferas y los discos de acrecimiento durante toda la evolución pre-secuencia principal; desde la formación de jets y choques de acrecimiento al efecto de la radiación estelar en la evolución del disco.

El medio interestelar y el estudio de su radiación (mayoritariamente en ondas de radio y en infrarrojo) es abordado también por diferentes grupos en nuestra comunidad.

Los grupos españoles que investigan la estructura estelar conjugan su experiencia observacional, derivada del uso de instalaciones situadas en Canarias, en Sierra Nevada o en Calar Alto y del análisis de datos, con su experiencia teórica, comparando sus resultados observacionales con modelos teóricos adaptados a la astrosismología que incluyen la no adiabaticidad, la rotación hasta segundo orden, la convección dependiente del tiempo y la interacción pulsación-atmósfera unida a todo lo anterior. Todo ello además de estudiar el papel que juegan

El satélite GALEX (NASA) ha proporcionado el primer mapeo (casi completo) del cielo en el UV.



las opacidades en las estrellas de baja masa y de estudiar exhaustivamente los coeficientes de oscurecimiento en el limbo para un amplio conjunto de parámetros estelares. Estos grupos de astrofísica están organizados en un entorno europeo: SPACEIN.

También hay varios grupos españoles que concentran su actividad en el análisis químico de estrellas de masa baja e intermedia en la secuencia principal, o en la rama de gigante roja, haciendo uso de datos del Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Los espectrógrafos de baja resolución del SDSS han observado varios cientos de miles de estrellas de tipos espectrales FGKMLT, que se han utilizado por grupos españoles para buscar estrellas pobres en metales, estudiar las diferencias entre los discos grueso y delgado de la Vía Láctea, aplicar

técnicas automáticas de clasificación espectral, o estudiar la evolución química del halo de la Galaxia. Los mejores candidatos a estrellas pobres en metales son examinados en detalle utilizando los telescopios en el ORM, ESO y otros observatorios.

El SDSS ha incorporado a su suite de instrumentos un espectrógrafo de alta resolución que opera en la banda H (1.5 -1.7 μm). Este instrumento, capaz de observar de manera simultánea 300 estrellas en un campo de 7 grados cuadrados, es la herramienta fundamental del proyecto APOGEE (Apache Point Observatory Galaxy Evolution Experiment) que proporciona parámetros estelares y abundancias químicas para unos 15 elementos, con los que está construyendo un mapa 3D de la distribución y evolución química de la Vía Láctea con más de

100.000 estrellas, y continuará en una segunda fase (APOGEE-2) hasta 2020. El análisis de los espectros de APOGEE es totalmente automático, utilizando software desarrollado por grupos españoles que participan en el experimento.

El satélite GALEX (NASA) ha proporcionado el primer mapeo (casi completo) del cielo en el UV. El análisis de los datos de GALEX para determinar las propiedades y distribución del polvo en el medio interestelar utilizando la banda NUV y comparando con los mapeos realizados en el IR (2MASS) y óptico (UCAC) está siendo realizado por un grupo español. Este análisis está permitiendo también el estudio de la población galáctica en el UV y su preparación para el análisis conjunto con los resultados de Gaia y la definición del programa central de observaciones astronómicas del WSO-UV.

3.2. Estrellas masivas

La investigación sobre estrellas masivas en España es muy activa, con alrededor de media docena de grupos trabajando en todo el territorio y un fuerte reconocimiento internacional en el campo. La investigación sobre estrellas masivas que se realiza en España se concentra en algunos aspectos clave ligados a las preguntas formuladas arriba.

Existe una fuerte componente observacional. La comunidad española lidera algunos catálogos espectroscópicos ópticos como GOSSS e IACOB y cartografiados infrarrojos, bien con datos propios (LIRIS/WHT, ISAAC/VLT) o con datos de archivo (como 2MASS, que ha permitido la identificación de la

serie de cúmulos en la Vía Láctea bautizados como “Alicante”) y se participa activamente en otros internacionales (OWN, GES) intentando formar una extensa base de datos de alta calidad. Otros esfuerzos se concentran en la observación en galaxias cercanas, intentando cubrir un amplio rango de metalicidades y entornos usando todo el rango de longitudes de onda.

Se cuenta con una gran experiencia en el análisis de datos utilizando modelos de atmósferas, y se trabaja activamente en el desarrollo de métodos automáticos de análisis, lo que es muy importante para aprovechar bien los cartografiados mencionados y exige bastante esfuerzo compu-

tacional, al tener que barrer un amplio espacio de parámetros.

Actualmente estos estudios se centran en el papel de la metalicidad, la rotación estelar, y la posible presencia de pulsaciones y campos magnéticos y en determinar el modo que las estrellas masivas evolucionan, especialmente mediante el estudio de cúmulos estelares masivos, sistemas binarios y fases peculiares de evolución, tanto en la Vía Láctea como en galaxias cercanas que sirvan de modelo para el Universo primitivo. Además, los trabajos recientes se centran en revelar la estructura de la Vía Láctea a través de sus cúmulos masivos (aún desconocidos).

La Nebulosa del Homúnculo, alrededor de Eta Carinae, una binaria supermasiva (NASA/HST/J. Morse).



3.3. Fases avanzadas de evolución: AGB, post-AGB y PNe

Diversos grupos estudian, tanto mediante observaciones como también teóricamente, las fases AGB, post-AGB y la correspondiente formación de nebulosa planetaria. Todos ellos son referentes a nivel internacional en este campo.

La emisión de estos objetos se observa en el rango del óptico, infrarrojo cercano y medio, y radio, tanto con instrumentos desde Tierra como desde el espacio. Las técnicas empleadas son principalmente espectroscopía de media y alta resolución, fotometría e interferometría. Los estudios se centran fundamentalmente en la determinación de la composición química detallada de las atmósferas de estos objetos, el estudio químico y dinámico de sus envolturas circunestelares (detección de moléculas complejas, hidrocarburos, fullere-

nos etc) y la formación y composición química del polvo estelar que se origina en ellas. Las correspondientes simulaciones numéricas requieren una gran capacidad de cálculo y, en algunas ocasiones tanto los modelos de atmósfera como los de evolución deben realizarse en tres dimensiones.

El rango óptico ha sido fuente de información sobre las estrellas AGB y post-AGB, y la morfología, cinemática, composición química e incluso búsqueda de compañeras binarias en nebulosas planetarias para numerosos grupos. Estos estudios han incluido datos obtenidos con telescopios del ORM (NOT, WHT, INT, TNG), ESO (VLT) y CAHA. También se participa en el Working Group de ESO-Gaia survey dedicado a la identificación y análisis de

estrellas AGB. En la última década estos estudios se han extendido al rango de los rayos X haciendo uso de los observatorios espaciales Chandra de la NASA y XMM-Newton de la ESA.

La observación de las fases iniciales de la formación de las nebulosas planetarias y de estructuras más compactas se beneficia del uso de las antenas de 30m de IRAM y de la de Robledo de Chavela o de los interferómetros de Plateau de Bure y VLA. Recientemente, las observaciones en el infrarrojo medio en el límite de difracción del 10m GTC y VLT han abierto nuevas vías en el estudio de las regiones centrales más compactas de estos objetos. Igualmente deben destacarse las observaciones en el infrarrojo lejano con el satélite Herschel.

3.4. Últimas fases de evolución estelar

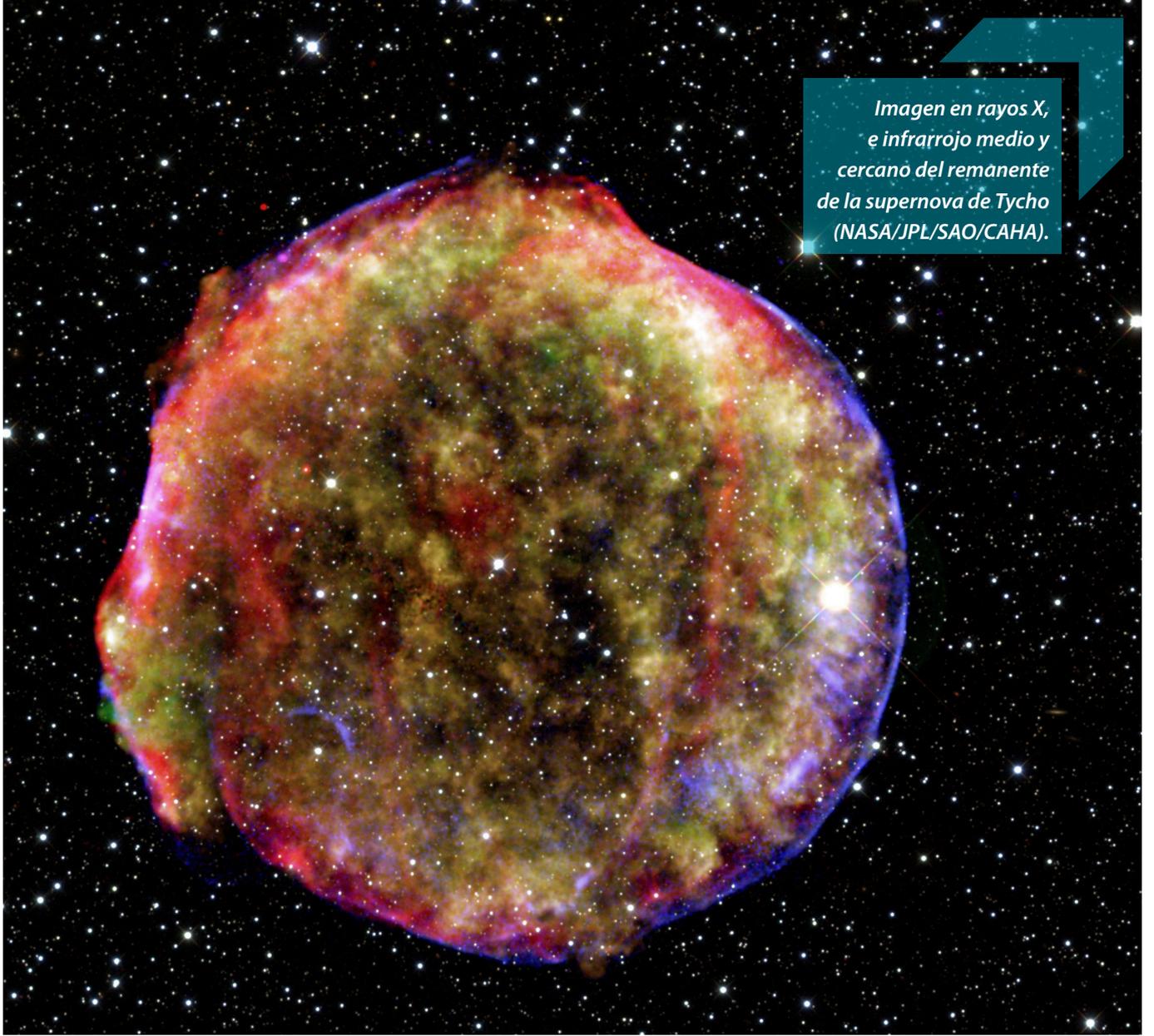
Hay grupos españoles trabajando en las curvas de luz y los espectros de las CCSNe utilizando los telescopios del ORM. En un plano más teórico, otros grupos son referentes en las simulaciones hidrodinámicas relativistas de este tipo de objetos y en la estructura de las estrellas de neutrones. Estos grupos se apoyan en los ordenadores más potentes, con los que se trata de describir entre otros problemas la evolución de los campos magnéticos en estos objetos compactos,

en cuyo centro se busca evidencia de los quarks. El estudio de los enigmáticos GRBs y su origen se realiza mediante simulaciones numéricas multidimensionales magnetohidrodinámicas y observaciones a través de su seguimiento mediante telescopios robóticos en todas las longitudes de onda.

Los grupos españoles son líderes reconocidos en el campo de las binarias de rayos X, tanto de alta como de baja masa, y en el

estudio de las binarias de rayos gamma. Algunos grupos han sido pioneros en la caracterización de las binarias de rayos X a través de observaciones y de simulaciones numéricas, y hay una fuerte interacción entre los grupos estelares de binarias de rayos X y los grupos que participan en telescopios como MAGIC, donde España tiene una presencia muy importante, haciendo un amplio uso de datos en todo el espectro electromagnético.

*Imagen en rayos X,
e infrarrojo medio y
cercano del remanente
de la supernova de Tycho
(NASA/JPL/SAO/CAHA).*



Otros grupos estudian la fase de enana blanca mediante simulaciones numéricas detalladas incorporando todos los procesos físicos relevantes. En base a estos modelos se estiman, por ejemplo, la edad del disco de la Galaxia y/o propiedades de candidatos a materia oscura, como los axiones. Estos grupos realizan también simulaciones numéricas multidimensionales de la fusión de objetos compactos (enanas blancas o estrellas de neutrones).

En el campo de las novae hay grupos españoles líderes a nivel internacional en simulaciones de la acreción, explosión y nucleosíntesis. Recientemente, han realizado simulaciones numéricas en 3D para estudiar la mezcla del material en las capas externas, y contrastan sus predicciones teóricas con observaciones de novae.

Los grupos españoles trabajan en todas las fases de las SNIa: proge-

nitores, explosiones, curvas de luz, espectros, remanentes y aplicaciones cosmológicas. Se intenta detectar la compañera de la enana blanca tras la explosión. Se realizan modelos en 3D de la explosión y se estudia mediante simulaciones numéricas la influencia de los progenitores en las propiedades observadas, una cuestión clave para aumentar la precisión en la estimación de las distancias extragalácticas y poder desvelar la naturaleza de la energía oscura.

3.5. Objetos subestelares: enanas marrones, planetas aislados y exoplanetas

Hay un amplio número de grupos trabajando en España en enanas marrones y planetas extrasolares. Los investigadores en los distintos centros e institutos españoles trabajan y colaboran con equipos internacionales en prácticamente todas las áreas de investigación de las enanas marrones y planetas aislados descritos anteriormente, con contribuciones relevantes en algunas líneas, como es la determinación de órbitas de sistemas binarios y la búsqueda, detección y caracterización de enanas marro-

nes y planetas aislados y fríos en regiones de formación estelar.

Los científicos en centros españoles trabajan en las dos líneas experimentales más potentes en el campo de los exoplanetas: la detección directa e indirecta, y la caracterización de las atmósferas exoplanetarias, con el fin de responder desde el punto de vista observacional a las cuestiones científicas que hoy día motivan proyectos futuros de gran envergadura para telescopios terrestres y espaciales. Las cuestio-

nes se centran en la diversidad de sistemas planetarios, distribución de planetas en función de la masa y metalicidad estelar y en función del tamaño y periodo orbital, propiedades físico-químicas de los planetas, origen y evolución de los sistemas planetarios, y dinámica de sistemas planetarios múltiples (con dos o más planetas). Cabe destacar que uno de los hitos del campo es la búsqueda, detección y caracterización de planetas rocosos en la zona de habitabilidad de una estrella.

4. Necesidades instrumentales

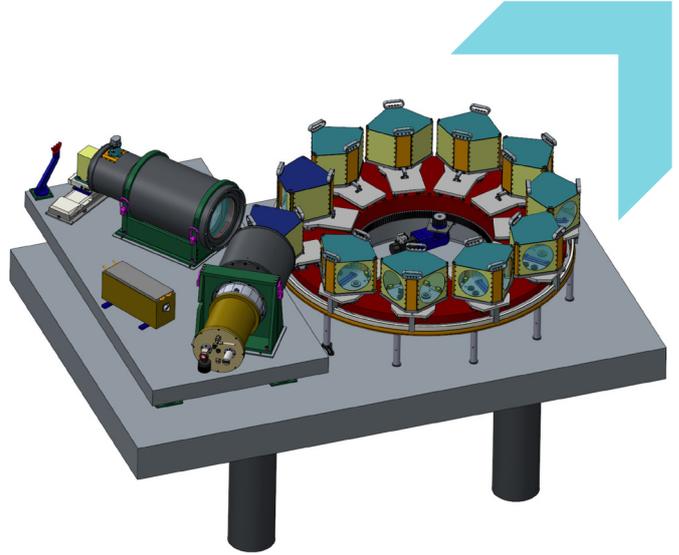
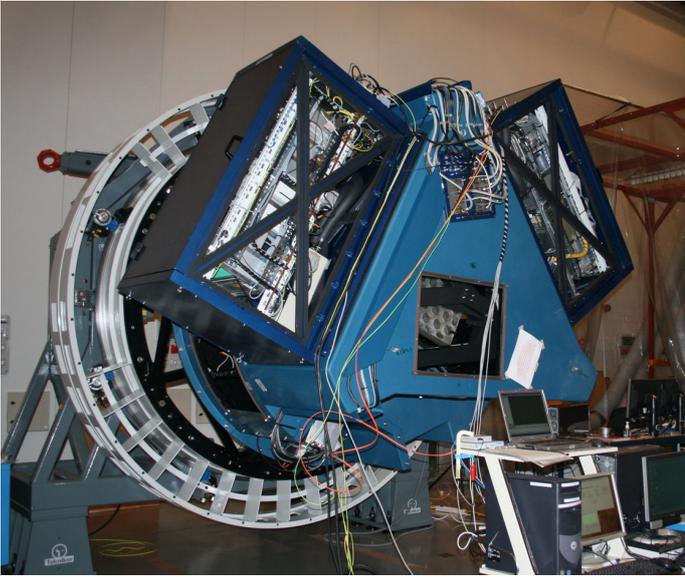
4.1. Telescopios terrestres y satélites

La astrofísica estelar y subestelar en España tiene una fuerte componente observacional, que sin embargo no es exclusiva. La mayoría de grupos tiene amplia experiencia en observaciones y se cubre la totalidad del espectro electromagnético, desde los rayos gamma a radio. Prácticamente en todos los campos se precisan telescopios de gran tamaño (8-10 m) para las observaciones espectroscópicas más exigentes, y telesco-

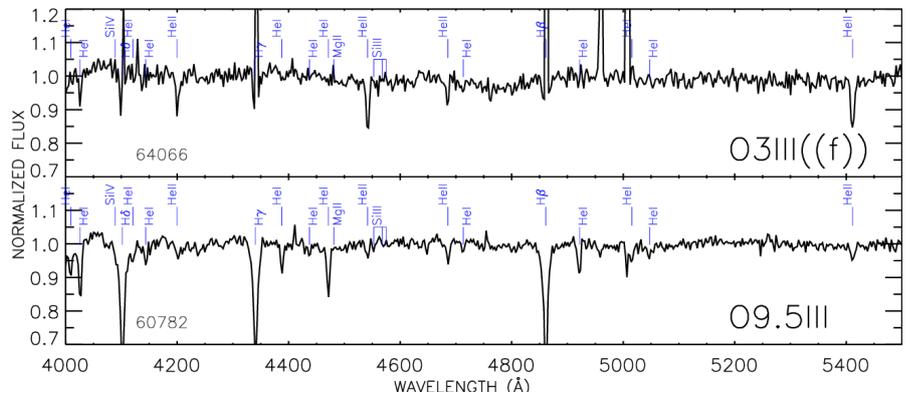
pios de tamaño mediano (2-4 m) para observaciones fotométricas más profundas y estudios multiobjeto a mayor resolución, sin limitarse a estas técnicas. No obstante, existe un notable uso de telescopios de tamaño pequeño (1-2 m) especialmente por su instrumentación de muy alta resolución o su uso fotométrico.

Los observatorios más utilizados son los que están en suelo español

(ORM, OT, Calar Alto) y los del ESO. Entre ellos destacan los telescopios VLT, WHT, NOT, TNG, 3.5m Calar Alto y GTC. A un nivel similar de uso debe mencionarse el HST. Aunque los investigadores españoles acceden también a otros observatorios y telescopios (Keck, Gemini, AAO, etc.) es claro que la Astrofísica estelar en España se ha beneficiado grandemente de la presencia de observatorios en nuestro suelo y en los últimos años, de la entrada



OSIRIS (izquierda -IAC) y diseño óptico de MEGARA (derecha -UCM), espectrógrafos ópticos para GTC. Abajo, espectros de estrellas masivas en IC 1613 obtenidos con OSIRIS@GTC.



en ESO, tanto a nivel observacional y tecnológico como incluso teórico. Prácticamente cualquier telescopio ha sido utilizado, así como los satélites más importantes (Spitzer, Herschel, CoRoT, HST, XMM-Newton, Chandra, etc.). GTC es ya ampliamente utilizado, si bien aún carece de algunas de las capacidades instrumentales más utilizadas por la comunidad en este campo. No obstante, por ejemplo, buena parte de las observaciones que han permitido a los grupos españoles avanzar en la caracterización de las atmósferas de exoplanetas se está realizando con el GTC empleando OSIRIS tanto con los filtros estrechos como con espectroscopía de baja resolución espectral y los estudios extragalácticos se benefician también ampliamente de su capacidad colectora.

La parte central del espectro (UV, óptico e infrarrojo cercano) es la zona más observada. El rango infrarrojo cercano y medio es fundamental para el estudio de las estrellas y regiones frías u oscuras y el trazado de la estructura de la Vía Láctea. Las enanas marrones y exoplanetas se benefician tanto del infrarrojo como de la parte más roja del visible, mientras que la fotometría y la espectroscopía en longitudes de onda visibles y UV nos permiten caracterizar las estrellas, bien en cúmulos, asociaciones y sistemas múltiples, o como objetos aislados, y las nebulosas ionizadas; así como estudiar la actividad magnética.

La espectroscopía óptica es ampliamente utilizada, con resolución media-alta ($R \sim 10000$ a 80000) en la mayoría de los casos, excepto

en estudios extragalácticos o de objetos muy débiles, en donde la resolución puede bajar hasta $R \sim 1000$. En el caso de la asteroseismología, cabe destacar el papel jugado por la fotometría, y en especial el del satélite CoRoT (junto con Kepler, particularmente para los exoplanetas). La fotometría es también muy utilizada para el estudio de las poblaciones estelares, sobre todo más allá de la Vía Láctea.

La espectroscopía infrarroja de resolución intermedia ($R \sim 2500$ - 10000) también es ampliamente utilizada en conjunción con los cartografiados infrarrojos (2MASS, UKIDSS, GLIMPSE...) para la exploración de las regiones oscurecidas de la Vía Láctea. Una buena parte del trabajo sobre cúmulos emplea técnicas fotométricas, que son también muy utilizadas

en el estudio de sistemas binarios. Como se ha descrito, SDSS y APOGEE juegan un importante papel en las investigaciones de la estructura de la Vía Láctea. En el caso de los objetos subestelares, las bases de datos públicas proporcionadas por telescopios terrestres y espaciales que operaron en el infrarrojo, como 2MASS, Spitzer y WISE, son fundamentales para comprender y caracterizar en gran medida la población subestelar en los alrededores del Sistema Solar. Para ello, los científicos españoles forman parte de amplias colaboraciones internacionales que ya están obteniendo datos, como "VISTA Hemisphere Survey" (VHS) cuyo objetivo es rastrear unos 20.000 grados cuadrados (aproximadamente la mitad) del cielo empleando el telescopio infrarrojo VISTA.

Los estudios interferométricos están ganando peso en el campo de las estrellas masivas. Se utilizan técnicas de alta resolución

espacial en el infrarrojo cercano para estudiar diferentes aspectos de estas estrellas: interferometría de larga base (AMBER/VLTI) para estudios de multiplicidad; imagen Speckle e interferometría Fizeau (Máscaras de Apertura Dispersa con NACO/SAM) para el estudio de la interacción de las estrellas masivas con el medio circunestelar e interestelar; interferometría Fizeau y espectro-astrometría (con CRIRES en el VLT) para el estudio de la morfología de Objetos Estelares Masivos Jóvenes.

Los radiotelescopios son imprescindibles para el estudio de las fases más tempranas de la formación de una estrella o una enana marrón, y en general cualquier objeto en formación alrededor del cual se forma un disco o presenta una envoltura. Conforme el objeto evoluciona se va reduciendo la longitud de onda más corta a la que podemos hacer su estudio. Así, para la observación de discos

protoplanetarios y de discos de escombros se utiliza instrumentación a bordo de satélites (Herschel y Spitzer) e instrumentación infrarroja en tierra (CAHA, ORM); mientras que el estudio de las fotosferas se puede realizar desde tierra (ORM, CAHA, OSN Observatorio del Teide).

Los telescopios y satélites de rayos gamma y rayos X (MAGIC, XMM-Newton, Chandra) son de gran importancia en el estudio de las binarias masivas de rayos X y de rayos gamma (estas observaciones son luego complementadas por observaciones de seguimiento, normalmente con fotometría y espectroscopía óptica) y el estudio de objetos subestelares en su fase más temprana. Para las GRBs, resulta de gran importancia el observatorio robótico BOOTES y la rápida respuesta del GTC.

La instrumentación empleada en el estudio de sistemas sub-



Espectrógrafo del visible de CARMENES, en la sala VIS del 3.5m de Calar Alto (equipo CARMENES).

estelares y binarias incluye en algunos casos la capacidad de una gran resolución espacial con modernas técnicas de óptica adaptativa y “lucky imaging” (necesarias para la detección de compañeros subestelares en órbita alrededor de estrellas, objetos binarios, y para el análisis de sus órbitas). Estas técnicas están disponibles en telescopios de 2 m a 10 m en observatorios terrestres, como los de las islas Canarias (Teide y Roque de los Muchachos), Calar Alto en Almería, y los observatorios de la ESO en Chile. Algunos telescopios espaciales como el HST y el futuro JWST proporcionan una resolución espacial competitiva y viable para muchos programas.

La detección indirecta de los exoplanetas requiere intensos esfuerzos en medidas de velocidad radial, astrométricas y fotométricas. Hacen falta datos de excelente precisión (del orden

del m s^{-1} en velocidad radial, y las milimagnitudes en fotometría), lo que exige instrumentación de nueva generación (como HARPS-N en el telescopio TNG del Observatorio Roque de los Muchachos, CARMENES en el 3.5 m de Calar Alto y ESPRESSO en el VLT. Para la caracterización en el visible de las atmósferas de los exoplanetas gigantes y gaseosos, los investigadores emplean el Gran Telescopio Canarias, capaz de proporcionar curvas de luz con una precisión inferior a una milimagnitud y participan en el seguimiento y confirmación de candidatos a exoplanetas descubiertos mediante tránsitos fotométricos con los satélites Corot y Kepler, y los candidatos hallados por velocidad radial en exploraciones realizadas desde tierra por equipos internacionales.

Desde mediados de 2014 Gaia llevará a cabo el censo más completo, incluyendo mil millones de estrellas de nuestra

Galaxia y de otras galaxias del Grupo Local. La precisión de Gaia en la determinación de posiciones no tendrá precedente y permitirá calcular distancias y flujos absolutos y con ellos el conjunto más fiable de parámetros estelares de muestras estadísticamente significativas de estrellas. Esto revolucionará la astrofísica estelar y el estudio de las poblaciones estelares en nuestra Galaxia y más allá. Gaia también descubrirá gran cantidad de planetas por medio de tránsitos y astrometría de precisión. Los telescopios con capacidad para realizar un seguimiento de los datos de Gaia, especialmente espectroscópicas, tanto con las infraestructuras actuales como con los instrumentos en desarrollo (WEAVE por ejemplo) jugarán un papel clave en la astrofísica de los próximos años. Es importante, sin embargo, que se mantengan a la vanguardia de la instrumentación en cada momento.

4.2. Ordenadores

Los ordenadores más potentes son necesarios para las detalladas simulaciones numéricas: desde las simulaciones de atmósferas y evolución estelar que incluyen extensas redes de reacciones nucleares, fenómenos de mezcla, detallados modelos atómicos o procesos alejados del equilibrio, hasta las sofisticadas simulaciones hidrodinámicas multidimensionales de alta resolución para las SN Ia o CCSNe (relativistas) y las simulaciones magnetohidrodinámicas para los GRBs. En comparación con la tradicional

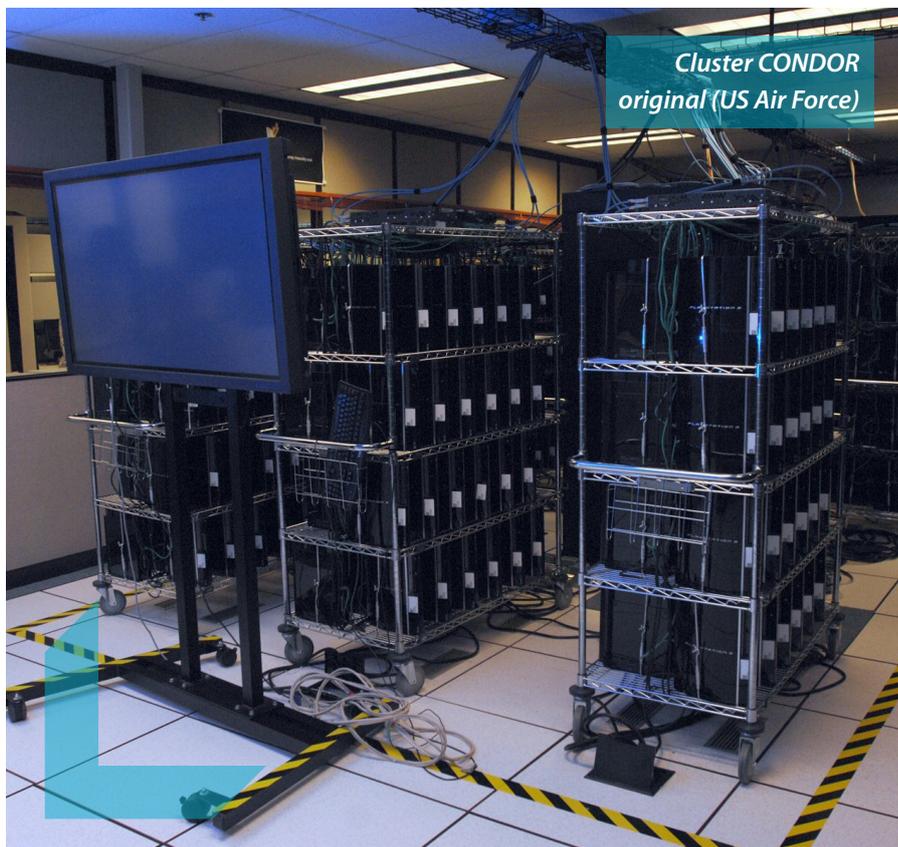
actividad de observación en el campo de la formación estelar, claramente consolidada, el desarrollo de modelos teóricos y numéricos ha ganado terreno en la última década.

La interpretación de las observaciones de estrellas incluye en muchos trabajos su análisis mediante modelos numéricos de atmósferas estelares. Hay varios grupos en España dedicados al desarrollo de estos modelos numéricos, si bien en algunos casos su trabajo en los últimos

años está más centrado en las aplicaciones (es decir, el análisis de espectros estelares), incluyendo la exploración de métodos automáticos de análisis. El cálculo de estos modelos exige el uso de potentes ordenadores, en especial cuando se realizan cálculos en 2D o 3D. En muchas ocasiones, aunque no se llega a requerir las mayores capacidades actuales (gracias en parte al uso de técnicas desarrolladas cuando los ordenadores eran menos potentes), lo que si se requiere es el uso de un gran número de pro-

cesadores de alto rendimiento. En el campo de las estrellas masivas, el uso de los modelos realiza una labor aglutinante entre los grupos españoles. Una clara preocupación de cara al futuro es que la formación de investigadores en el desarrollo de modelos se adecua mal a las presentes directrices para el desarrollo de tesis doctorales y carreras investigadoras.

Estos cálculos incluyen no sólo los ordenadores de la RES como el Mare Nostrum o sus nodos más locales, sino también clusters de ordenadores conseguidos por los grupos, y los sistemas de cálculo distribuido tipo Condor. Los investigadores españoles también acceden a las infraestructuras compartidas dentro del proyecto europeo PRACE.



5. Proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro

Se presentan en esta sección las principales necesidades que los grupos españoles que trabajan en astrofísica estelar y subestelar tendrán en la próxima década y las infraestructuras que pueden cubrir estas necesidades.

Por la naturaleza de las líneas de investigación descritas más arriba, los grupos que trabajan en estrellas requerirán en los próximos años de espectrógra-

fos multiobjeto de alta eficiencia y resolución intermedia-alta en grandes telescopios (tanto en el óptico como en el infrarrojo). Esto será necesario tanto para el estudio de estrellas masivas en entornos de baja metalicidad (con miras a extra-polar los resultados al Universo primitivo), como para el estudio de la estructura y evolución de la Vía Láctea, especialmente sus partes internas, el centro

de la galaxia y el halo, así como en muchos otros campos. Estas necesidades deberán ser cubiertas por EMIR, MEGARA y MIRADAS en el GTC (cubriendo el hemisferio norte) y por FLAMES, KMOS y MUSE en el VLT (cubriendo el hemisferio Sur). En el GTC disponemos de OSIRIS, excelente instrumento para el estudio de objetos relativamente débiles a baja resolución, aunque sería muy

Misión PLATO, que se situará en el punto L2 del sistema Tierra-Sol.



conveniente reemplazar su detector, poco sensible en el azul.

La explotación de los datos de CoRoT y Kepler continuará siendo un punto fuerte en el estudio de la estructura estelar, pero deberá ser reforzada con observaciones alternativas que permitan optimizarla, tanto en tierra (p.ej., CARMENES, WEAVE, HARPS, ESPRESSO) como en el espacio (PLATO 2.0). Esta última será la próxima misión cazaplanetas con la novedad de que no sólo encontrará nuevos sistemas exoplanetarios sino que PLATO 2.0 podrá caracterizarlos llegando a tamaños de planetas como la Tierra alrededor de estrellas como el Sol.

Los investigadores españoles se encuentran estratégicamente posicionados para la explotación

científica de los datos que se obtendrán con los proyectos futuros de inminente entrada en funcionamiento, como la misión espacial Gaia (lanzada con éxito a finales de 2013), cuyo objetivo científico es la compilación precisa en tres dimensiones de un catálogo de aproximadamente mil millones de fuentes de la Galaxia. Gaia contribuirá de manera decisiva a clarificar las propiedades de las estrellas en nuestra galaxia al poder determinar sus distancias con precisión sin precedentes.

Además de los referidos más arriba, para el seguimiento de Gaia serán necesarios espectrógrafos multiobjeto con un campo grande como p.ej., WEAVE en el WHT. Este aspecto es clave, ya que Gaia cubrirá todo el cielo y los grandes telescopios están

mal condicionados para grandes cartografiados. Igualmente, este espectrógrafo permitirá el seguimiento de numerosas estrellas y exoplanetas, haciendo posible la detección de nuevos sistemas estelares y planetarios y el estudio detallado de cúmulos y asociaciones estelares. Un instrumento como WEAVE permitirá además un seguimiento inicial de gran número de objetos de interés que puedan detectarse con el LSST. Este tipo de estudios se beneficiarán también de otras alternativas como CARMENES y PANIC en CAHA y PAU en el ORM.

El estudio detallado de la composición química de estrellas débiles (como las del halo, las que alojan planetas a distancias relativamente grandes o las que se encuentran en galaxias cercanas), la determinación precisa de velocidades radiales en estrellas individuales o sistemas binarios, o el estudio de pulsaciones y fenómenos explosivos exigirá también espectrógrafos de alta resolución en telescopios de la clase 8-10m, como HORuS, ESPRESSO o CARMENES, que serán instalados a lo largo de los próximos tres años en los telescopios GTC (ORM), VLT (Paranal, Chile) y 3,5 m de Calar Alto (Almería), respectivamente. ESPRESSO tendrá la capacidad de detectar súperterras en órbitas habitables alrededor de estrellas de tipo solar, y CARMENES hará lo propio en estrellas de tipo espectral M. HORuS es una adaptación de un espectrógrafo anterior (UES) para el Gran Telescopio Canarias, y proporcionará datos con precisiones adecuadas para detectar exoplanetas.

Los trabajos sobre cúmulos muy masivos (en donde se pueden encontrar las estrellas

más masivas), regiones oscurecidas, sistemas subestelares y estrellas en otras galaxias se verá muy favorecido por el telescopio espacial JWST (NASA, ESA, y Agencia Espacial Canadiense, lanzamiento previsto para 2018) y su instrumentación infrarroja (en uno de cuyos instrumentos, MIRI, participan investigadores españoles). Dadas las condiciones excepcionales de la Antártida para el infrarrojo, se participa en la instalación y operación del telescopio IRAIT en el Domo C (Base Concordia), este telescopio es un proyecto piloto que servirá para caracterizar y verificar la calidad de las condiciones astronó-

E-ELT, en el que participan investigadores españoles. Un instrumento como éste permitirá obtener parámetros fundamentales de objetos estelares intrínsecamente débiles, así como la obtención de medidas espectro-fotométricas ultraprecisas en forma de series temporales susceptibles de ser utilizadas como precisos test de modelos numéricos teóricos, y la caracterización de sistemas binarios con objetos subestelares en cúmulos estelares cercanos de diversas edades y en regiones de formación estelar reciente.

Para ello sería muy deseable el desarrollo de una óptica adaptativa

objetos subestelares y regiones frías en nuestra Galaxia.

A fin de seguir avanzando en el conocimiento del Universo de Altas Energías y aspectos de la física fundamental y de partículas, será necesario extender la capacidad actual de los telescopios de rayos gamma actuales. El proyecto CTA, un esfuerzo a nivel planetario donde España participa desde su origen de manera muy significativa, es clave para este avance. Recientemente se ha aprobado que el observatorio CTA-Norte (complementario al CTA-Sur) sea instalado en La Palma, lo que además de



micas en el Domo C, y servirá como base a la futura generación de telescopios e instrumentos en la Antártida. Se realizará, con la NIR/MIR cámara AMICA, un cartografiado de las estrellas AGB en las Nubes de Magallanes.

Algunos de estos objetos exigen como paso adicional una alta resolución espectral, incluso en este rango infrarrojo. Aunque es posible lograrla hoy en día para la Vía Láctea, y el desarrollo de FRIDA combinado con una instalación de óptica adaptativa (preferentemente guiada por una estrella láser) permitiría su uso en el GTC, es necesario al menos un telescopio de la clase E-ELT para acceder a otras galaxias, por ejemplo con un instrumento como HARMONI, instrumento de primera luz para el

para el visible que pudiera combinarse con los espectrógrafos multiobjeto en el óptico. Este salto sería de gran interés tecnológico, y permitiría además el estudio de zonas de intensa formación estelar, donde la gran densidad de estrellas impide hoy en día acceder de modo eficiente. Esta colección de instrumentos debe necesariamente completarse con un espectrógrafo de alta resolución en los telescopios de clase 40 m para poder estudiar estrellas y sistemas estelares débiles con suficiente detalle.

En el submilimétrico y radio, tanto ALMA como el EVLA permitirán tanto estudios de continuo (distribución de energía) como espectroscópicos que proporcionarán información valiosa sobre los

muy importante para numerosos grupos españoles (no solo los directamente involucrados, sino también por ejemplo los que trabajan en binarias de rayos X, por limitarnos a la parte estelar) redundaría en un claro beneficio para la economía local y nacional y en el futuro de los Observatorios de Canarias. Los estudios de binarias de rayos X y de procesos de acreción pueden también aprovechar la participación en ATHENA, la misión L2 recientemente aprobada por la ESA para un telescopio espacial de rayos X.

El UV es una región espectral clave para las estrellas calientes, ya que emiten fuertemente a esas longitudes de onda, el estudio de la formación y evolución de los sistemas planetarios y la interac-

ción atmósfera-estrella, así como la modelización de numerosos fenómenos en las estrellas. Actualmente el HST cubre estas necesidades, pero está llegando al fin de su ciclo de vida. La red europea de astronomía ultravioleta (NUVA), coordinada desde España, canaliza los esfuerzos de la comunidad europea por mantener un acceso al UV. Entre estos esfuerzos destaca el WSO-UV, clave para poder avanzar en el estudio de las estrellas a baja metalicidad en el halo de la Vía Láctea o galaxias cercanas (ya que al ser sus rasgos espectrales débiles debido a las bajas abundancias, requieren mayores espejos o más eficientes instrumentos que los disponibles en el HST). Las estrellas más débiles, como las enanas blancas o las estrellas centrales de nebulosa planetaria y las subenanas calientes, intrínsecamente débiles, requerirán también esta alta eficiencia en el UV.

España está estratégicamente situada para tener acceso al rango UV en la época de "oscuridad" post-HST. La estrecha colaboración con la agencia espacial de Rusia, ROSCOSMOS, ha permitido que se embarque un instrumento español para imagen y espectroscopia sin rendija, ISSIS, y que se implemente un esquema compartido para las operaciones de la misión entre Madrid y Moscú. El WSO-UV será la única instalación científica en el mundo que proporcionará acceso al rango UV en la época post-HST. ISSIS está diseñado para ser un instrumento de primera línea para la observación de la interacción estrella-planeta en exoplanetas detectados por tránsito, el análisis de la interacción magnetosfera disco en todo el rango (de estrella de tipo solar hasta enana marrón), el estudio de las poblaciones jóvenes y de las propiedades de las estrellas masivas en otras galaxias, jets y nebulosas

de fuentes astronómicas, la interacción entre galaxias, las lentes gravitacionales o el papel de los halos galácticos en la formación estelar. La colaboración hispano-rusa garantiza un mínimo de un mes de observación al año a los científicos españoles. Además, uno de los dos "observatorios terrestres" (centros de operaciones) del WSO-UV estará en el campus de la Universidad Complutense de Madrid.

Grupos españoles participan en el desarrollo de la misión espacial EUCLID que proporcionará una exploración de más de 15000 grados cuadrados con una sensibilidad sin precedentes en el infrarrojo cercano, que facilitarán un censo de las enanas marrones más frías, hoy denominadas enanas de tipo Y. Varios grupos españoles participan también en la propuesta de la misión espacial Plato, entre cuyos objetivos figura la detección de



planetas tipo terrestre mediante tránsitos. La misión espacial CHEOPS permitirá caracterizar los tamaños y las masas de los exoplanetas conocidos con una exquisita precisión y cuenta con la participación de científicos españoles.

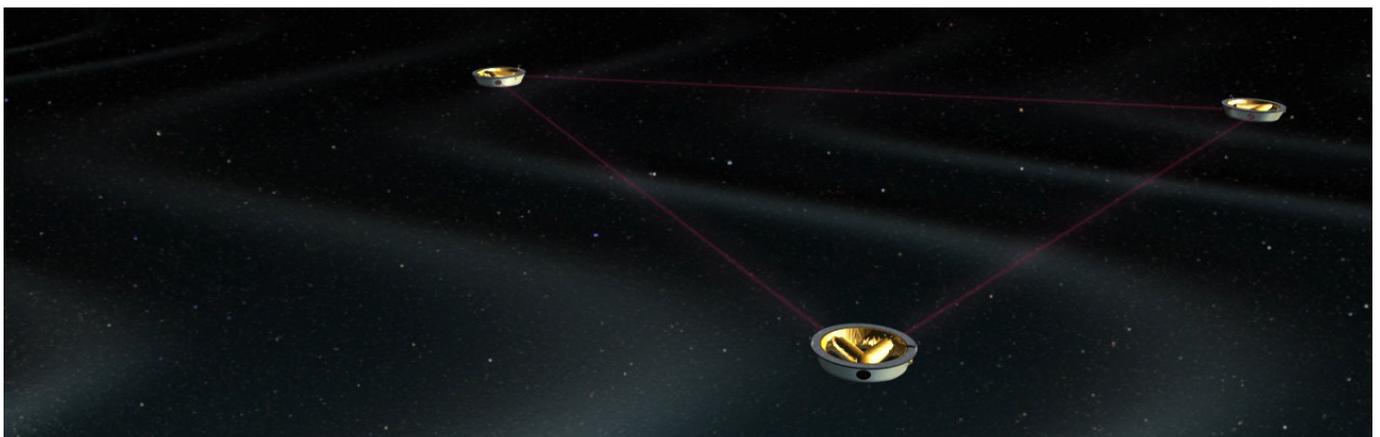
Estos esfuerzos en el espacio requerirán de su contrapartida en Tierra para su seguimiento, en la forma de los espectrógrafos ópticos e infrarrojos descritos más arriba.

Diversos grupos españoles están involucrados en el desarrollo del satélite LISA Pathfinder, e-LISA y el telescopio Einstein, y junto con todos los grupos teóricos que trabajan en objetos compactos (enanas blancas, estrellas de neutrones, agujeros negros y fusiones) calculan teóricamente la emisión de estas ondas y la posibilidad de detectarlas con los diversos instrumentos que se encuentran en fase de diseño y/o construcción.

Una interesante iniciativa es CUNA: un laboratorio de astrofísica nuclear en el LSC (Canfranc) con el fin de determinar ritmos de reacciones nucleares a energías relevantes en la síntesis de elementos pesados en el interior de las estrellas AGB.

La capacidad de multiplexado de los instrumentos actuales y su precisión (y por ende, la naturaleza de los problemas físicos tratados) exige el desarrollo de grandes redes de modelos y métodos automáticos de análisis. Todo ello no es posible sin ordenadores de grandes prestaciones. Para los casos más complejos se requiere un ordenador tipo Mare Nostrum o CESGA, y para los casos moderadamente complejos es preciso contar con un ordenador tipo el nodo de La Palma del Mare Nostrum. Pero para aprovechar los desarrollos derivados de una mayor capacidad de observación, será necesario disponer de infraestructuras informáticas aun más potentes. La calidad de las observaciones actuales y las previstas hacen necesario introducir procesos físicos realistas en los modelos. Los campos magnéticos, la rotación, las pulsaciones, la hidrodinámica, las inestabilidades, una geometría realista, los datos y modelos atómicos precisos y la dependencia temporal son cuestiones que es necesario incorporar de manera consistente en los modelos, pero cuya interrelación complica las ecuaciones y los cálculos, al punto de no poder llevarse a cabo en los actuales ordenadores.

Abajo, concepción artística del interferómetro espacial LISA (NASA/ESA).



Acrónimos en orden alfabético:

- 2MASS = Two Micron All-Sky Survey
- ALMA = Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
- AMBER = Astronomical Multi-BEam combineR
- AMICA = Antarctic Multiband Infrared Camera
- APOGEE = APO Galactic Evolution Experiment
- BOOTES = Burst Optical Observer and Transient Exploring System
- CAB = Centro de Astrobiología
- CAHA = Centro Astronómico Hispano-Alemán
- CARMENES = Calar Alto high resolution search for M dwarfs with exo-earths with a near-infrared Echelle spectrograph
- CESGA = Centro de Supercomputación da Galiza
- CHEOPS = Characterizing Exoplanet Satellite
- CoRoT = Convection, Rotation et Transits planétaires
- CRIRES = CRyogenic high resolution pre-dispersed InfraRed Echelle Spectrograph
- CTA = Cherenkov Telescope Array
- CUNA = Canfranc Underground Laboratory for Nuclear Astrophysics
- E-ELT = European Extremely Large Telescope
- EMIR = Espectrógrafo Multiobjeto InfraRojo
- ESA = European Space Agency
- ESO = Observatorio Europeo Austral
- ESPRESSO = Echelle spectrograph for rocky exoplanet and stable spectroscopic observations
- EUCLID = Misión espacial de la ESA para obtener el mapa de la geometría de la energía oscura.
- EVLA = Expanded Very Large Array Project
- FLAMES = Fiber Large Array Multi-Element Spectrograph
- FRIDA = inFRared Imager and Dissector for the Adaptive optics systems of the Gran Telescopio Canarias
- GAIA = Global Astrometric Interferometer for Astrophysics
- GALEX = GALaxy Evolution Explorer
- GES = Gaia-ESO Survey
- GOSSS = Galactic O-Star Spectroscopic Survey
- GTC = Gran Telescopio de Canarias
- HARMONI = High Angular Resolution Monolithic Optical Near-infrared Integral field spectrograph
- HARPS-N = High Accuracy Radial velocity Planet Searcher
- HORuS = High Optical Resolution Spectrograph
- HST = Hubble Space Telescope
- IACOB = IAC database of OB stars
- IAA = Instituto de Astrofísica de Andalucía
- IAC = Instituto de Astrofísica de Canarias
- IRAIT = International Robotic Antarctic Infrared Telescope
- IRAM = Institut de Radioastronomie Milimétrique
- ISAAC = Infrared Spectrometer And Array Camera
- ISSIS = Imaging and Slitless Spectroscopy Instrument
- JWST = James Webb Space Telescope
- KMOS = K-band Multi-Object Spectrograph
- LISA = Laser Interferometer Space Antenna
- LSC = Laboratorio Subterráneo de Canfranc
- MAGIC = Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov telescope
- MASGOMAS = MAssive Stars in Galactic Obscured MAssive clusterS
- MEGARA = Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía
- MIRADAS = Mid InFRARED Astronomical Spectrograph
- MIRI = Mid Infrared Instrument
- NACO = NAos-CONica = Nasmyth Adaptive Optics System - COudé Near Infrared Camera
- ORM = Observatorio del Roque de los Muchachos
- OSIRIS = Optical System for Imaging and low-intermediate Resolution Integrated Spectroscopy
- OSN = Observatorio de Sierra Nevada
- OWN = survey of O and WN stars
- PANIC = Panoramic Near Infrared Camera for Calar Alto observatory
- PAU = Physics of the Accelerating Universe
- PRACE = Partnership for Advanced Computing in Europe
- SAM = Single Aperture Mask
- SDSS = Sloan Digital Sky Survey
- UCM = Universidad Complutense de Madrid
- UCAC = USNO CCD Astrograph Catalog
- UES = Utrecht Echelle Spectrograph
- UKIDS = UKIRT Infrared Deep Sky Survey
- UKIRT = UK InfraRed Telescope
- USNO = US NATIONAL Observatory
- VHS = VISTA Hemisphere Survey
- VISTA = Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy
- VLA = Very Large Array
- VLT = Very Large Telescope
- WEAVE = WHT Enhanced Area Velocity Explorer
- WISE = Wide-field Infrared Survey Explorer
- WSO-UV = World Space Observatory for the Ultra-Violet

6. Actualización en 2020 de esta sección¹

2.1. Estrellas de masa baja e intermedia:

Objetivos (pág. 87)

En este subapartado se eliminan algunos objetivos como “¿Cuál es la estructura 3D de la Vía Láctea? ¿Cuál es la estructura de su barra central? ¿Ha generado la interacción de esta barra con los brazos una formación estelar especialmente intensa? ¿Por qué es el parsec central de la Galaxia una región de formación estelar tan prolífica?”. Siendo muy importantes, éstos son objetivos más propios de una sección sobre ciencia de nuestra Galaxia.

2.4. Últimas fases de evolución estelar:

Contexto (pág. 92)

El último párrafo de este subapartado sobre el hipotético futuro descubrimiento de ondas gravitatorias quedaría ahora como:

“Uno de los grandes logros de la física fundamental y la astrofísica ha sido la detección de las ondas gravitatorias”.

La detección de ondas gravitatorias (2015; premio Nobel en 2017) ha estimulado la búsqueda de relaciones entre los sistemas binarios y múltiples de estrellas masivas, su evolución con posibles fusiones en distintas fases (en especial tras la formación

de estrellas de neutrones y agujeros negros) y la producción de sistemas progenitores de ondas gravitatorias, que posiblemente requieran entornos de baja metalicidad.

Objetivos (ibid.)

Al final de la relación de objetivos, la frase “¿Cómo detectamos ondas gravitatorias?”, a la vista de los acontecimientos debería ser cambiada por “¿Cómo avanzaremos en la detección de ondas gravitatorias?”

3.4. Últimas fases de evolución estelar (pág. 99)

Existe un interés creciente de la comunidad en estudios de tipo “Target of Opportunity” y la formación de grupos cada vez más interdisciplinarios entre estrellas masivas, binarias de rayos X y gamma, GRBs, Supernovas y altas energías.

4.1. Telescopios terrestres y satélites (pág. 101)

En este apartado hay que tener en cuenta nuevos satélites que ya han realizado contribuciones relevantes o acaban de comenzar a funcionar.

Así, entre “los satélites más importantes”, además de los que se muestran en la lista entre paréntesis (“Spitzer, Herschel...”) debería añadirse también a Kepler y TESS.

Asimismo, el párrafo en la tercera columna que trata sobre asteroseismología, quedaría ahora redactado como:

“En el caso de la asteroseismología, cabe destacar el papel jugado por la fotometría, y en especial el de los satélites CoRoT, Kepler y TESS (estos últimos además particularmente importantes para los avances en ciencia exoplanetaria)”.

(pág. 102)

VISTA Hemisfere es actualmente un proyecto que está finalizando.

En la tercera columna, debería mencionar al satélite Fermi además de XMM-Newton y Chandra.

Al final de 4.1 se menciona el censo que Gaia llevara a cabo. Conviene indicar que Gaia ya ha publicado dos conjuntos de datos (Data Release 1 y 2) con gran impacto en la comunidad (especialmente el DR2).

Se espera el DR3, con una importante mejora en la precisión, para el último trimestre de 2020.

(pág. 103)

Por las razones expuestas más arriba, en el listado de satélites dedicados a la búsqueda de exoplanetas mediante tránsitos fotométricos (segunda columna) se debe incluir a TESS.

¹ La revisión de esta sección ha sido realizada por Rafael Rebolo y Artemio Herrero (IAC). Correcciones menores como erratas o similares han sido hechas directamente sobre el texto original.

4.2. Ordenadores (pág. 103)

Se debe mencionar el papel jugado por los archivos y bases de datos, junto con su oferta cada vez mayor de herramientas de análisis.

Este auge llevará asociada una creciente demanda de recursos en la nube y de capacidad de cruzar datos, lo que exigirá mayor velocidad en la red, memoria y capacidad de procesamiento.

5. Proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro (pág. 105)

Igualmente hay que tenerlo en cuenta en el listado de telescopios espaciales de la frase que inicia el primer párrafo de esta página, por lo que esta frase debería quedar redactada así:

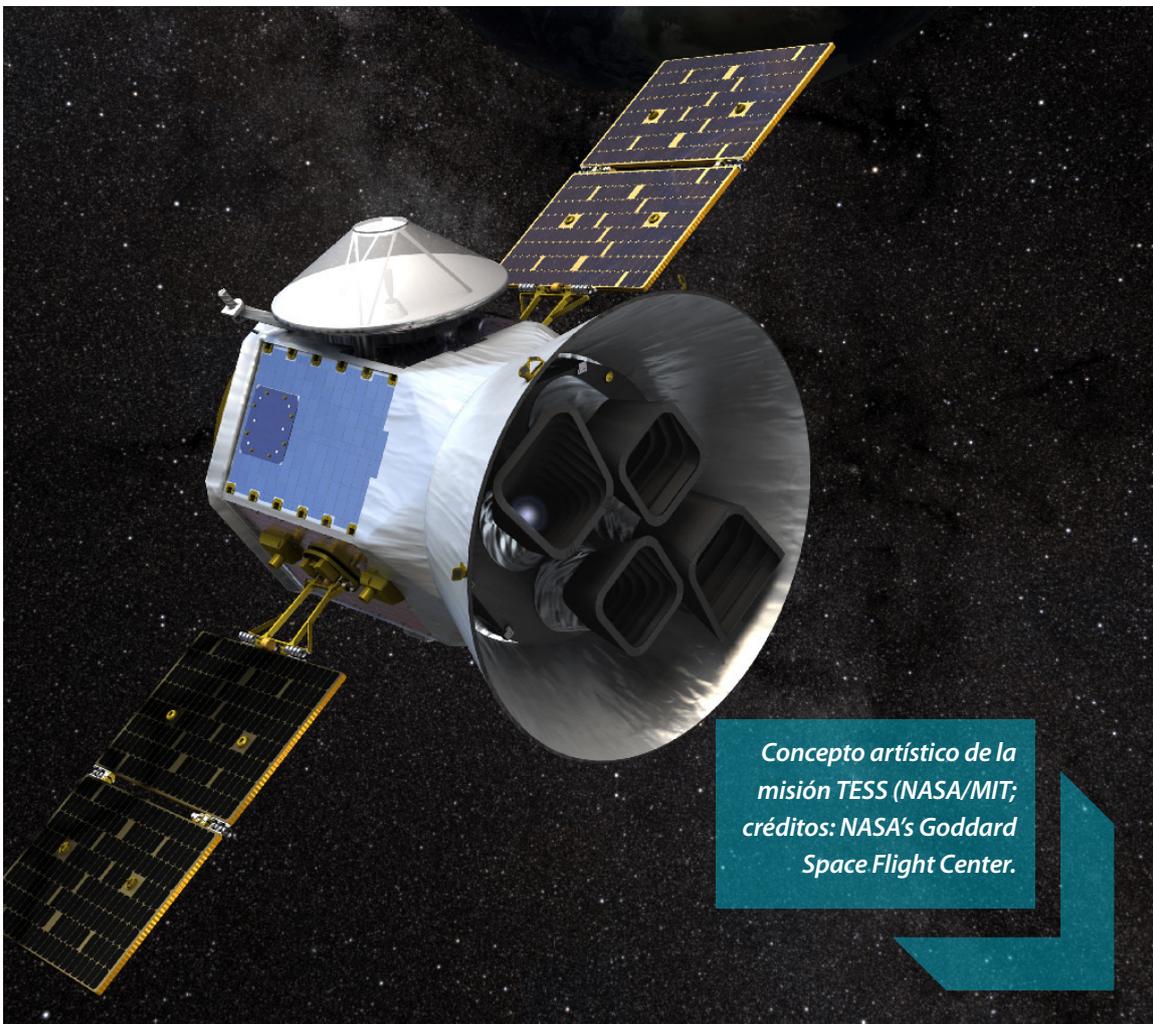
“La explotación de los datos de CoRoT, Kepler y TESS continuará...”

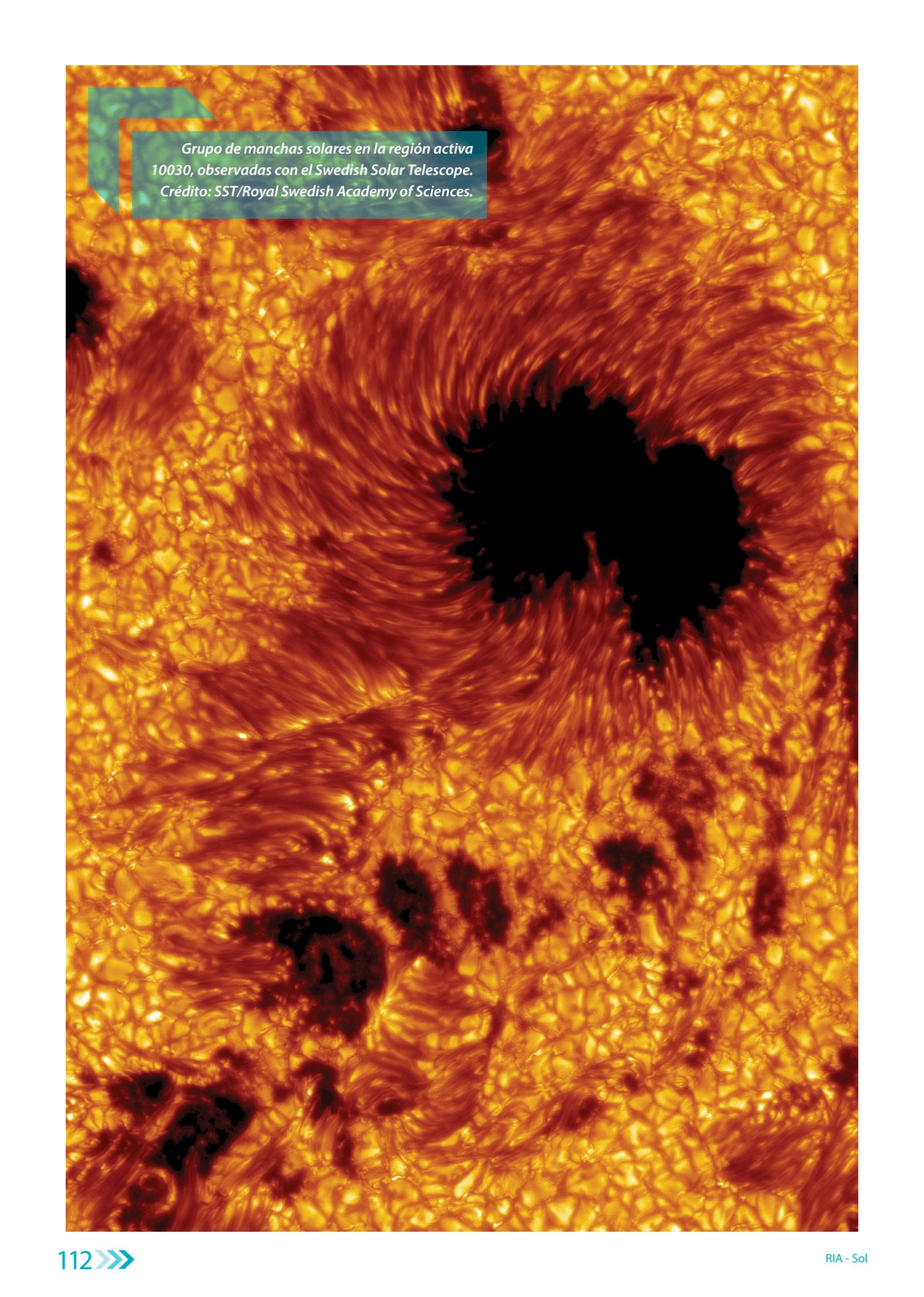
Por otro lado, instrumentos como

HORuS, ESPRESSO o CARMENES (tercera columna) están de hecho ya instalados en sus telescopios. Respecto a la precisión de HORuS que se menciona en el párrafo, podemos especificar que proporciona un poder resolutivo de 25000 en el visible.

(pág. 106)

La tercera columna del texto menciona la aprobación del observatorio CTA-Norte. En la actualidad el CTA-Norte está ya en construcción en la isla de La Palma.





*Grupo de manchas solares en la región activa
10030, observadas con el Swedish Solar Telescope.
Crédito: SST/Royal Swedish Academy of Sciences.*

Sistema solar

Índice

1. INTRODUCCIÓN p. 114

2. OBJETIVOS CIENTÍFICOS PARA LA DÉCADA p. 115

2.1. El Sol y la Heliosfera p. 115

2.2. Planetología p. 116

3. ESTADO ACTUAL p. 117

3.1. El Sol y la Heliosfera p. 117

3.2. Planetología p. 118

4. NECESIDADES INSTRUMENTALES p. 121

4.1. El Sol y la Heliosfera p. 121

4.1.1. Instrumentos terrestres p. 121

4.1.2. Infraestructuras espaciales p. 122

4.1.3. Modelos numéricos relevantes para la heliofísica. Transición a operaciones p. 125

4.2. Planetología p. 126

4.2.1. Instrumentos terrestres p. 126

4.2.2. Infraestructuras espaciales p. 126

4.2.3. Laboratorios en tierra p. 128

4.2.4. Misiones espaciales no en operación p. 128

4.2.5. Misiones espaciales operativas p. 129

5. PROYECTOS CONSOLIDADOS Y ACCIONES ESTRATÉGICAS PARA EL FUTURO p. 132

5.1. El Sol y la Heliosfera p. 132

5.1.1. Instrumentos terrestres p. 132

5.1.2. Infraestructuras espaciales p. 133

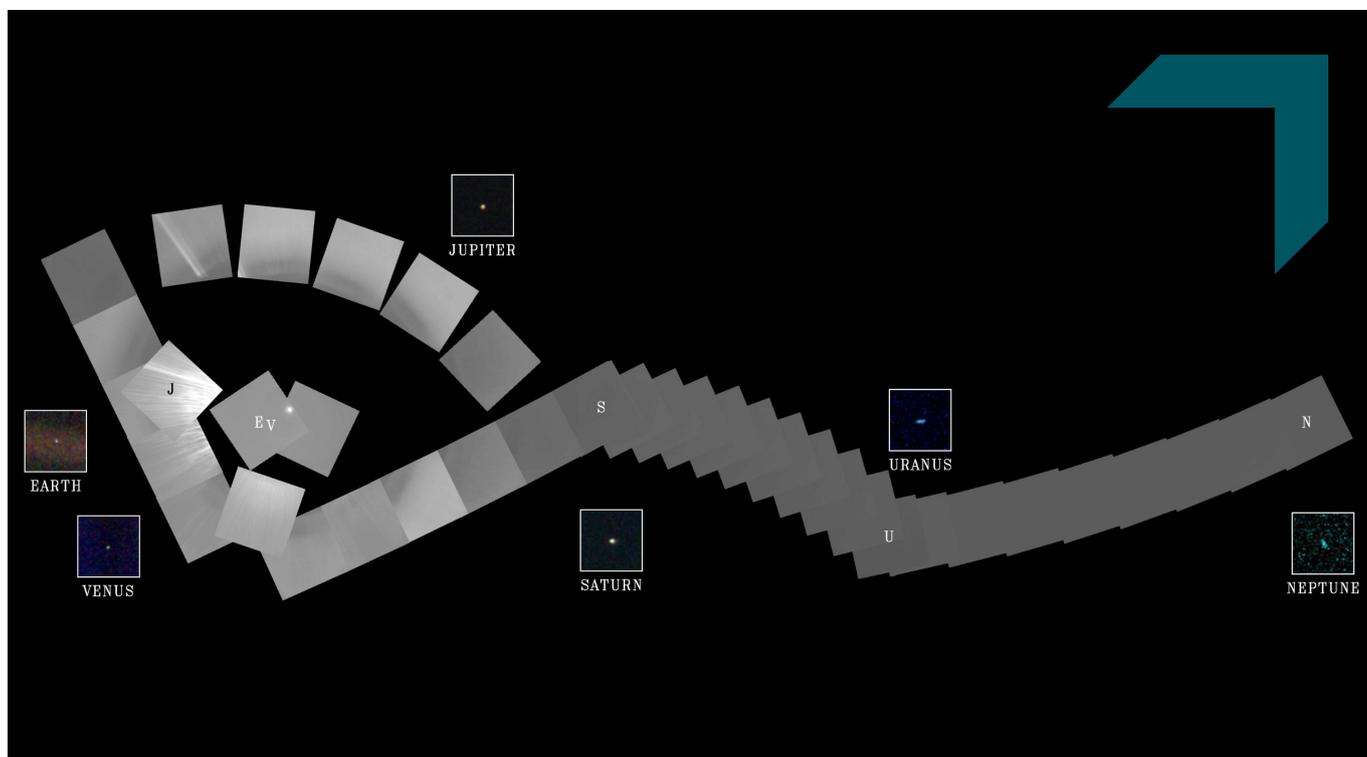
5.2. Planetología p. 134

5.2.1. Infraestructuras espaciales p. 134

5.2.2. Colaboraciones con

industrias nacionales e internacionales p. 137

6. ACTUALIZACIÓN EN 2020 DE ESTA SECCIÓN p. 138



Mosaico de 60 fotos tomada por la Voyager 1 el 14 de febrero de 1990, que muestra 6 de los 8 planetas del Sistema Solar (crédito: NASA/JPL).

1. Introducción

El estudio del Sol y el Sistema Solar, en su conjunto, en sus partes y subconjuntos de estas, así como de las relaciones entre dichas partes y subsistemas, constituye uno de los principales retos de la sociedad actual en tanto que ofrece la mejor aproximación al conocimiento de nuestro entorno más cercano y permite responder preguntas cruciales para nuestra vida en la Tierra. Las disciplinas científicas que estudian estos objetos son la física solar, la física interplanetaria y la física planetaria, todas ellas frecuentemente englobadas en el ambiguo y más extenso término de “ciencias del espacio”. La comunidad científica estadounidense utiliza el término heliofísica que también muestra un cierto arraigo en Europa. La heliofísica pretende entender la historia, evolución y dinámica del sistema solar como un todo, de cada una de sus partes y del acoplamiento entre ellas. En particular, el origen solar de los fenómenos que tienen lugar en el medio interplanetario y de su influencia en la magnetosfera y la atmósfera de los planetas, los fenómenos físicos y la composición química de estas, así como las propiedades superficiales de los planetas y cuerpos pequeños del sistema solar. El todo y sus partes conforman una ciencia con fuertes implicaciones y aplicaciones tecnológicas cuya profundización y explotación son fundamentales para nuestra sociedad actual, aparte de su conocimiento per se, por los riesgos que implican los fenómenos objeto de estudio para nuestra vida en la Tierra. Riesgos reales importantes —algunos de ellos poco

probables, pero no despreciables— que ahora empezamos a entender y que necesitamos saber cómo prevenir, predecir o mitigar. Específicamente, las eventuales amenazas de los NEO (Near Earth Objects) o las condiciones cambiantes del tiempo espacial¹ (conjunto de fenómenos que vinculan las condiciones de nuestro entorno vital en la Tierra) pertenecen al ámbito de la heliofísica. Es indiscutible, pues, el interés de la sociedad por afianzar su conocimiento heliofísico y así poder hacer frente a dichas amenazas.

Se requiere una aproximación global para llegar a comprender este escenario y poder afrontar esos retos. Es verdaderamente importante tener claro el camino a seguir. Sin embargo, no se puede avanzar hacia este objetivo sin un mínimo conocimiento de cada una de sus partes o escenarios y de sus interfaces. Dichas partes o escenarios establecen subcomunidades científicas que motivan la estructura de este informe en subsecciones que se ocupan del Sol y la Heliosfera por un lado y de la Planetología por otro. Instituciones de los cuatro puntos cardinales de España están presentes en la vanguardia del estudio de la física del Sol y la Heliosfera y de la exploración del Sistema Solar. Estas instituciones son (en orden alfabético):

- Centro de Astrobiología (CAB), centro mixto INTA-CSIC
- Grupo de Astronomía y Ciencias del Espacio (GACE), UV
- Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), CSIC

- Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)
- Instituto de Ciencias del Espacio (ICE), CSIC-IEEC
- Institut d’Estudis Espacials de Catalunya (IEEC)
- Instituto de Técnicas Energéticas (INTE), UPC
- Instituto Ignacio da Riva (IDR), UPM
- Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
- Observatori de l’Ebre (OE), CSIC
- Universidad Autónoma de Barcelona (UAB)
- Universidad Complutense de Madrid (UCM)
- Universidad de Alcalá (UAH)
- Universidad de Alicante (UA)
- Universidad de Barcelona. Institut de Ciències del Cosmos (UB-ICC)
- Universidad de Extremadura (UEx)
- Universidad de les Illes Balears (UiB)
- Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
- Universidad de Málaga (UMA)
- Universidad de Valladolid (UVA)
- Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
- Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
- Universidad Politécnica de Valencia (UPV)

En ellas se desarrollan estudios científicos multidisciplinares y tecnología avanzada en el conjunto de disciplinas que constituyen la heliofísica. Se utilizarán los acrónimos correspondientes en el resto del documento.

¹ El tiempo espacial es el estado físico de los entornos espaciales naturales. La disciplina asociada —la Meteorología espacial— pretende, a través de la observación, monitorización, análisis y modelado, varios objetivos: por una parte, comprender y predecir el estado del Sol, de los entornos interplanetario y planetarios, así como de las perturbaciones que los afectan, sean de origen solar o no; por otra parte, analizar en tiempo real y prever los posibles efectos en los sistemas biológicos y tecnológicos. (EU Action Cost 724 “Developing the scientific basis for monitoring, modeling and predicting Space Weather”).

2. Objetivos científicos para la década

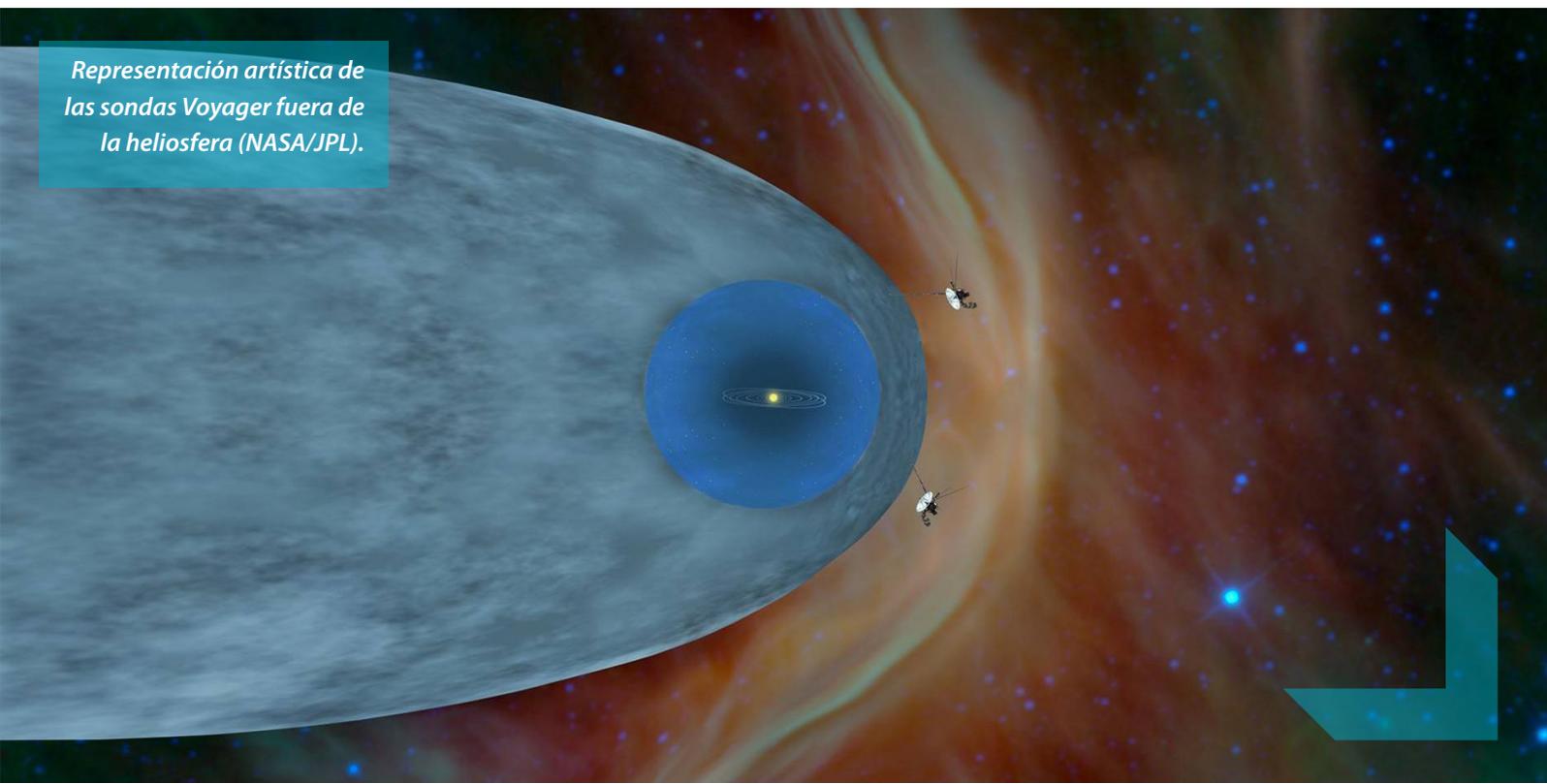
2.1. El Sol y la Heliosfera

El impacto económico y social del tiempo espacial deviene más importante a medida que nuestra sociedad se va haciendo más y más dependiente de la tecnología (véanse, por ejemplo, www.nap.edu/catalog.php?record_id=13060 o www.raeng.org.uk/spaceweather). Por tanto, se hace necesario un mayor conocimiento del origen solar de los fenómenos que tienen consecuencias directas en el tiempo y el clima espaciales, a muy diversas escalas y con numerosos instrumentos observacionales y de simulación numérica:

- los mecanismos que generan el campo magnético y su variabilidad en el fondo de la zona convectiva,
- el transporte del campo magnético hasta la atmósfera solar,
- su impronta observacional,
- el acoplamiento magnético de las distintas capas de la atmósfera solar,
- los procesos de reconexión magnética en el plasma coronal y la generación de violentos fenómenos como fulguraciones y CME (Coronal Mass Ejections),
- el viento solar y el campo magnético interplanetario,
- la generación de perturbaciones y choques interplanetarios y su propagación por la heliosfera,
- la aceleración de partículas energéticas en la corona y en choques interplanetarios y su propagación por el espacio interplanetario.
- la interacción con la magnetosfera terrestre, dando lugar a fenómenos dinámicos como las subtormentas y tormentas magnéticas.

De forma global, el camino a seguir en física heliosférica para la década venidera se puede resumir en:

Representación artística de las sondas Voyager fuera de la heliosfera (NASA/JPL).



- Determinar los orígenes de la actividad solar y predecir las variaciones en el tiempo espacial.
- Determinar la dinámica y el acoplamiento entre la magnetosfera y la ionosfera de la Tierra, y su respuesta a las perturbaciones solares.
- Determinar la interacción del Sol con el Sistema Solar y caracterizar los procesos fundamentales que se dan.
- Desarrollar y mantener la capacidad observacional y las tecnologías necesarias para alcanzar estos objetivos.

Es evidente que los logros actuales y los objetivos generales decenales deben situarse en

nuestro contexto nacional, considerando los grupos de investigación y las infraestructuras existentes y los compromisos internacionales adquiridos.

En consecuencia, el estudio de la física solar y heliosférica resulta crucial para comprender el origen de estos fenómenos. Más específicamente, el estudio del campo magnético solar, del viento solar, del campo magnético interplanetario, de los campos magnéticos planetarios y de los sucesos de partículas energéticas —hasta los confines de la heliosfera (el espacio interestelar)— son los campos de mayor interés concreto.

2.2. Planetología

La planetología en España, que incluye tanto la exploración *in situ* como remota de los cuerpos del Sistema Solar, comprende diferentes áreas de investigación en física, geología, matemáticas y química. Allá por 1965 España comenzó el estudio del Sistema Solar analizando la luz zodiacal. A este trabajo siguieron tesis doctorales sobre el mismo tema, estudios teóricos e *in situ* de la atmósfera terrestre (mesosfera) y a principios de los 80, España extendió sus horizontes haciendo su incursión en el estudio de los planetas gigantes. En la actualidad la madurez es tal que el colectivo de científicos y tecnólogos en España forman parte de consorcios internacionales que diseñan misiones espaciales, definen objetivos científicos multidisciplinarios, construyen instrumentos, desarrollan las herramientas para la explotación científica de los datos, preparan programas de

divulgación de los resultados, y pavimentan el camino para que futuras generaciones puedan tomar el relevo en todas y cada una de las áreas mencionadas.

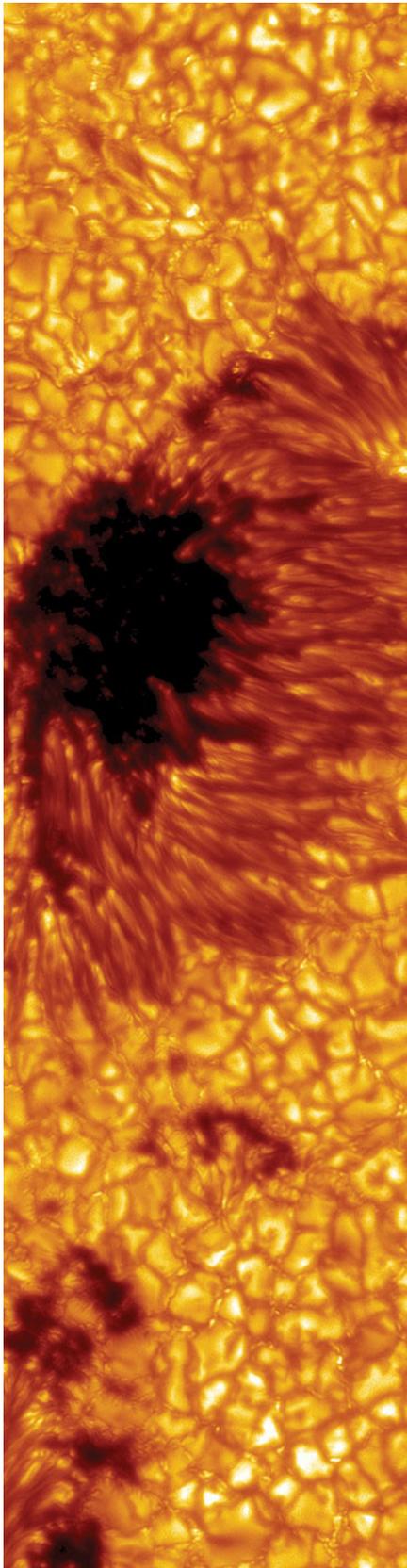
Es difícil resumir en unas frases los objetivos científicos perseguidos por los estudios que se llevan a cabo dentro de las ciencias planetarias. *Grosso modo*, la investigación sobre el Sistema Solar versa sobre la exploración *in situ* de la superficie y sub-superficie de los cuerpos sólidos, de las atmósferas de planetas y cometas, de la estructura interna de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, de los satélites alrededor de Júpiter y Saturno, de asteroides y otros cuerpos pequeños con especial énfasis en la obtención de información directa a través de muestras de éstos traídas a la Tierra. Se puede observar que se cubren todos los objetos del Sistema Solar, lo cual significa



que las preguntas de fondo a responder son ¿cuáles son las condiciones que se dieron para formar un planeta —y eventualmente albergar vida—? o ¿cómo funciona el Sistema Solar a gran escala? Esta última pregunta sirve de puerta de entrada para el estudio de los discos protoplanetarios, o de los planetas ya encontrados y en vía de caracterización físico-química.

3. Estado actual

3.1. El Sol y la Heliosfera



El campo magnético del Sol desempeña un papel relevante en multitud de procesos físicos que tienen lugar en nuestra estrella, tanto en el interior como en su atmósfera. Es responsable, por ejemplo, del ciclo de actividad solar de 11 años. En ocasiones, puede generar enormes cantidades de energía de forma explosiva. Las fulguraciones solares son uno de los fenómenos más violentos del Sistema Solar y ocurren precisamente cuando el campo magnético del Sol se reorganiza súbitamente (reconexión magnética), pasando a un estado de menor energía. Este proceso es capaz de calentar el plasma solar varios millones de grados y acelerar partículas ionizadas hasta velocidades relativistas. La reconexión del campo magnético solar también da lugar a eyecciones coronales de masa, explosiones que lanzan material de nuestra estrella al espacio. Estas eyecciones se propagan por el espacio interplanetario, sobre el viento solar, y pueden impactar la Tierra si la geometría es adecuada, produciendo perturbaciones en el entorno de nuestro planeta. En particular, las partículas aceleradas en estos procesos representan un riesgo de radiación importantísimo para las misiones espaciales y los satélites en órbita terrestre.

A menor escala, la presencia de campo magnético en la superficie del Sol inhibe el transporte de energía por convección. Esto modifica la dinámica de la atmósfera solar y genera estruc-

turas estables de muy pequeño tamaño que al interactuar entre sí pueden desencadenar algunos de los procesos anteriormente descritos. Debido a su influencia en el balance energético y dinámica de la atmósfera solar, el campo magnético del Sol se ha convertido en el centro de atención de muchos investigadores en la última década. Es el causante de muchos procesos físicos, pero se desconocen los mecanismos a través de los cuales lo hace. Por ello, cada vez con más insistencia, se ha visto la necesidad de "medir" el campo magnético en la superficie del Sol para entender todos estos procesos. La medida del campo magnético se ha convertido, así pues, en un elemento esencial de la actual investigación en Física Solar.

Se habla frecuentemente de 'los campos magnéticos' en razón de la apariencia jerarquizada y discontinua espacialmente en estructuras bien diferenciadas. La medida o, con más propiedad, la inferencia de los campos magnéticos, debe realizarse en todas las capas de la atmósfera solar (fotosfera, cromosfera, región de transición y corona) porque los procesos no son locales y se necesita una visión holística del sistema para poder entenderlo completamente. Además, es necesario inferir los campos magnéticos a sus escalas espaciales intrínsecas, que en el caso del Sol resultan ser del orden del recorrido libre medio de los fotones en la fotosfera (unos 100 km).

La necesidad de medir campos magnéticos está definiendo muchas de las tendencias actuales en Física Solar. A tenor de lo dicho, éstas pueden resumirse como sigue:

- 1) Búsqueda de muy alta resolución espacial, para observar los procesos físicos a sus escalas intrínsecas.
- 2) Visión de la atmósfera solar como un único sistema, para poder entender los mecanismos no locales que actúan en ella.
- 3) Análisis observacionales multiinstrumento, para estudiar simultáneamente las distintas capas atmosféricas y detectar los procesos físicos en distintas longitudes de onda, lo que permite caracterizarlos de forma precisa.
- 4) Combinación de observaciones y simulaciones numéricas. Debido a la complejidad y limitaciones actuales de las observaciones, las simulaciones numéricas ayudan a interpretar los datos experimentales. Las observaciones, por su parte, ayudan a refinar los modelos numéricos y hacerlos más realistas, para poder describir con mayor detalle la microfísica de la atmósfera solar.

El conocimiento del interior solar se ha ido perfeccionando en paralelo a las medidas heliosismológicas, mediante las cuales se obtienen series temporales de diversos parámetros, especialmente de la velocidad del plasma solar. La interpretación de esas medidas permite inferir las propiedades físicas del interior de nuestra estrella.

Por su parte, los hitos más relevantes en física heliosférica en la última década han sido consecuencia del desarrollo de innovadores métodos de observación, desde tierra y desde el espacio; de los grandes avances habidos en teoría, modelado y cómputo de los procesos físicos que tienen lugar en la heliosfera; y de la aplicación de nuevos métodos de visualización directa de las observaciones de dichos procesos. Se ha conseguido así un enorme avance en el conocimiento de:

- 1) La variabilidad de los mecanismos que generan el campo magnético del Sol y de su dinámica en la atmósfera solar.
- 2) El origen y evolución del viento solar y del campo

magnético interplanetario, así como de su extensión hasta los confines de la heliosfera (la inmensa burbuja magnética que contiene nuestro sistema solar).

- 3) Las fulguraciones solares y de las eyecciones de masa coronal (los agentes conductores más importantes del tiempo espacial).
- 4) Los cambios inducidos por las tormentas solares en los plasmas, partículas energéticas y campos magnéticos que rodean la Tierra.
- 5) La estructura y dinámica de otras magnetosferas del sistema solar (especialmente las de Mercurio, Júpiter y Saturno).
- 6) Las escalas espaciales y temporales involucradas en el acoplamiento entre la magnetosfera y la atmósfera terrestres (región auroral-ionosférica).

Estos avances han permitido la puesta en marcha de servicios interinstitucionales, por ejemplo, en meteorología espacial, con el objetivo de producir herramientas fiables para la predicción (previsión, al menos) del tiempo espacial y de sus efectos en la Tierra y su entorno espacial.

3.2. Planetología

A continuación se enumeran las diferentes áreas de investigación junto con sus más importantes campos de acción así como las infraestructuras, bien en tierra, bien en el espacio, de las que hacen uso los diferentes grupos:

1. Geología planetaria desarrollada en el CAB (INTA-CSIC), IAA (CSIC), UCM:

- Caracterización de la geología de ambientes extremos actuales y paleoambientes en la Tierra de interés astrobiológico con el fin de poder acotar bajo qué condiciones la vida –tal y como la conocemos– puede surgir y prevalecer.

- Caracterización de procesos geológicos planetarios que afectan a la dinámica interna o externa incluyendo los biogeoquímicos.
- Geomorfología de planetas terrestres y satélites helados a partir de imágenes adquiridas in situ por cámaras y altímetros láser en diferentes misiones espaciales. Para este

estudio, es necesario georeferenciar las imágenes en un sistema de coordenadas planetario desarrollando software propio y automatizándolo para optimizar los recursos disponibles (humanos y técnicos).

- Participación en misiones espaciales al Sistema Solar (Mars Science Laboratory)
- Explotación científica de datos de archivo de misiones NASA como Mariner 10, Messenger, Galileo o de misiones ESA como Mars Express, VenusExpress.

2. Atmosferas planetarias y habitabilidad: CAB (INTA-CSIC), IAA (CSIC), ICE (CSIC-IEEC), UCM, UPV/EHU:

- Estudios sobre Marte que comprenden analizar el campo de radiación ultravioleta, presión, humedad en la superficie marciana, así como velocidad y dirección del viento, y temperatura del aire alrededor del instrumento posado en la superficie. Igualmente, se hacen estudios del magnetismo y geodesia del planeta.
- Interpretación de espectros planetarios en el infrarrojo para conocer con gran detalle y precisión la estructura térmica y la

composición de la atmósfera bajo estudio, tanto la terrestre como la de otros planetas del Sistema Solar e incluso extrasolares.

- Mediante simulaciones numéricas complejas, se puede conocer la dinámica, meteorología, estructura de nubes y térmica de las atmósferas de planetas como Venus, Júpiter, Saturno o del satélite Titán. Igualmente, modelos de termoquímica y fotoquímica atmosférica (incluyendo difusión molecular y turbulenta, régimen de vientos, condensación, interacción con campo magnético, etc), estacionarios o de evolución temporal, permiten poner en contexto la química en el Sistema Solar, tanto en la actualidad como en fases tempranas de este. De forma general, estos estudios proporcionan una visión integrada de las atmósferas en planetas y satélites, que a su vez, está conectada con el origen, formación y evolución del cuerpo estudiado tanto aisladamente como en interacción con el Sol y con los demás objetos del Sistema Solar. El retorno científico de estos estudios tan multidisciplinarios no se circunscribe a nuestro sistema planetario, sino que sirve de banco de pruebas para validar las

observaciones actuales y futuras de sistemas planetarios alrededor de otras estrellas.

3. Cuerpos pequeños del Sistema Solar en diferentes disciplinas desarrolladas en el IAC, IAA (CSIC), ICE (CSIC-IEEC), UA, UPV, UVA, UPC.

No solo el estudio de los planetas y sus satélites es fundamental para avanzar en el conocimiento de cuáles fueron las condiciones que desencadenaron la formación de estos, o cómo el Sistema Solar funciona. Existen también otros cuerpos, conocidos como cuerpos menores, que se consideran los "sobrantes" en los procesos de formación de planetas y satélites. Estos "sobrantes" tienen una característica que los hace especialmente valiosos: aún preservan la huella del origen, formación y evolución del Sistema Solar. Al ser su masa y tamaño pequeños no han sido procesados geológicamente y, desde el origen del Sistema Solar hace 4,500 millones de años, han estado orbitando a distancias heliocéntricas grandes por lo que no han sido tampoco procesados térmicamente. Por ello, estudiar como un continuo desde los meteoroides

Paisaje marciano por la sonda Mars Pathfinder (NASA/JPL).



hasta los objetos transneptunianos, pasando por asteroides, cometas, centauros y cometas en el cinturón de asteroides, e integrarlos en el entorno planetario en que se encuentran (alrededor de la Tierra, entre Marte y Júpiter, orbitando Júpiter, más allá de la órbita de Neptuno) representa una de las grandes líneas de exploración del Sistema Solar en el futuro.

Por lo tanto, se realizan observaciones desde tierra del polvo cometario y de cometas que residen en el cinturón de asteroides o asteroides que presentan actividad cometaria bien por impacto de otros asteroides bien por sublimación de gases subsuperficiales y se hacen modelos dinámicos y de transporte de luz solar de la coma y la cola cometaria. También se estudian las características espectrales (alteración acuosa) de meteoritos y asteroides para intentar dilucidar el origen del agua existente en la Tierra todavía en debate si el origen es cometario o asteroidal, o para acotar los modelos de cosmoquímica, química prebiótica y de catálisis heterogénea en la nebulosa solar. En laboratorios altamente sofisticados, se fabrican e irradian hielos de interés astrofísico para poder comparar el espectro medido en tierra con el observado tanto con telescopios terrestres como espaciales y así acotar los posibles compuestos helados sobre la superficie del objeto en cuestión, principalmente transneptunianos o satélites helados de los planetas gigantes. Se hace un seguimiento y observación de los asteroides cercanos a la Tierra (NEAs, Near Earth Asteroids) y asteroides potencialmente peligrosos para la Tierra (Potentially Hazardous Asteroids) para determinar su composición superficial y subsuperficial en conexión

directa con la composición en el Sistema Solar interior. Se detectan y caracterizan (órbita, existencia de atmósfera, forma y tamaño, etc) objetos transneptunianos mediante ocultaciones de estrellas observadas con telescopios en diferentes localizaciones por las que la sombra de la ocultación (básicamente un eclipse estelar) tendrá lugar.

*Cometa Hyakutake
en 1996, APOD del 16
de diciembre de 2009
(crédito: Doug Zubenel).*



4. Necesidades instrumentales

4.1. El Sol y la Heliosfera

4.1.1. Instrumentos terrestres

En virtud de los Acuerdos Internacionales en materia de Astrofísica, España tiene acceso al 20 % del tiempo de observación disponible en los telescopios solares ubicados en los observatorios del Roque de los Muchachos y del Teide. Estos son el Vacuum Tower Telescope (VTT), el Swedish Solar Telescope (SST), el Télescope Héliographique pour l'Étude du Magnétisme et des Instabilités Solaires (THEMIS), y el GREGOR y son los telescopios europeos más potentes en el campo de la física solar de alta resolución. Las principales características de estas infraestructuras se encuentran resumidas en la tabla 1. Todos

estos telescopios son gestionados por instituciones extranjeras (VTT y GREGOR por Alemania, SST por Suecia y THEMIS por Francia). Como consecuencia, todos los gastos de operación son financiados por estas instituciones y España accede a ellas por estar ubicadas en territorio español.

España ha diseñado y construido un polarímetro (TIP, Tenerife Infrared Polarimeter) que ha estado operativo en la VTT desde 1999 en régimen de uso común para todos los observadores y que se ha convertido en el instrumento más demandado y usado en esta instalación. Igualmente,

España ha diseñado y construido el espectrógrafo del telescopio GREGOR (GRIS, Grating Infrared Spectrograph) al cual se ha acoplado una modificación de TIP para la realización de espectropolarimetría en el infrarrojo cercano con este telescopio.

El acceso a todos estos telescopios se realiza mediante selección competitiva a través de un Comité de Asignación de Tiempo de observación formado por dos miembros de IAC, dos representantes de la comunidad nacional y un representante de la comunidad extranjera. La periodicidad de los anuncios es anual.

Tabla 1. Telescopios solares de los observatorios del Teide y el Roque de los Muchachos y sus características principales. V: instrumentación para el rango visible del espectro, NIR: instrumentación para el infrarrojo cercano, AO: óptica adaptativa, HRI: imágenes de alta resolución, HRS: espectroscopía de alta resolución, VVP: espectropolarimetría vectorial en el visible, NIRVP: espectropolarimetría vectorial en el infrarrojo cercano.

Telescopio / Ubicación	Abertura [m]	Rango espectral	Características / Instrumentos
VTT / OT	0.7	0.35 μ m – 2 μ m	Reflector evacuado, celostato V, IR, AO, HRI, HRS, VVP, NIRVP
THEMIS / OT	0.9	0.4 μ m – 0.8 μ m	Cassegrain Coudé V, HRS, VVP, baja polarización instrumental
SST / ORM	1.0	0.35 μ m – 1.1 μ m	Refractor evacuado V, AO, HRI, HRS, VVP
GREGOR / OT	1.5	0.35 μ m – 12 μ m	GREGORY Coudé abierto V, NIR, AO, HRI, HRS, VVP, NIRVP

Se pueden encontrar más detalles de los telescopios solares en el anexo.

En el Laboratorio Solar del Teide se encuentra un buen número de instrumentos especialmente dedicados a la heliosismología y astrosismología. Tales instrumentos se operan de forma continua. Desde que empezó en 1976, la heliosismología se ha desarrollado con éxito en el IAC, merced, sobre todo, a la participación en redes globales que aseguran la observación solar ininterrumpida prescindiendo del ciclo día-noche. Actualmente, los instrumentos solares operativos son:

- Espectrofotómetro solar Mark I: es un espectrofotómetro por dispersión resonante que utiliza medidas de la velocidad a lo largo de la línea de visión del Sol como una estrella con la luz de la línea de K I a 7699 Å.

- Tacómetro de Fourier GONG: este instrumento es uno de los seis desplegados por todo el planeta dentro de la red Global Oscillations Network Group, liderada por el National Solar Observatory norteamericano. Cada instrumento de la red proporciona imágenes de intensidad, de velocidad y de campo magnético a lo largo de la línea de visión utilizando la línea de Ni I a 6768 Å con una resolución espacial de 1 segundo de arco y una cadencia de 60 s.

Telescopios solares ubicados fuera del territorio español

La activa comunidad solar no solo utiliza los telescopios ubicados en OT y ORM. Además utiliza esporádicamente el telescopio DST ubicado en el Sacramento Peak Observatory, en Nuevo México, Estados Unidos.

Monitor de neutrones de Castilla-La Mancha (CaLMa)

CaLMa (www.calmanm.es) es un detector de neutrones secundarios generados por la interacción de rayos cósmicos y partículas energéticas solares con átomos en las capas altas de la atmósfera. CaLMa sigue la actividad solar y el ciclo solar observando los decrecimientos Forbush y la intensidad relativa de rayos cósmicos. Estas variaciones de intensidad están asociadas a la llegada de ondas de choque interplanetarias, conducidas por CME, o por el paso de regiones de interacción en el viento solar. El monitor detecta también los sucesos GLE (Ground Level Enhancements), originados por la componente de más alta energía de los sucesos de partículas energéticas solares. CaLMa forma parte de la red mundial de monitores de neutrones (www.nmdb.eu) y está integrada en un sistema de alerta sobre aumento de radiación solar desarrollado bajo el programa Space Situational Awareness de la ESA.

4.1.2. Infraestructuras espaciales

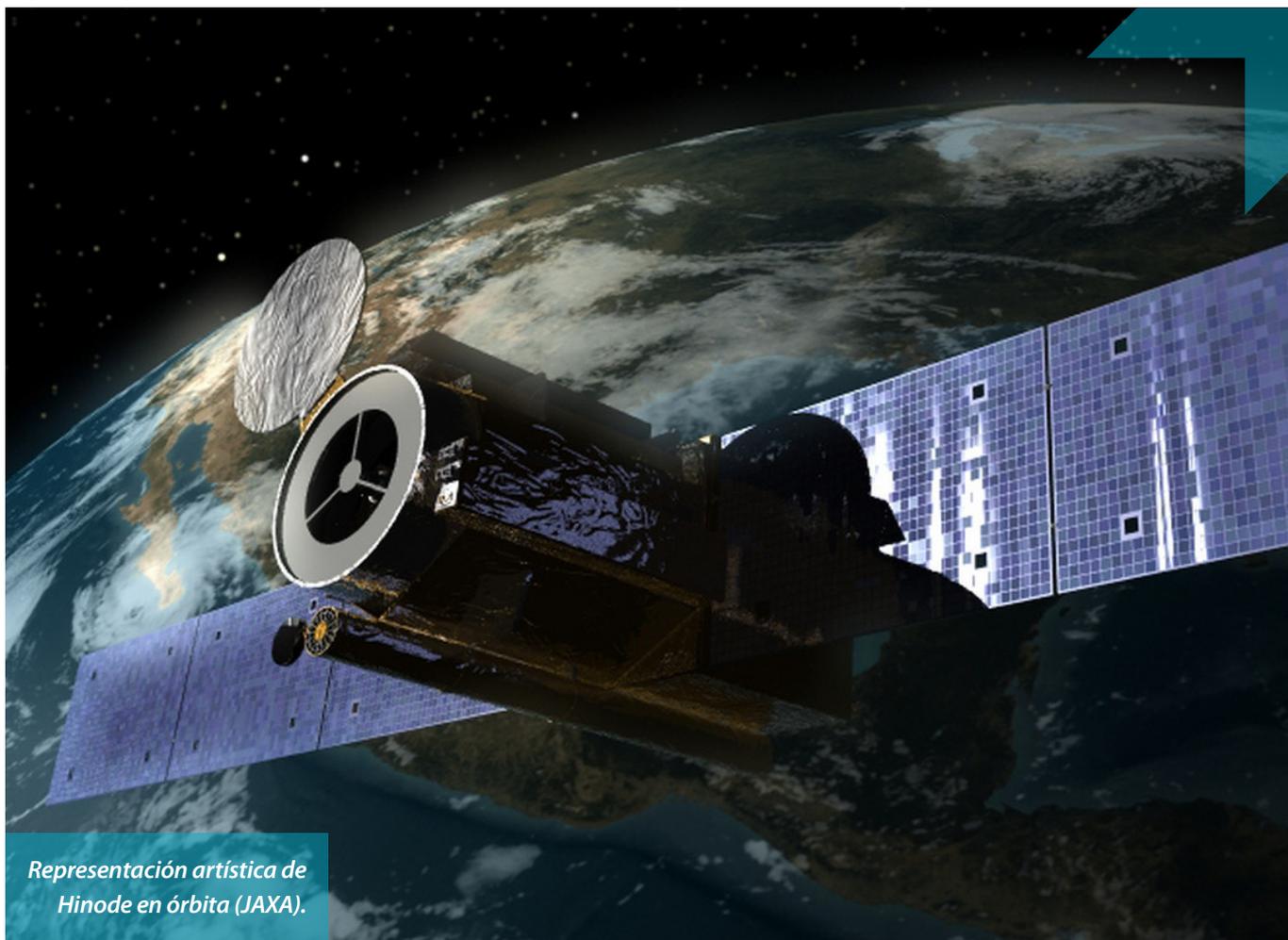
Hinode

La misión Hinode de JAXA/NASA es en la actualidad la más exitosa en los campos de actividad de la comunidad española. Desde su lanzamiento en 2006, los físicos solares españoles (IAA, IAC, UB, UIB, UV) han venido participando de diversas formas en la explotación de la misión, ocupando puestos de científico visitante, de investigador posdoctoral, de responsable de las observaciones, de miembro en el comité científico director como representante de la ESA y el IAA (CSIC) alberga la página Web Hinode Europe (https://w3.iaa.csic.es/hinode_

europe/index.php/es) que sirve de vínculo europeo con la misión. Los intereses españoles se han centrado fundamentalmente en la explotación de los datos del espectropolarímetro visible y del filtro de banda estrecha. Los resultados obtenidos han sido abundantes y muy relevantes, sobre todo en la comprensión de la estructura del interior de la red fotosférica, así como de la estructura magnética de la penumbra de las manchas y sus alrededores. Económicamente, el uso de esta infraestructura no supone coste por la política abierta de NASA y JAXA en la distribución de datos.

Sunrise

La misión estratosférica Sunrise es una colaboración entre las agencias espaciales alemana, DLR, estadounidense, NASA, y el Plan Estatal de I+D+i. La participación de la comunidad española en la misión ha sido a través del magnetógrafo IMAx, concebido, diseñado, construido, integrado y operado íntegramente por un consorcio de instituciones españolas (IAC, IAA, INTA, UV) y con la intervención del IDR en el diseño térmico global de la misión. El primer vuelo tuvo lugar en junio de 2009 y los resultados obtenidos han sido muy exitosos.



Representación artística de Hinode en órbita (JAXA).

La mayoría de ellos tienen que ver con la estructura magnética del interior de la red fotosférica puesto que el vuelo tuvo lugar en un periodo de excepcional inactividad magnética. El éxito ha sido tal que la sociedad Max Planck, organismo del que depende el instituto líder, MPS, de Katlenburg-Lindau, lo ha nombrado proyecto de bandera y obtenido financiación privada para un segundo vuelo en 2013, en el que, de nuevo, el equipo español ha estado directamente implicado y con el que se han podido estudiar las regiones activas solares. La explotación de sus resultados se extenderá previsiblemente

te un mínimo de otros cuatro años como en el caso anterior, en el transcurso de los cuales se discutirá la pertinencia de un tercer vuelo. Hay que decir que el gasto económico del segundo y posteriores vuelos resulta muy pequeño (~ 200 k€ más los viajes y actividades de análisis de datos de los investigadores) con lo que no resulta descabellada la financiación de una participación española tan exitosa.

Solar Dynamics Observatory

El *Solar Dynamics Observatory* es una misión de NASA dedicada al estudio de la dinámica y magnetismo solares. De entre

sus instrumentos, los de mayor interés para la comunidad española son el AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*) que produce imágenes solares en 10 longitudes de onda cada diez segundos y el HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) que es un magnetógrafo vectorial que trabaja en 6 longitudes de onda que barren la línea espectral a 617.3 nm del Fe I. Lanzada en 2010, la misión ya ha comenzado a ofrecer resultados relevantes y de gran interés para los investigadores españoles (IAA, IAC, UAH, UB, UMA). Los datos que proporciona están siendo utilizados tanto para el estudio del

campo magnético atmosférico y su variabilidad a diversas escalas como para el análisis de sucesos violentos de la actividad solar (como fulguraciones y CME), per se y en relación con los sucesos de partículas energéticas observados por naves situadas en distintos puntos del espacio interplanetario (SOHO, ACE, STEREOs, etc.).

Instrumentación espacial heliofísica. Bases de datos

ACE, WIND, SoHO, GOES 12-15 y STEREO A y B son los satélites científicos operativos que en la actualidad proporcionan la mayor parte de los datos medidos in situ del plasma del viento solar, campo magnético interplanetario y partículas energéticas solares (protones, electrones e iones pesados y composición isotópica). Las observaciones a bordo, después de una fase inicial de procesado, quedan a disposición de la comunidad científica o, si son de limitada difusión, son accesibles bajo acuerdo o colaboración internacional. Existen bases de datos para casi todos los detectores de plasma del viento solar, de partículas energéticas y del campo magnético lanzados al espacio, en órbita terrestre (IMPs, CRESS, Cluster, etc.) o interplanetarios (ISEE-3, Helios-1 y -2, Ulysses, Voyager, Cassini, Messenger, etc.); son absolutamente necesarios para el estudio de pos-evento y su relación con la actividad solar.

ACE (NASA, 1997), WIND (NASA, 1994) y SOHO (ESA/NASA, 1995) describen órbitas-halo en torno al punto de Lagrange interno del sistema Sol-Tierra, unos 2 millones de kilómetros por delante de la Tierra en dirección al Sol (0,99 AU); están en la fase final de su vida y ya está planificada (como SORCE,

DSCOVR, IMAP, FASR o COSMO) su sustitución, pues la información que proporcionan es imprescindible. STEREO A y B (2006) son dos satélites casi idénticos que se mueven en órbitas próximas a 1 AU aumentando gradualmente su separación angular relativa y respecto a la posición de la Tierra. Su misión básica es realizar observaciones estereoscópicas (junto con las observaciones a 1 AU) de CME, del viento solar y de partículas energéticas solares. Las naves STEREO nos permiten observar el desarrollo de estos fenómenos solares desde distintos puntos de vista, aunque siempre a una distancia de 1 AU (de ahí la importancia de Solar Orbiter: su distancia radial del Sol y su excursión en latitud). GOES (NASA/NOAA) es una familia de satélites, clave del Servicio de Tiempo Espacial (NSWP) de los Estados Unidos de América; sucesivamente lanzados desde 1974, estas plataformas equipadas con detectores proporcionan medidas no direccionales de sucesos de partículas altamente energéticas. Debe mencionarse el programa SSA (Space Situational Awareness) de la ESA que contempla el desarrollo de monitores de partículas y campos magnéticos para la predicción de sucesos en meteorología espacial, de forma que Europa logre tener un sistema de prevención y predicción (para Galileo, por ejemplo) no dependiente de NASA u otras agencias espaciales. Solar Probe+ (lanzamiento en agosto de 2018) es una misión de NASA diseñada para, tras un largo periplo interplanetario, penetrar la corona solar y realizar medidas in situ del viento solar, del campo magnético y de partículas energéticas; el objetivo es entender cómo se calienta la corona solar, cuál el origen del viento solar y cómo se aceleran las partículas.

Los grupos científicos españoles (IAA, IAC, UAH, UB, UiB, UMA) utilizan esa información para analizar sucesos solares de partículas y la estructura del medio interplanetario perturbado, y para construir modelos numéricos, validarlos y preparar aplicaciones que permitan hacer predicciones sobre aspectos del tiempo espacial. Un problema importante apenas abordado es el uso rutinario de esta información, en combinación con la de la actividad solar proporcionada por instrumentos de observación remota, sea en el visible, UV, rayos X y rayos γ o emisión radio, embarcados en SOHO, Hinode, SDO, RHESSI, INTEGRAL, Proba2, entre otros, y los obtenidos desde tierra por los radiotelescopios solares, los monitores de neutrones y los sondeos ionosféricos (OE). La Comunidad Europea, a través de programas como el Séptimo Programa Marco (FP7), incentiva el desarrollo de instrumentos que hagan fácil el uso rutinario de tales observaciones, un ejemplo es el proyecto FP7-SEPserver (UB); en el mismo sentido cabe mencionar los proyectos interdisciplinares del ISSI (International Space Science Institute, Suiza/ESA), en los que participan investigadores españoles (OE, UAH, UB, UPV).

SOHO, un veterano observador del Sol (NASA/ESA).



4.1.3. Modelos numéricos relevantes para la heliofísica. Transición a operaciones

Existen problemas importantes en física solar y heliosférica difíciles (por no decir imposibles) de resolver a partir de las observaciones, muy especialmente si solo se dispone de una nave espacial. Las medidas presentan sesgos observacionales difíciles de evaluar y las mediciones in situ suelen ser limitadas en número, extensión espacial y temporal, y generalmente se dan en un entorno complejo y variable en el tiempo. Por ejemplo, en plasmas encontramos la transición entre regímenes magnetohidrodinámico y cinético, la simulación de la generación de choques interplanetarios conducidos por CME, desde el Sol hasta la órbita de la Tierra (o de Marte), o la dinámica de los antechoques de choques interplanetarios acolisonales o la aceleración y almacenamiento de partículas. Todos ellos son muy relevantes para entender la generación del campo magnético solar, la dinámica coronal de las CME, y la aceleración y transporte de partículas energéticas (proyecto FP7-

Spacecast; UB). Los experimentos numéricos facilitan, por una parte, estudiar estos fenómenos en un entorno controlado y que permita reproducir y verificar medidas obtenidas en el espacio. Por otra parte, permiten producir aplicaciones o herramientas específicas para su uso en el diseño de misiones espaciales y la prevención y predicción (en meteorología espacial o en el diseño de SO/PHI, por ejemplo). En el ámbito de la física solar, las simulaciones magnetohidrodinámicas están suponiendo una verdadera revolución en nuestra comprensión del Sol. Desde sus comienzos meramente con aproximaciones hidrodinámicas y, por tanto, de campo nulo, hasta las sofisticadas simulaciones actuales que proporcionan verdaderos escenarios comparables directamente con las observaciones, el avance ha sido formidable en los últimos años. Muchos de los fenómenos están incluso siendo predichos con antelación a su observación y otros, como la sismo-

logía cromosférica y coronal, nos están sirviendo para comprender fenómenos que apenas ahora son descubiertos con los instrumentos espaciales. Los grupos del IAC y de la UiB son especialmente activos en estos campos.

Tampoco puede olvidarse que el volcado y análisis de la información obtenida mediante experimentos tanto embarcados como situados en instrumentos terrestres es tan masiva que precisa de medios de computación cada vez más potentes y sofisticados. En estos aspectos también existen desarrollos novedosos en el seno de la comunidad española como es el caso del diseño de un inversor electrónico de la ecuación de transporte radiativo (IAA-CSIC) que viajará a bordo de la misión Solar Orbiter. Generalmente estos experimentos o la reducción de datos representan una gran carga de cálculo, supercomputación que precisa de medios de altas prestaciones.



4.2. Planetología

4.2.1. Instrumentos terrestres

Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) y del Teide (OT)

El Liverpool Telescope es un telescopio 100 % robótico propiedad del Astrophysics Research Institute de la Liverpool John Moores University (UK). Cuenta con una cámara en el rango óptico (RATCam), un polarímetro en el óptico (RINGO3), un espectrógrafo de campo integral en el visible (FRODOSpec) y una cámara para fotometría rápida (RISE).

Centro Astronómico Hispano Alemán Calar Alto Observatory (CAHA)

El telescopio de 1.2m cuenta con una cámara CCD de campo grande y en él se emplea la cámara de alta resolución espacial y temporal PlanetCam de la UPV/EHU

Observatorio de Sierra Nevada (OSN)

El Observatorio es operado, desarrollado y gestionado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA, CSIC) y dispone de dos telescopios con 1.5 m y 0.90 m de apertura. El tiempo se distribuye mediante un comité interno del IAA entre investigadores del instituto.

El telescopio de 1.5 m cuenta con una cámara CCD que es muy utilizada por los planetólogos del IAA. También se utiliza el instrumento SATI instalado en el OSN. SATI un interferómetro Fabry Péroต์ adaptado para medir la emisión, integrada en altura, de las emisiones de la banda (0-1) del sistema atmosférico del O₂.

Observatorio Astronómico Montsec (OAdM)

De propiedad del Consorci del Montsec y financiado por la Generalitat de Catalunya este observatorio cuenta con un telescopio robótico de 80 cm (Telescopio Joan Oró) operado por el Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC). Cuenta con una cámara CCD (MEIA) y un espectrógrafo en el rango visible (ARES). Es utilizado por los planetólogos del IEEC.

Observatorio Astronómico La Hita

El observatorio es propiedad de la fundación astroHita. Cuenta, entre otros, con un telescopio robótico de 0.77 m y una cámara CCD que es utilizado por grupos del IAA-CSIC.

4.2.2. Infraestructuras espaciales

Archivo de Spitzer

Spitzer (NASA) es un telescopio infrarrojo que opera entre las 3 y 180 micras y que se lanzó en 2003, cuyo agente enfriador se terminó el 15 de mayo del 2009 y que actualmente solo efectúa observaciones en el IR cercano. Los datos adquiridos por el telescopio Spitzer han sido y son complementarios a los obtenidos por el telescopio espacial Herschel en el caso de los objetos transneptunianos y centauros. Además, la

sinergia se ha complementado con observaciones desde tierra habiendo permitido así estimar el tamaño, masa, forma (esferoidal o elipsoidal), y temperatura y composición superficial de un gran número de pobladores del cinturón de Kuiper con distancia heliocéntrica media entre 30 y 55 unidades astronómicas. Igualmente han permitido el estudio de varias decenas de asteroides del cinturón principal, especialmente de los asteroides de tipo

espectral primitivo y de cometas de los que se han podido determinar tamaños, albedos, propiedades térmicas y composición del polvo superficial. Desde el año 2009 el IAA-CSIC viene utilizando datos del observatorio espacial infrarrojo Herschel (ESA-NASA) junto con datos de WISE (a 11.6 y 22.1 micras) y Spitzer-MIPS (a 24 y 70 micras) para poder aplicar modelos térmicos y termofísicos a 130 TNOs y centauros. Así se obtienen diámetros y albedos de



todos estos objetos. Los datos de Spitzer-MIPS algunos de los datos son de publicaciones pero otros son datos no publicados pero reanalizados expresamente para el proyecto de investigación que desarrolla la comunidad española.

Hubble Space Telescope

El telescopio espacial Hubble (NASA) se lanzó en 1990 y desde entonces ha proporcionado a la comunidad científica mundial las mejores y más espectaculares imágenes del Universo en múltiples longitudes de onda, desde el UV hasta el IR cercano gracias a la variedad de instrumentos que ha alojado a lo largo de estos 23 años. En el caso del estudio del Sistema Solar, el principal uso que la comunidad española hace de este observatorio se refiere a la adquisición de imágenes (i) de las atmósferas planetarias para analizar sobre todo la dinámica (nubes, tormentas, manchas, cinturones, evolución impactos de cometas en ellas, etc), la composición y estructura térmica, y (ii) del coma de gas y polvo que rodea a los núcleos cometarios cuando estos se tornan activos por su proximidad al Sol para así poder deducir estado rotacional, composición, heterogeneidad superficial, presencia de zonas activas (o bolsas de hielo de agua), etc.

Archivo de Herschel Space Observatory

El telescopio espacial Herschel (ESA) se lanzó al espacio el 19 de mayo del 2009 y terminó su vida operativa el 29 de Abril 2013. Es un telescopio submilimétrico de 3.5 m de abertura con tres instrumentos (dos fotómetros/espectrómetro de baja resolución y un espectrómetro de alta resolución espectral) que ha observado el cielo bajo el paraguas de la temática de la química en nuestra galaxia y la química molecular de las atmósferas de planetas, cometas y satélites. La comunidad española ha participado en la explotación científica de Herschel a través de dos programas: uno para medir la radiación térmica de los objetos transneptunianos y otro para estudiar la presencia de agua y química oxidante relacionada en los planetas del Sistema Solar. El archivo de datos de HSO públicos permitirá a otros grupos ahondar en esos temas y en otros (como por ej., detección de nuevas especies en las atmósferas planetarias).

Base de datos de Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE)

WISE (NASA), lanzado al espacio el 14 de diciembre del 2009, es un telescopio espacial de 40 cm de abertura y está diseñado para

tomar imágenes del cielo a cuatro longitudes de onda: 3.4, 4.6, 12 y 22 micras. El campo de visión es de 47 minutos de arco (1.5 veces el diámetro de la Luna). La misión será descubrir los objetos nunca antes vistos, incluyendo las estrellas más frías, las galaxias más luminosas del universo y 157000 cuerpos pequeños del Sistema Solar. Entre estos últimos distinguimos asteroides cercanos a la tierra (NEAs), asteroides del cinturón principal, cometas, troyanos de Júpiter, centauros y objetos transneptunianos (TNOs). La comunidad española hace uso principalmente de observaciones de asteroides, cometas y cometas en el cinturón de asteroides. La información que se obtiene en el IR, complementada con la del visible y otras regiones espectrales, ayuda a determinar la composición superficial y subsuperficial objeto en cuestión y a determinar tamaños, albedos y propiedades como la inercia térmica de las diversas poblaciones y familias colisionales de pequeños cuerpos. Gracias a la tecnología de última generación, la sensibilidad de WISE es cientos de veces mayor que su predecesor, IRAS, que operó en 1983 y ha permitido obtener datos de unos 150.000 asteroides (casi dos órdenes de magnitud más que IRAS).

4.2.3. Laboratorios en tierra

- Túnel de viento en el INTA para simular y estudiar el régimen de vientos en Marte con el fin de ayudar a la explotación científica de REMS y elaboración de modelos numéricos sobre circulación atmosférica.
- Cámaras de simulación de ambientes planetarios en el CAB.
- Laboratorio para preparar e irradiar hielos de interés astrofísico a los que posteriormente se les tomarán espectros en el IR. Con ello se pretende crear una base de datos que servirá de comparación con espectros tomados a objetos transneptunianos para así poder acotar los posibles hielos presentes en las superficies de éstos. Esta instalación se encuentra en la Universidad Politécnica de Valencia.
- IAA-Cosmic Dust Laboratory (IAA-CODULAB) que se ha diseñado, desarrollado en España, y que permite uso científico no solo a la comunidad española sino a la internacional. En él se miden todos los elementos de la matriz de dispersión de material presente en el Sistema Solar, desde cenizas volcánicas hasta partículas de polvo que se consideran análogos marcianos. De forma especial se ha de mencionar que este laboratorio está creando la base de datos para la calibración de la unidad de dispersión de luz (Light Scattering Unit) del proyecto ICAPS, - Interactions in Cosmic and Atmospheric Particle Systems Light Scattering - de la ESA destinado a la ISS (International Space Station).
- En el ICE (CSIC-IEEC) y en la UPC existen complejos laboratorios con microscopios Raman, de electrones, de energía dispersiva en rayos X, transmisión de electrones, o espectrómetros de masa así como de radiación UV y visible para el estudio de meteoritos, y material asteroidal y polvo cometario. También, existen cámaras de ultraalto vacío, microbalanzas de cuarzo y se determina el tamaño de los cóndrulos que forman el material meteorítico con interferometría de láser doble. Como una estrategia de futuro, estos laboratorios formarán parte de aquellos que analizarán las muestras de material extraterrestre asteroidal y marciano) que misiones como MarcoPolo-R o Mars Sample Return podrían traer a la Tierra.
- En la UPV/EHU el Grupo de Ciencias Planetarias dispone de un local para ensayos y calibración de elementos ópticos y de un observatorio astronómico para prueba de diferentes instrumentos.

4.2.4. Misiones espaciales no en operación

Archivo de datos (Planetary data system, NASA). Misiones Mariner 10, Galileo y Voyager I y II

El archivo PDS distribuye los datos científicos de las misiones planetarias de NASA, observaciones astronómicas de telescopios espaciales y mediciones de laboratorio. El archivo PDS es patrocinado por el Directorado de Misiones Científicas de la NASA. Su finalidad es asegurar la facilidad de uso a largo plazo de datos de la NASA y de estimular

la investigación avanzada una vez que las misiones han terminado y los períodos de propiedad científica de los datos ha expirado. Imágenes de la superficie de Mercurio y de los satélites helados de Júpiter, Saturno y Neptuno, adquiridas por las cámaras a bordo de las misiones arriba citadas están sirviendo para el estudio geomorfológico (especialmente de fallas) de los planetas y satélites y así poder determinar el flujo térmico desde el interior del mismo. Este flujo térmico

lleva impresa información sobre la composición radiactiva del material, sobre la compactación del mismo, sobre los procesos de enfriamiento y contracción, sobre los efectos de marea ejercidos por los planetas (en el caso de estudiar los satélites), etc. Además este archivo se ha empleado con profusión para el estudio de la dinámica atmosférica y estructura nubosa de Venus (nave Galileo) y de Júpiter (Galileo, Voyager 1 y 2) y Saturno (Voyager 1 y 2).

4.2.5. Misiones espaciales operativas (por orden de lanzamiento)

Casini-Huygens (NASA-ESA)

Representa la mayor cooperación entre agencias espaciales para la exploración del Sistema Solar. La misión consta de un orbital (Cassini) a Saturno responsabilidad de la NASA y de un módulo de descenso (Huygens) en la atmósfera de Titán responsabilidad de la ESA. La sonda Huygens entró en la atmósfera del satélite y aterrizó en su superficie el 5 de enero del 2005. El orbital sigue explorando Saturno, sus anillos y sus satélites hasta septiembre del 2017 (lo que se ha llamado Cassini Solstice Mission ya que el solsticio de verano de Saturno ocurrirá en mayo del 2017). Tras haber completado su vida nominal de 4

años en junio de 2008, la primera extensión, llamada Cassini Equinox Mission, finalizó en septiembre de 2010. El IAA tuvo participación directa en la explotación de los datos adquiridos por la sonda Huygens. El uso que la comunidad científica española ahora está haciendo de datos de instrumentos del orbital Cassini es a través de colaboraciones con el IP del instrumento VIMS (Visible and Infrared Mapping Spectrometer) para analizar la composición atmosférica de Saturno o de Titán, para estudiar la dinámica de nubes en Saturno (junto con las imágenes multiespectrales proporcionadas por el instrumento ISS), o la actividad criovolcánica de Encelado.

SABER-TIMED (NASA)

El instrumento Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) es uno de los cuatro a bordo del satélite TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics Dynamics) de la NASA. El objetivo principal del experimento SABER es proporcionar los datos necesarios para avanzar en nuestra comprensión de los procesos fundamentales que rigen la energética, química, dinámica, y el transporte en la mesosfera y la termosfera inferior. SABER logra esto con las medidas globales de la atmósfera con un radiómetro IR con 10 canales de banda ancha que cubren un intervalo espectral

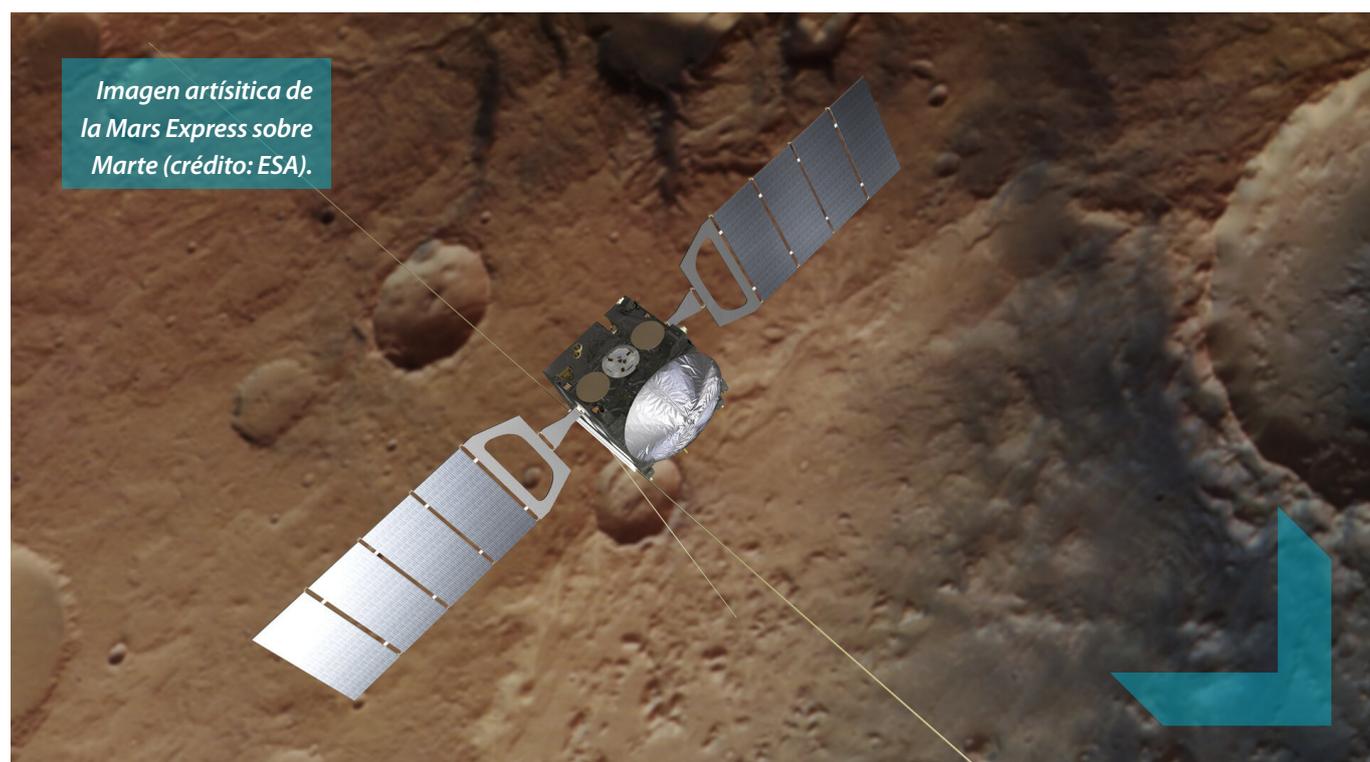


Imagen artística de la Mars Express sobre Marte (crédito: ESA).

de 1,27 micras a 17 micras. Estas mediciones se utilizan para proporcionar perfiles verticales de la temperatura cinética, presión, altura geopotencial, razones mezcla de los elementos minoritarios como O_3 , CO_2 , H_2O , $[O]$ y $[H]$, las tasas de emisión a en el IR de compuestos como NO , OH , y O_2 , y tasas de enfriamiento y calentamiento para bandas de CO_2 , O_3 , y O_2 , así como tasas de calentamiento mediante reacciones químicas importantes en la alta atmósfera terrestre. Investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) son coinvestigadores del instrumento SABER y han desarrollado gran parte de los códigos de inversión de las radiancias en parámetros atmosféricos. Por tanto, tienen acceso directo a los datos de este y participan activamente en el análisis de las medidas. El satélite se lanzó el 7 de diciembre de 2001. Orbita circularmente a 625 km de la superficie terrestre y NASA ha aprobado su operación hasta 2015.

MARS Express (ESA)

Esta misión a Marte se lanzó el 2 de junio de 2003 y aún sigue operativa. La instrumentación a bordo de la nave está permitiendo tener un mapa de la superficie a muy alta resolución (10 m/píxel y 2 m/píxel) para hacer un estudio geológico de la misma, algo que se está llevando a cabo a partir del archivo de datos liberados. También, científicos españoles están accediendo a datos (bien ya liberados bien a través de colaboraciones con los IP de los instrumentos) para cartografiar la composición de la atmósfera y determinar su circulación global, para determinar el efecto de la atmósfera en la superficie, así como la interacción de la atmósfera con el viento solar.

ROSETTA (GIADA y OSIRIS)

Rosetta (ESA) se aprobó en noviembre de 1993 como una de las últimas misiones cornerstone de la ESA. El objetivo de la misión es estudiar en detalle el interior, la superficie, inicio y evolución de la actividad de un cometa. El blanco de esta era el cometa 46 P/Wirtanen. Sin embargo, el lanzamiento (por un cohete Ariane 5 G+) tuvo que aplazarse y el objetivo pasó a ser el cometa 67 P/Churyumov-Gerasimenko. En su viaje de 10 años hacia el cometa, la nave ha pasado por dos asteroides: 2867 Steins (en 2008) y 21 Lutetia (en 2010). La nave entró en modo de hibernación 2011 y se mantendrá en este estado el 20 de enero 2014, cuando se inicia la secuencia de salida de la hibernación. España, específicamente el IAA, el INTA y la UPM, han contribuido con unidades y subunidades importantes de dos instrumentos: OSIRIS – sistema de cámaras de alta (NAC) y media (WAC) resolución espacial equipadas con filtros específicos para estudiar la mineralogía de la superficie cometaria y para la composición del coma gaseoso– y GIADA –para el estudio de la masa y velocidad, o sea, del momento del polvo cometario. El retorno científico, tanto de OSIRIS como de GIADA están garantizados. Se lanzó el 2 de marzo de 2004, y a partir de agosto de 2014 hasta finales de diciembre de 2015, la nave Rosetta se convertirá en un satélite artificial del núcleo cometario con cuyos 11 instrumentos en el orbital y 10 en el módulo de aterrizaje Philae proporcionará la más exhaustiva información jamás obtenida de un objeto primitivo del Sistema Solar así como de los factores que desencadenan su actividad, la evolución de la misma, los

efectos sobre la rotación del núcleo, la composición de éste, estructura interior, porosidad, proporción de hielo y roca, etc.

Venus Express (ESA)

Venus Express es la primera misión de la ESA al planeta más cercano a la Tierra, Venus. La misión nació después de que la ESA solicitara propuestas en marzo de 2001 que pudieran reutilizar el diseño de la nave espacial Mars Express, los mismos equipos industriales y estar lista para lanzar en el 2005, como así ocurrió. La misión estará operativa hasta el 31 de diciembre de 2016. Habrá así disfrutado la comunidad científica de 11 años de estudio detallado de la atmósfera de Venus. Científicos españoles participan en el análisis de datos de VIRTIS en el visible e infrarrojo térmico para determinar la composición y estructura térmica, y de imágenes de la cámara VMC para determinar la circulación atmosférica, con especial interés en la determinación de los mecanismos que detonan la superrotación de la atmósfera.

Mars Science Laboratory (NASA)

La misión Mars Science Laboratory es parte del Programa de Exploración de Marte de la NASA, un esfuerzo a largo plazo de exploración robótica del planeta rojo. El explorador Curiosity se diseñó para evaluar si Marte alguna vez tuvo un ambiente capaz de soportar formas de vida. En otras palabras, su misión es determinar la potencial habitabilidad del planeta rojo. Para averiguarlo, el rover lleva tres cámaras, cuatro espectrómetros, dos detectores de radiación, un sensor atmosférico y un sensor ambiental cuya institución IP es el CAB. El instrumento, llamado REMS

Rover Environmental Monitoring Station, medirá y proporcionará diariamente la presión atmosférica, humedad, radiación UV en la superficie, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y temperatura del suelo marciano alrededor de la localización del rover. El rover analizará muestras recogidas de la tierra y perforará las rocas para ello. El registro del clima y la geología del planeta está esencialmente "escrito en las rocas y el suelo" —en su formación, estructura y composición química—. El laboratorio que constituyen los instrumentos a bordo del rover estudiará rocas, el suelo y el entorno geológico local, a fin de detectar los componentes químicos de la vida (por ejemplo, formas de carbono) en Marte y evaluará como el ambiente marciano fue en el pasado. La misión Mars Science Laboratory se lanzó desde Cabo Cañaveral el 26 de noviembre de 2011, siete meses después (6 agosto de 2012) aterrizó con éxito en la base del cráter Gale. La vida nominal de la misión es de 23 meses desde el momento del aterrizaje.

Messenger (NASA)

Esta misión a Mercurio se lanzó el 3 de agosto de 2004. Tras siete años de viaje interplanetario, en marzo del 2011 comenzó un año (de Mercurio) de exploración del planeta. Previas misiones a Mercurio solo habían podido tomar imágenes del 50 % de la superficie del planeta. Científicos e ingenieros han invertido casi dos décadas en desarrollar nuevas técnicas y diseñar una nave especial capaces de sobrevivir las extremas condiciones (por su cercanía al Sol) existente en Mercurio. Aunque España no participa de forma directa en esta misión, el archivo de datos de dos



instrumentos (MDIS – cámara, y MLA – altímetro) está siendo usado por físicos y geólogos españoles para estudiar la profundidad de las fallas existentes sobre la superficie y a partir de ahí conocer el flujo térmico desde el interior del planeta, la abundancia de elementos radiactivos en el manto, el grosor del regolito, etc.

MIPAS/ENVISAT (ESA)

MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) es un interferómetro de Michelson a bordo de la misión ENVISAT de ESA. Forma parte, junto a SCIAMACHY y GOMOS de los 3 instrumentos de observación de la atmósfera terrestre. MIPAS mide (media) la emisión atmosférica en 5 bandas cubriendo todo el infrarrojo medio (4.15-14.6 μm) con una altísima resolución espectral (0.035 cm^{-1}). Utilizaba un barrido tangencial con un muestreo de 3-5 km en un rango de alturas que cubre desde la superficie hasta la termosfera (170 km). De esta forma, y dada su alta sensibilidad, MIPAS ha permitido las medidas de la concentración de un gran número de compuestos (más de 30), además de la presión y temperatura, con una

cobertura latitudinal completa (de polo a polo) y en un rango de alturas muy extenso (desde 6 km hasta la mesosfera y termosfera, dependiendo del compuesto).

Los objetivos iniciales de MIPAS son: a) el estudio de la química del ozono y la dinámica estratosférica; b) el estudio del intercambio troposfera/estratosfera; c) contribuir a los estudios del clima con la medida de la mayor parte de los gases de efecto invernadero, además del vapor de agua y la temperatura; y d) el estudio de la estructura, composición y balance energético de la alta atmósfera.

MIPAS se lanzó en el mayor satélite de estudios atmosféricos lanzado hasta ahora, ENVISAT, situado en una órbita heliosíncrona polar (98.55°), a 860 km, a las 10 am del nodo descendente y un periodo de 100.6 min. ENVISAT se lanzó en marzo de 2002 y ha estado operativo hasta abril de 2012.

Investigadores del IAA han dedicado un gran esfuerzo en este instrumento en la última década. Participando desde el inicio en el SAG (Scientific Advisory Group) y después en el ST (Science Team) y actualmente en el QWG (Quality Working Group). Han participado en la calibración y validación de los espectros de MIPAS, en el desarrollo de algoritmos de inversión en no-ETL (responsables de los productos NO_2 , NO y CO del modo nominal; y de la presión y temperatura, O_3 , H_2O , NO_2 , NO , CO , H_2O , PMCs y CO_2 de los modos de media y alta atmósfera). Han realizado también una gran cantidad de estudios de análisis de los datos abarcando aspectos como el efecto de las partículas solares sobre la composición atmosférica y la variabilidad de la dinámica y química atmosférica a lo largo de un ciclo solar.

5. Grandes proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro



5.1. El Sol y la Heliosfera

5.1.1. Instrumentos terrestres

EST (Telescopio Solar Europeo)

EST es en la actualidad el proyecto europeo de tierra más ambicioso. EST es un telescopio de 4 metros de diámetro especialmente diseñado para medir con alta precisión el campo magnético solar tanto en la fotosfera como en la cromosfera, con una resolución espacial sobre la superficie del sol de alrededor de 30 km. El proyecto finalizó su diseño conceptual a mediados de 2011 y está a la espera de poder completar ese diseño, antes de iniciar la fase de construcción. El consorcio EAST (European Association for Solar Telescopes), en el que participan las instituciones más relevantes europeas en el campo de la física solar de alta resolución, repartidas en quince países de Europa, fue creado en 2007 con la finalidad, entre otras, de diseñar y construir este telescopio de nueva generación e instalarlo en la Islas Canarias. Los objetivos científicos del proyecto fueron acordados unánimemente por el consorcio desde sus principios, lo que facilitó sobremedida los trabajos de diseño. Desde el principio, España ha tenido un papel muy relevante en esta iniciativa, presidiendo el consorcio desde su

creación hasta finales de 2012, y en el desarrollo de EST (coordinando los proyectos europeos EST y SOLARNET). Como país que albergará esta infraestructura, así como por el destacado papel de los investigadores españoles en el proyecto, es de esperar que España impulse EST hasta las últimas etapas de su desarrollo, con nuevas iniciativas tanto nacionales como europeas. Este año 2015 ha sido aprobado por la UE, dentro del programa H2020, el proyecto GREY (Getting Ready for EST) en el que intervienen 12 instituciones europeas. La participación española es destacada: el IAC lidera el proyecto y además cuenta con el INTA y el IAA. De 2015 a 2018, este proyecto pretende desarrollar un buen número de nuevas tecnologías críticas para la construcción del telescopio y su instrumentación.

DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope)

La comunidad científica española participa en el desarrollo del telescopio DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope), en Hawái, Estados Unidos, como consecuencia de la experiencia y prestigio adquiridos durante

los últimos decenios. Cuenta con un miembro en el comité científico asesor del telescopio desde el comienzo del proyecto y, recientemente, el IAA-CSIC ha firmado un convenio con el NSO americano para el desarrollo de instrumentación para DKIST.

*Telescopio Solar Europeo
(renderización; créditos EST-EAST)*



5.1.2. Infraestructuras espaciales

Solar Orbiter. Los instrumentos EPD y SO/PHI

La misión Solar Orbiter de la ESA/NASA es singular porque será la primera combinación de instrumentos de medida local y sondeo remoto que orbite alrededor del Sol con un perihelio aproximadamente igual al radio de la órbita de Mercurio (0.28 UA), elevándose, además, del plano de la eclíptica unos 28° en su fase nominal y 32° en su fase extendida.. Esta combinación de instrumentos y la órbita de la misión la hacen única tanto para el estudio de la heliosfera y los fenómenos que tienen lugar en ella, como del origen de los mismos en la fotosfera y cromosfera solares. La comunidad científica española se encuentra directamente implicada —y de forma destacada— en el desarrollo de esta misión: participa y lidera el desarrollo de dos de sus instrumentos, el detector EPD (Energetic Particle Detector) y el magnetógrafo SO/PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager for Solar Orbiter).

El instrumento EPD está formado por cuatro detectores (STEP, EPT, SIS y HET) de partículas (protones, electrones e iones pesados) que toman medidas in situ del viento solar, de las partículas energéticas solares y de los rayos cósmicos (desde pocos keV hasta centenares de MeV). EPD está siendo desarrollado por un consorcio internacional liderado por el Space Research Group (SGR) de la UAH, que coordina la participación de la University of Kiel (Alemania), Johns Hopkins University (USA) y la ESA, con la participación de las empresas española SENER-Aeroespacial y Airbus-CRISA.

SO/PHI es un nuevo magnetógrafo, heredero de IMAx tanto en su concepto como en las tecnologías utilizadas, dos de las cuales cualificadas específicamente para su uso espacial por el equipo español. Estas son el uso de retardadores ópticos de cristal líquido como moduladores de polarización y de un etalón sólido de Li NbO_3 . Está siendo desarrollado por un consorcio internacional coliderado por el instituto alemán MPS y el IAA-CSIC y en el que también participan los institutos KIS e IDA por parte alemana, el instituto IAS por parte francesa y los institutos españoles GACE-UV, IAC, IDR-UPM, INTA y UB. Su objetivo es obtener un cartografiado del vector campo magnético y de la velocidad a lo largo de la línea de visión del plasma solar. El proyecto cuenta con una muy importante contribución industrial española de las empresas Lidax, C.A. Asociados, SENER Aeroespacial, Airbus-CASA y Activa.

Los instrumentos han pasado las revisiones de diseño crítico, punto de partida para la fase de fabricación, previa a la entrega a la ESA para su integración con la plataforma. Tras el lanzamiento en octubre de 2018 y una fase de vuelo de unos dos años y medio en que la actividad será reducida y concentrada en determinadas etapas de cotejo y calibración, comenzarán las operaciones científicas alrededor de 2021. Para entonces, la competencia de los investigadores españoles habrá de haberse optimizado, no ya solo para la explotación singular de cada uno de los instrumentos españoles sino para utilizar la sinergia entre ambos que permita sacar el máximo partido

posible a la misión. Las operaciones se extenderán típicamente otros dos o tres años más y la explotación de los datos estimamos que pueda extenderse hasta 2026 o 2027. En este sentido, los grupos españoles están planificando sus próximos proyectos científico-tecnológicos (teóricos, observacionales y de simulación) teniendo en cuenta el objetivo de alcanzar unos recursos humanos suficientes que conduzcan a dicha optimización. Para ello es fundamental, como mínimo, mantener las capacidades existentes en los grupos españoles, ya que los especialistas en la explotación de toda esta información son pocos y muy buscados.

Solar C

Solar C es la próxima misión solar en la que la comunidad científica está interesada en implicar a las tres agencias espaciales principales, JAXA (que actuaría como líder), NASA y ESA. Se pretende poner en órbita un telescopio solar visible y ultravioleta de 1,4 m de diámetro (SUVIT), otro de rayos X y un tercero en el ultravioleta extremo. El interés de la comunidad española radica fundamentalmente en la instrumentación posfocal de SUVIT en la que no sólo está bien posicionada para participar por prestigio científico sino también tecnológico. De hecho, el consorcio español que ha participado y participa en Sunrise y Solar Orbiter se encargaría de toda la electrónica del espectropolarímetro visible y de los cristales líquidos y otros dispositivos electrónicos programables del filtrógrafo. Se trataría, pues, de una participación consecuencia del éxito de las inversiones anteriores del Plan Estatal de I+D+i.

5.2. Planetología

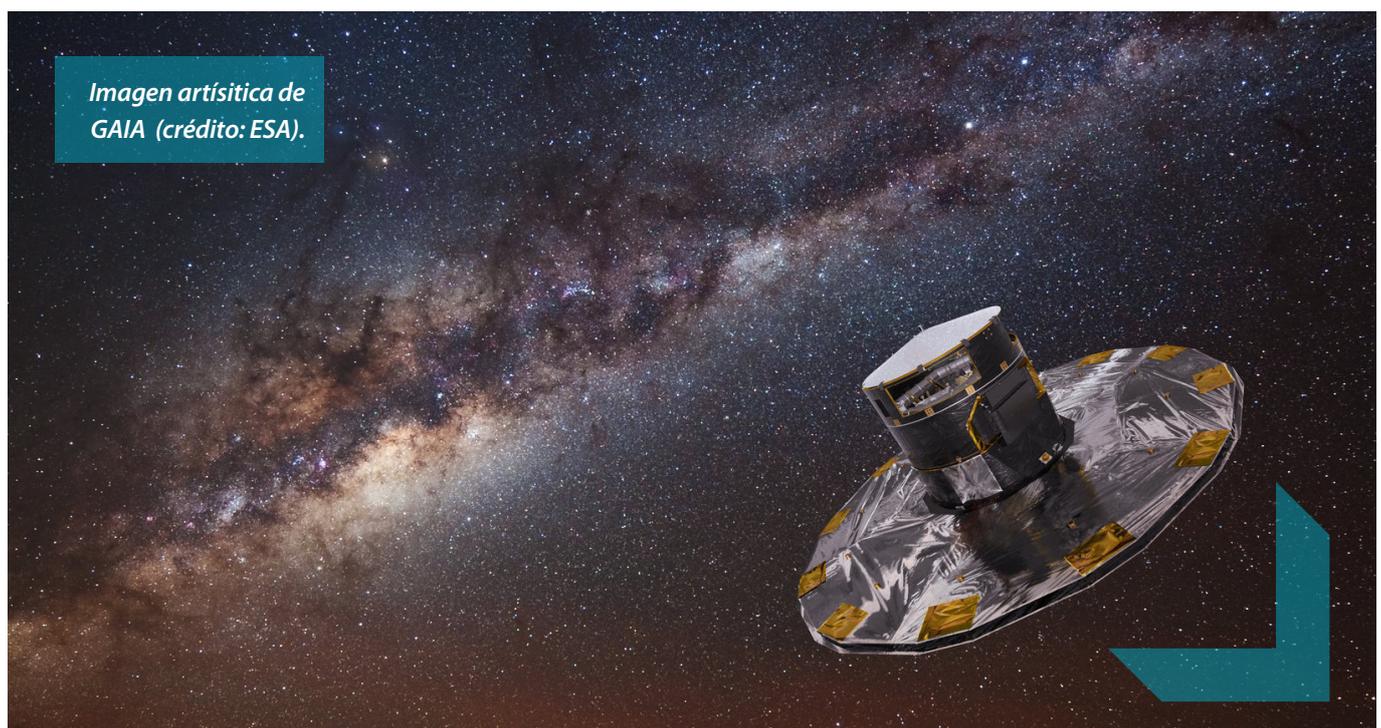
5.2.1. Infraestructuras espaciales

GAIA (ESA)

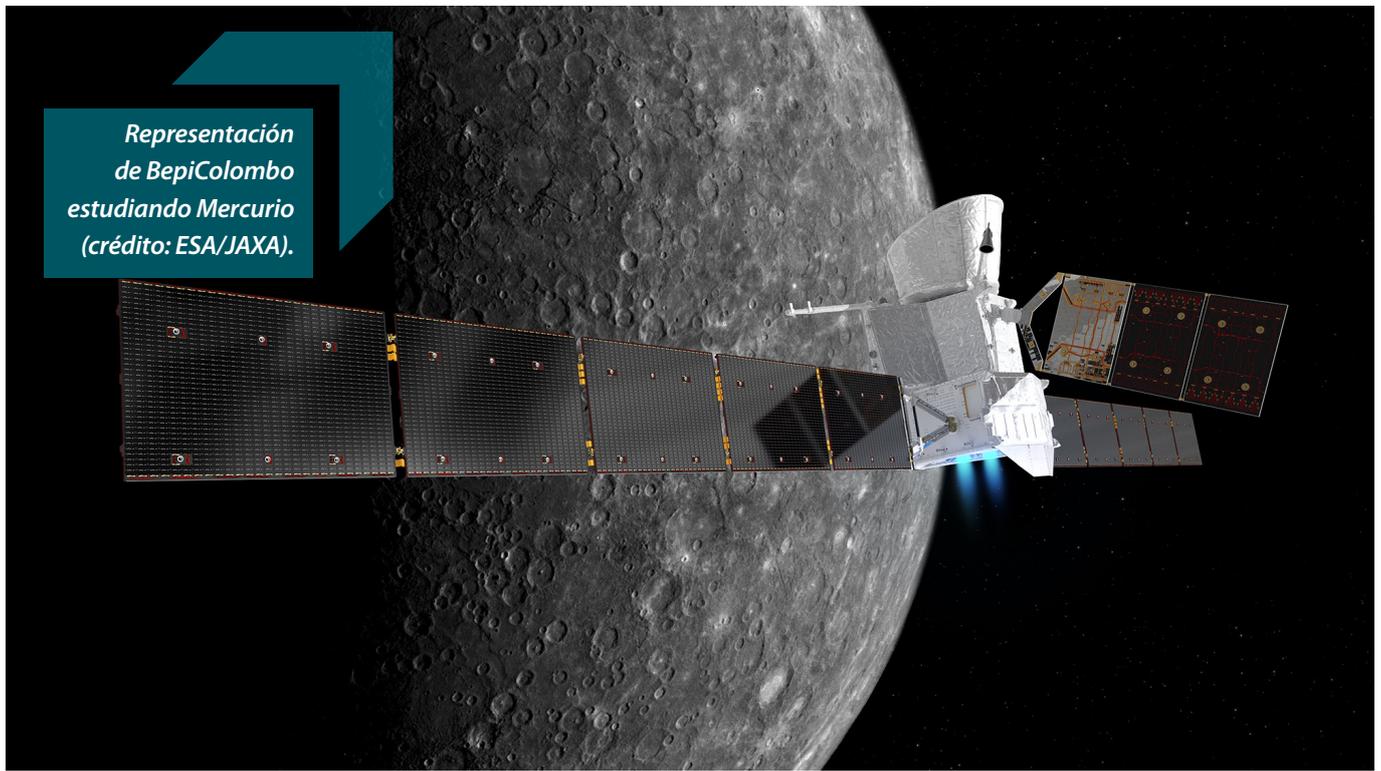
Esta misión tiene el ambicioso objetivo de hacer un mapa tridimensional de nuestra galaxia, la Vía Láctea, permitiendo así conocer la composición, formación y evolución de la misma. GAIA proporcionará medidas de posición y velocidad radial con tal exactitud que se podrá crear un censo estereoscópico y cinemático de aproximadamente mil millones de estrellas. GAIA se aprobó en el año 2000 como una misión cornerstone de la ESA, se lanzará en el 2013 y tiene una vida nominal de cinco años. La carga científica

es un único instrumento: un telescopio doble compartiendo banco óptico y plano focal con 106 CCDs. Las funciones de este instrumento son realizar astrometría, fotometría entre 320 y 1000 nm, y espectrometría de alta resolución entre 847 y 874 nm. Aunque no es una misión de exploración del Sistema Solar, mientras GAIA escruta la galaxia, en sus 106 CCDs no solo habrá información de estrellas, sino de los pobladores del Sistema Solar, especialmente cuerpos menores. La búsqueda de estos y de la información recabada

por GAIA se usará para caracterizar espectroscópicamente miles de asteroides, información que combinada con los datos de WISE representará un salto cualitativo gigantesco en el conocimiento de las diferentes poblaciones y familias de pequeños cuerpos del sistema solar. Igualmente permitirá mejorar las órbitas de decenas de miles de pequeños cuerpos y, entre otras cosas, permitirá mejorar las predicciones de ocultaciones de estrellas por estos objetos abriendo una puerta al estudio de sus tamaños y formas.



*Imagen artística de
GAIA (crédito: ESA).*



Representación
de BepiColombo
estudiando Mercurio
(crédito: ESA/JAXA).

Bepi-Colombo (ESA-JAXA)

BepiColombo (ESA-JAXA) consta de dos módulos, un orbital planetario, MPO, responsabilidad de la ESA y otro responsabilidad de la agencia espacial japonesa JAXA orientado a estudiar la magnetosfera de Mercurio. La misión proporcionará un gran avance en la comprensión del planeta más cercano al Sol y para ello hará un mapa completo de la superficie del planeta a diferentes longitudes de onda permitiendo así conocer la composición mineralógica y elemental. También será posible determinar si el interior del planeta es sólido o líquido e investigar el alcance y origen del campo magnético, algo que se presenta como una de las mayores incógnitas sobre Mercurio. El módulo planetario consta de 11 instrumentos. España (IAA y CAB, respectivamente) ha contribuido con hardware a dos de ellos: BeLA, el primer altímetro láser

europeo a bordo de una misión interplanetaria y un espectrómetro de rayos X, MIXS. El lanzamiento de la misión a cargo de un cohete Ariane tendrá lugar durante 2015. Tras siete años de viaje interplanetario, en 2022 entrará en órbita alrededor de Mercurio para explorarlo durante uno (misión nominal) o dos años (misión extendida).

Programa ExoMars (ESA-Russian Federal Space Agency)

El programa ExoMars volará dos misiones, en 2016 y 2018, en una asociación entre la ESA y la agencia espacial rusa, Roscosmos. Su principal objetivo es dar respuesta a una de las preguntas científicas sobresalientes de nuestro tiempo: ¿ha existido la vida en Marte? Además, ExoMars permitirá a Europa el desarrollo de nuevas capacidades técnicas para el aterrizaje, desplazamiento

sobre la superficie, la perforación y la preparación de muestras para allanar el camino para una futura misión de retorno de muestras de Marte en la década de 2020.

La primera misión se pondrá en marcha en el año 2016, e incluirá el Trace Gas Orbiter (TGO) para buscar indicios de metano y otros gases atmosféricos que podrían ser signos de procesos biológicos o geológicos activos. España participa como Co-PI en el instrumento SOIR-NOMAD y proporciona toda la electrónica del instrumento. SOIR-NOMAD es un espectrómetro que mide la composición química de la atmósfera de Marte con una precisión sin precedentes. Esto dará más datos sobre el origen del metano recientemente descubierto y puede ayudar a proporcionar una respuesta a la pregunta de si hay o no vida en el planeta. El conocimiento sobre el vapor de agua y

ozono (entre otras cosas) ayudará a los investigadores a entender mejor el clima, las estaciones y la habitabilidad del planeta.

Adicionalmente al instrumento SOIR-NOMAD, España aporta carga científica en el módulo de descenso, dentro de una estación meteorológica llamada DREAMS. La aportación española consiste en un medidor de irradiancia solar en la superficie del planeta, cuyo acrónimo es SIS.

El instrumento Raman-LIBS a bordo del módulo de aterrizaje del programa (2018) está desarrollado en España por el Centro de Astrobiología (CAB, INTA-CSIC) a nivel de PI. El instrumento Raman ofrece una herramienta poderosa para la identificación definitiva y caracterización de minerales y biomarcadores. La espectroscopia Raman es sensible a la composición y estructura de cualquier mineral o compuesto orgánico. Esta capacidad proporciona información directa de compuestos orgánicos potenciales que pueden estar relacionados con las firmas presentes o pasados de la vida en Marte, así como información mineralógica general para ígnea, metamorfosis y procesos sedimentarios, especialmente geoprocesos relacionados con el agua.

OSIRIS-Rex (NASA)

OSIRIS-Rex es una misión de NASA que forma parte del programa New Horizons y que está aprobada para volar en 2017 al asteroide primitivo (101955) Bennu al que estudiará in situ y del que tomará muestras de su superficie para su posterior estudio en Tierra. El grupo del IAC es parte del equipo científico de la misión.

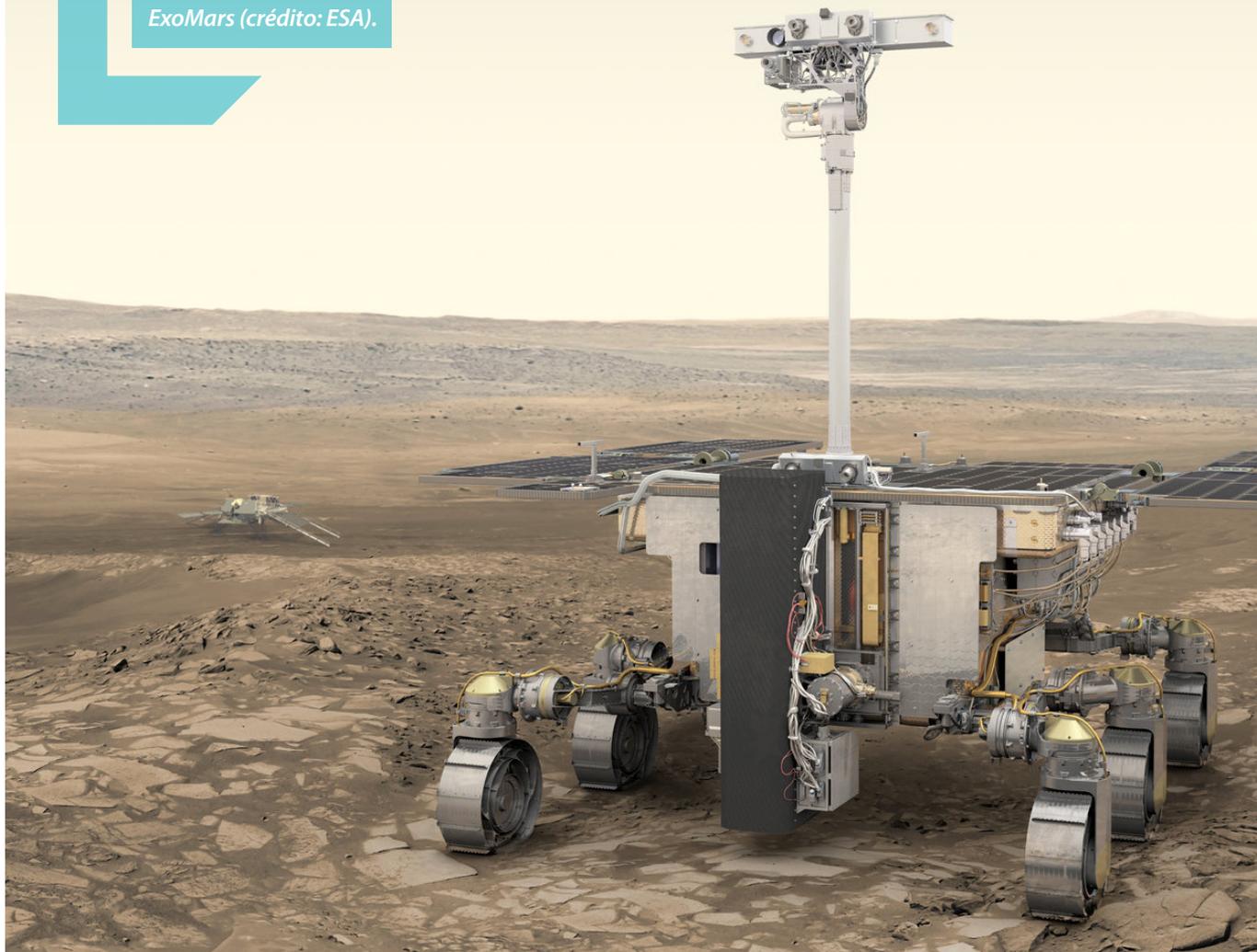
JUICE (ESA)

Esta misión al sistema de Júpiter es la primera selección de la ESA de una misión denominada "large", L1, dentro del programa Cosmic Vision 2015-2025, con lanzamiento previsto en el 2022 con un cohete Ariane 5 y llegada a Júpiter en 2030. La sonda espacial explorará las lunas heladas de Júpiter, así como el propio planeta gigante. JUICE (acrónimo de Jupiter Icy Moons Explorer) pasará por lo menos 3,5 años dentro del sistema joviano, investigando tres de los cuatro satélites galileanos: Ganímedes, Calisto y Europa así como la atmósfera de Júpiter. Se trata de una misión de caracterización de estos mundos de gran interés astrobiológico, pues en el interior de estos satélites hay océanos de agua líquida y

el agua es el ingrediente fundamental para la aparición de la vida. El lema de JUICE es explorar la emergencia de mundos habitables que orbitan planetas gigantes. Además abordará otras cuestiones científicas tan importantes como ¿cuáles son las condiciones para la formación de planetas y cómo funciona el sistema solar? España participó desde sus inicios allá por 2004 en la definición científica de la misión y, en la actualidad, ya con la instrumentación seleccionada, el IAA aporta subunidades y unidades de la cámara JANUS y del altímetro láser GALA, siendo Co-I en ambos instrumentos. Ambos instrumentos son complementarios desde el punto de vista científico ya que la cámara proporcionará, entre otros objetivos, un mapa global de Ganímedes a diferentes resoluciones espaciales y el altímetro láser dará información sobre la topografía del satélite. Europa, Calisto y la atmósfera de Júpiter serán investigados por la cámara, y por el altímetro láser los satélites solo. La UPV/EHU participa como Co-I del instrumento MAJIS, una cámara para espectro-imagen que cubre los rangos espectrales del visible y del infrarrojo próximo (hasta 5 micras).



Representación
artística del rover
ExoMars (crédito: ESA).



5.2.2. Colaboraciones con industrias nacionales e internacionales

Los desarrollos tecnológicos asociados a la exploración del Sistema Solar, tanto in situ (rovers), remota (instrumentos en naves espaciales y telescopios espaciales) y desde tierra, tienen una parte de diseño que habitualmente se lleva a cabo en las instituciones científicas con personal científico y tecnólogo en ellas, mientras

que la parte de fabricación ha de hacerse en una industria que tenga los estándares requeridos por la ESA para instrumentación espacial, o las capacidades para fabricar telescopios completos o instrumentos para ellos.

Las empresas con las que las instituciones mencionadas a lo

largo de este documento tienen colaboraciones habituales, colaboraciones cuasi-científicas (i.e., sin retorno económico para la empresa), consultorías técnicas o relaciones contractuales de gran cuantía económica son NTESENER, CRISA, ALTER-TECHNOLOGY, A-V-S, THALES-ALENIA, IDOM, LIDAX, TTI-NORTE y EMXYS.

6. Actualización en 2020 de esta sección¹

4.1.2. Infraestructuras espaciales:

Sunrise (pág. 122)

La segunda edición de la misión Sunrise tuvo lugar, en efecto, en junio de 2013. A fecha de diciembre de 2019, el consorcio prepara una tercera edición, cuyo lanzamiento está previsto para el verano de 2022. En esta ocasión, tan sólo el telescopio continúa. La barquilla y el sistema de navegación y apuntado así como la instrumentación posfocal son totalmente nuevas. El consorcio español es responsable de un nuevo magnetógrafo, IMAx+, y de la electrónica, las cámaras, el software y el segmento terreno de un espectropolarímetro infrarrojo que se desarrolla en colaboración con colegas japoneses.

CLASP (pág 123 -adición)

El 3 de septiembre de 2015 y el 11 de abril de 2019 se realizaron con gran éxito dos experimentos espaciales mediante un telescopio y un espectropolarímetro lanzados con cohetes suborbitales de la NASA. El Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP) midió la variación con la longitud de onda de la intensidad (Stokes I) y polarización lineal (Stokes Q y U) de la radiación emitida por regiones en calma del disco solar en la línea Lyman-alpha del hidrógeno alrededor de 1215 Angstroms. Por su parte, el Chromospheric Layer Spectro-Polarimeter.

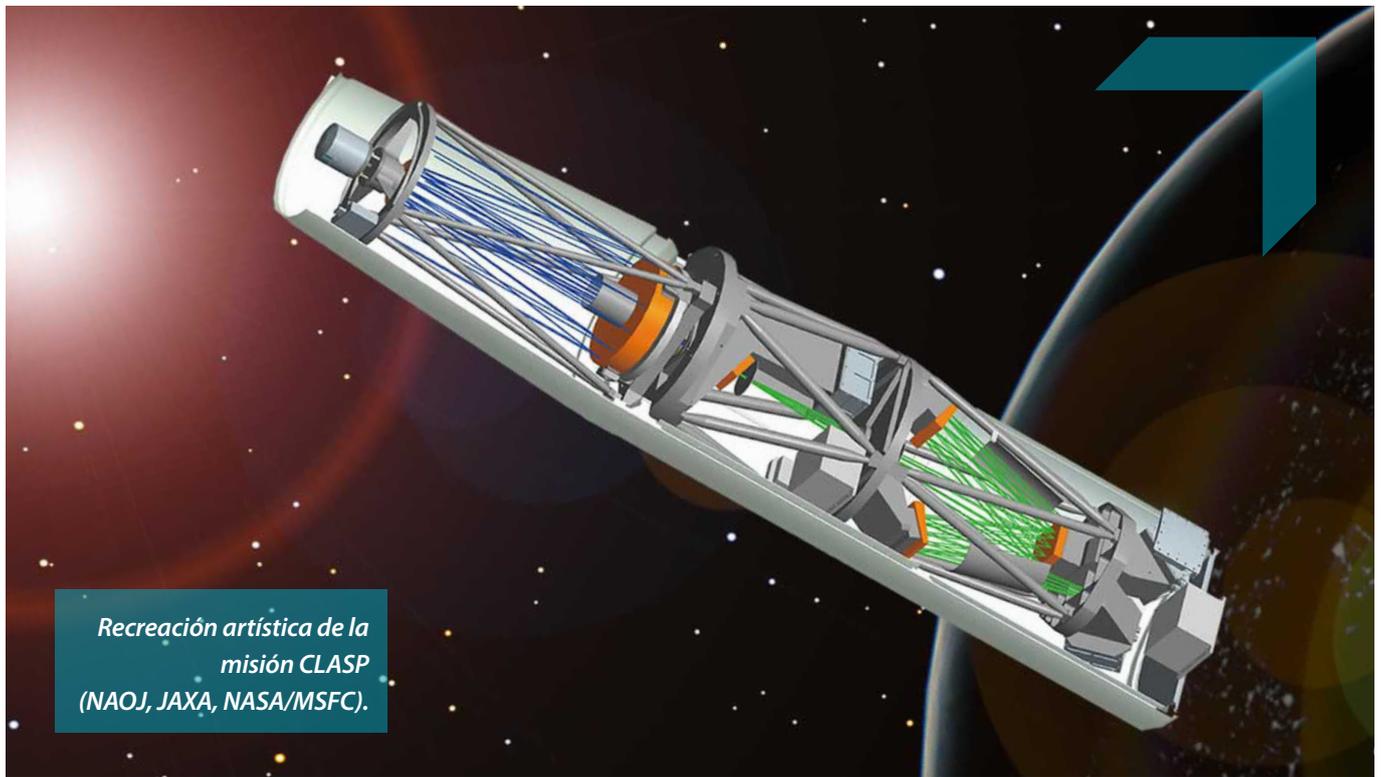
(CLASP-2) midió con alta resolución espectral la intensidad, la polarización lineal y la polarización circular (Stokes V) de la radiación emitida tanto por regiones en calma como activas en las líneas resonantes (h y k) del magnesio ionizado alrededor de 2800 Angstroms. Ambos experimentos fueron motivados por investigaciones teóricas realizadas en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y se llevaron a cabo a través de un consorcio internacional liderado por el Marshall Space Flight Center de NASA, el Observatorio Astronómico Nacional japonés, el Instituto de Astrofísica Espacial francés y el propio IAC.

Cada uno de tales experimentos constituye un hito en la astrofísica, pues es la primera vez que se han logrado observar las relativamente débiles señales de polarización producidas por la acción conjunta de los procesos de dispersión y los efectos Hanle y Zeeman en tales líneas del espectro ultravioleta del Sol. Los fotones del centro de las líneas espectrales Lyman-alpha y Mg II h & k provienen de las capas más externas de la cromosfera solar, muy cerca de la base de la extremadamente caliente corona, mientras que los fotones de las extensas alas de tales líneas resonantes provienen de las capas subyacentes. Los efectos Hanle y Zeeman requieren la acción de un campo magnético, por lo

que la polarización medida en tales líneas espectrales contiene información sobre el campo magnético en toda la cromosfera solar. El efecto Hanle, al operar solo en el centro de los perfiles Q y U de Lyman-alpha y Mg II k, proporciona información sobre el magnetismo y geometría del plasma en la región de transición entre la cromosfera y corona. En las líneas h y k del Mg II el efecto Zeeman produce señales de polarización circular medibles que provienen de la alta cromosfera solar. Es también de gran interés notar que en las alas de los perfiles Q y U, tanto de Lyman-alpha como de Mg II h & k, los efectos magnetoópticos resultantes del efecto Zeeman introducen una clara sensibilidad a la presencia de campos magnéticos en la cromosfera y fotosfera.

Las observaciones espectropolarimétricas logradas con CLASP y CLASP-2 confirmaron de forma espectacular las predicciones teóricas, lo cual es importante porque valida la teoría cuántica sobre la generación y transferencia de radiación polarizada en líneas resonantes para las que los efectos de correlaciones entre los fotones absorbidos y emitidos en los procesos de dispersión son relevantes. Los datos de CLASP indican que la geometría de la región de transición entre la

¹ La revisión de esta sección, además del panel de autores que figura en la portada, ha contado con la colaboración de Javier R. Pacheco (UAH). Correcciones menores como erratas o similares han sido realizadas directamente sobre el texto original. Los autores de esta actualización y los editores del estudio han optado por describir aquí de nuevo algunos de los proyectos mencionados anteriormente añadiendo su evolución en los últimos años. Se ha hecho de forma autoconsistente, por lo que en la actualización de estos proyectos se repite parte de la descripción original.



Recreación artística de la misión CLASP (NAOJ, JAXA, NASA/MSFC).

cromosfera y corona es mucho más compleja que la de los modelos actuales. Por su parte, CLASP-2 ha logrado determinar el campo magnético en la alta cromosfera de una región activa. Actualmente, el equipo está trabajando para realizar un tercer experimento (CLASP-3) y estudiando la posibilidad de una misión espacial para investigar la alta cromosfera solar mediante observaciones espectropolarimétricas en líneas del espectro ultravioleta.

Instrumentación espacial heliofísica (pág. 124)

La misión Lagrange de la ESA, perteneciente a su programa Space Safety, es la primera misión europea íntegramente dedicada al tiempo espacial. Proporcionará información valiosísima para entender la ciencia heliosférica. Embarcará instrumentación en la que la comunidad española está altamente interesada, como es el caso del magnetógrafo solar.

4.1.3. Modelos numéricos relevantes para la heliofísica. Transición a operaciones (pág. 125):

El éxito del inversor electrónico de la ecuación de transporte radiativo para Solar Orbiter, ha llevado al IAA a diseñar INFACT (Inversion Factory) para el telescopio americano DKIST y una versión más general y versátil en GPU para el telescopio europeo EST.

4.2.1. Instrumentos terrestres:

Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) y del Teide (OT) (pág. 126)

El ORM y el OT son propiedad y son operados por el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). España es dueña de tres telescopios habitualmente utilizados por la comunidad de Sistema Solar en dichos observatorios: el 10.4 m Gran Telescopio Canarias (GTC) en

el ORM y el 1.5 m Telescopio Carlos Sanchez (TCS) y el 0.8 m IAC-80 en el OT. El primero cuenta con instrumentación para imagen y espectroscopía en el visible (OSIRIS, MEGARA fundamentalmente espectroscopía) y para imagen, polarimetría y espectroscopía en el infrarrojo medio (Canaricam). Canaricam es de especial interés para la investigación en el Sistema Solar dado que es un rango donde los objetos fríos destacan y hay muy poca instrumentación en el mundo de sus características. EMIR es el nuevo instrumento para imagen y espectroscopía en infrarrojo próximo.

Detalles sobre la instrumentación de GTC en:

<http://www.gtc.iac.es/instruments/instrumentation.php>

El tiempo de observación en el GTC se distribuye a través del Comité de Asignación de Tiempo (CAT) nocturno, constituido por

astrofísicos españoles de probada cualificación y de diversas áreas (excluidos los solares, ver <http://www.iac.es/cat/pages/cat-nocturno/es/solicitando-tiempo/miembros-del-cat-nocturno.php>). Por otro lado el TCS y el IAC-80 son telescopios de propiedad del IAC y su uso en este momento es asignado por un comité interno del instituto y están disponibles para investigadores del IAC desde mitad de 2012. Con anterioridad, el tiempo en el TCS y el IAC-80 era distribuido por el CAT. El cambio producido en 2012 ha limitado el acceso a varios grupos que los utilizaban habitualmente.

En virtud de los Acuerdos Internacionales en materia de Astrofísica, España también tiene acceso al 20 % del tiempo de observación disponible en los telescopios extranjeros ubicados en los observatorios del Roque de los Muchachos y del Teide. Este tiempo de observación también se distribuye a través del CAT. Entre los telescopios que la comunidad de Sistema Solar utiliza habitualmente se encuentran el 4.2 m William Herschel Telescope (WHT) y el 2 m Isaac Newton Telescopes (INT), el 3.5 m Telescopio Nazionale Galileo (TNG), el 2.5 m Nordic Optical Telescope (NOT) y el 2.0 m Liverpool Telescope (LT).

El WHT y el INT son telescopios operados por el consorcio Isaac Newton Group of Telescopes (ING) de participación británica, holandesa y española (lo que incrementa el tiempo de uso español del WHT e INT en otro 10 %). Ambos telescopios tienen instrumentación adecuada para la espectroscopía e imagen en el rango visible de objetos del Sistema Solar (ISIS, ACAM y PFC en el WHT, WFC e IDS en el INT). El WHT cuenta además con la cámara-espectrógrafo completamente diseñada y

construida en España llamada LIRIS que trabaja en el infrarrojo cercano (entre 0.8 y 2.5 micras).

Lista actual de instrumentos en los telescopios ING:

<http://www.ing.iac.es/astronomy/observing/instruments.html>

Igualmente en el ORM la comunidad de sistema solar utiliza con mucha frecuencia el TNG, telescopio gestionado por la Fundación Galileo Galilei constituida por el Instituto Nazionale di Astrofísica (INAF, Italia). El TNG cuenta con instrumentación para imagen y espectroscopía en el visible (DOLORES) e infrarrojo cercano (NICS) siendo NICS uno de los instrumentos más utilizados dado que posee un modo de baja resolución basado en un prisma de Amici que permite obtener espectros de objetos muy débiles. Recientemente el TNG incorporó el espectrógrafo de alta resolución HARPS-N que podría brindar nuevas opciones a la comunidad. También se encuentra operativo el espectrógrafo infrarrojo GIANO-B que puede operar junto con HARPS-N. Detalles de la instrumentación actual en TNG: <http://www.tng.iac.es/instruments/>

También es de uso habitual de la comunidad el NOT, operado por el consorcio NOTSA de países nórdicos (Dinamarca, Suecia, Finlandia, Islandia y Noruega). El NOT cuenta con varios instrumentos que utiliza la comunidad habitualmente: una cámara en el rango visible (StanCam), una cámara-espectrógrafo en el rango visible diseñada y construida en España (ALFOSC), una cámara-espectrógrafo en el rango infrarrojo cercano (NOTcam). También cuenta con un espectrógrafo de

alta resolución en el visible (FIES) y una cámara para imagen de alta resolución en el UV (MOSCA). ALFOSC se destaca como el instrumento más utilizado por la comunidad de sistema solar.

El LT es un telescopio 100 % robótico propiedad del Astrophysics Research Institute de la Liverpool John Moores University (UK). Cuenta con una cámara en el rango óptico (RATCam), un polarímetro en el óptico (RINGO3), un espectrógrafo de campo integral en el visible (FRODOspec) y una cámara para fotometría rápida (RISE).

La versión actualizada y lista de instrumentos de los telescopios del grupo ING puede encontrarse aquí: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/observing/instruments.html>

Centro Astronómico Hispano Alemán Calar Alto Observatory (CAHA) (ibid.)

El Observatorio Astronómico de Calar Alto (CAHA, anteriormente de Centro Astronómico Hispano-Alemán) es operado conjuntamente por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) en Granada y la Junta de Andalucía. Calar Alto proporciona tres telescopios con aperturas de 1.23 m, 2.2 m y 3.5 m. Un telescopio de 1.5 m, también localizado en la montaña, es operado bajo el control del Observatorio de Madrid.

El telescopio de 3.5 m cuenta con dos cámaras en el óptico (LAICA y MOSCA), un espectrómetro de campo integral en el visible (PMAS), un espectrógrafo de resolución intermedia (TWIN) y la cámara de gran campo en el infrarrojo OMEGA-2000. Actualmente su principal instrumento es el espectrógrafo CARMENES.

El telescopio de 2.2 m Calar Alto Telescope cuenta con una cámara en el visible (BUSCA), una cámara espectrógrafo en el visible (CAFOS) con capacidades polarimétricas, una cámara para hacer "lucky imaging" (AstraLux), además del espectrógrafo CAFE y cámara PANIC.

El telescopio de 1.2m cuenta con una cámara CCD de campo grande y en el se emplea la cámara de alta resolución espacial y temporal PlanetCam de la UPV/EHU

CAFOS en el 2.2m y la CCD del 1.2m son dos instrumentos muy utilizados por la comunidad. Su pérdida por los recientes recortes en el presupuesto del CAHA repercutirá muy negativamente en la investigación de los planetólogos españoles y en los proyectos que sustenta PlanetCam, así como en el futuro de la Unidad Asociada entre el IAA (CSIC) y el Grupo de Ciencias Planetarias de la UPV/EHU que goza del apoyo de la fundación vasca para la ciencia Ikerbasque.

Detalles de la instrumentación actualmente disponible en Calar Alto pueden encontrarse aquí:

<https://www.caha.es/es/observación/telescopios-e-instrumentos>

Necesidades de la comunidad relativas al futuro de estas infraestructuras (ibid. -adición)

Es muy importante para nuestra comunidad mantener la accesibilidad a telescopios en el rango 1-2m para el trabajo fotométrico y espectroscopio en particular en el rango visible e infrarrojo próximo de cuerpos menores y el seguimiento de la actividad en las atmósferas planetarias.

Igualmente es necesario el acceso a redes de telescopios alrededor del planeta que tengan rapidez y flexibilidad para observar eventos sobrevenidos en modo "target of opportunity" o tiempo discrecional.

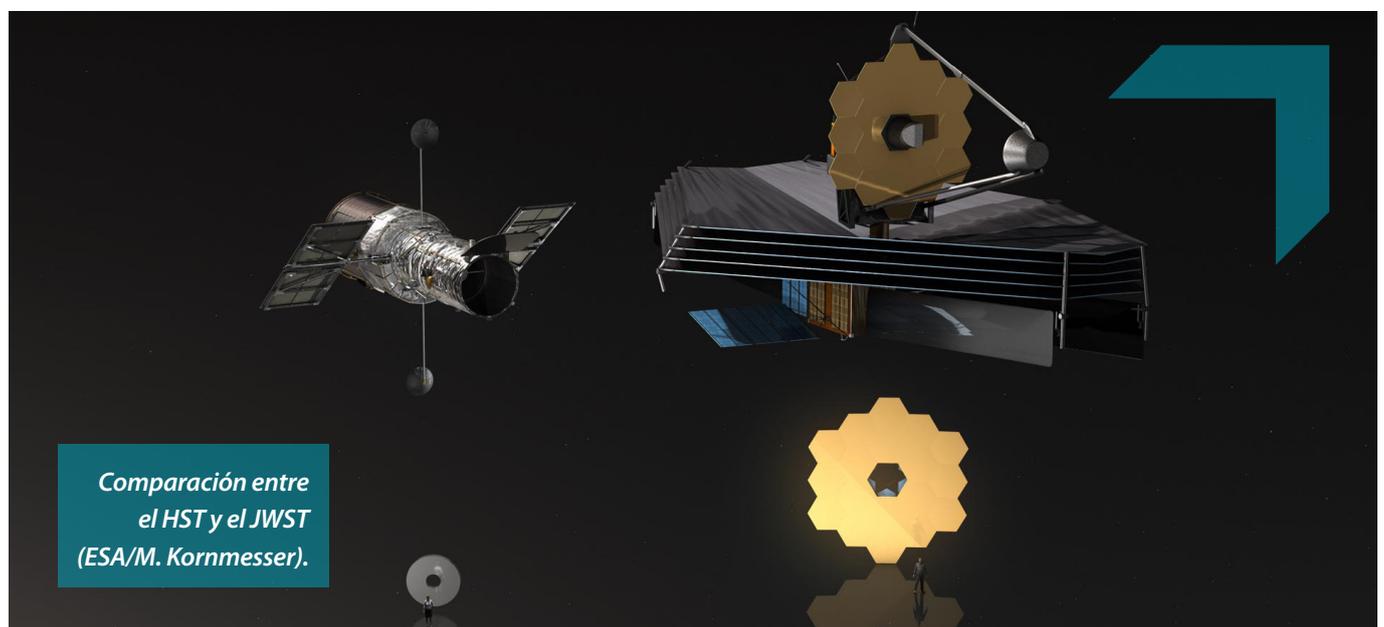
La observación de los cuerpos más pequeño y débiles (por ejemplo asteroides y TNO) está garantizada con GTC y en el futuro con E-ELT.

La necesidad más importante en la instrumentación astronómica en los telescopios instalados en España es la falta de un sistema de óptica adaptativa que permita alcanzar alta resolución espacial. Se espera se cubra esta parcela con el desarrollo de FRIDA en GTC. Actualmente solo la instrumentación en ESO (VLT) permite cubrir esta parcela.

4.2.2. Infraestructuras espaciales:

James Webb Space Telescope (JWST) (pág. 127 -adición)

El observatorio JWST está en construcción y tiene previsto su lanzamiento para el 30 de Marzo de 2021. Será ubicado en el punto de Lagrange L2 del sistema Sol-Tierra para la observación en el infrarrojo. Constará de un espejo de 6.5 m y de instrumentos dedicados a la toma de imágenes y espectroscopia en el rango espectral 0.6 – 28 micras. Una lista de los instrumentos y sus principales características pueden verse aquí: <https://sci.esa.int/web/jwst/-/45752-jwst-instruments>.



El JWST permitirá caracterizar los objetos más remotos del sistema solar (en particular cuerpos TNO y planetas enanos como Plutón) y estudiar la actividad en atmósferas planetarias desde Marte a Urano, así como cometas y satélites activos.

4.2.5. Misiones espaciales operativas (por orden de lanzamiento):

Casini-Huygens (NASA-ESA) (pág. 129)

Representa la mayor cooperación entre agencias espaciales para la exploración del Sistema Solar. La misión constaba de un orbital (Cassini) a Saturno responsabilidad de la NASA y de un módulo de descenso (Huygens) en la atmósfera de Titán responsabilidad de la ESA y la agencia espacial italiana ASI. La sonda Huygens entró en la atmósfera del satélite y aterrizó en su superficie el 5 de enero del 2005. La misión del orbitador Cassini finalizó en septiembre de 2017 cuando la nave se estrelló en órbita controlada con el planeta. El archivo de datos es amplísimo, abarca todos los objetivos del sistema de Saturno y puede descargarse la información desde NASA PDS.

MARS Express (ESA) (pág. 130)

Esta misión a Marte se lanzó el 2 de junio de 2003 y aún sigue operativa. La instrumentación a bordo de la nave está permitiendo tener un mapa de la superficie a muy alta resolución (10 m/píxel y 2 m/píxel) para hacer un estudio geológico de la misma, algo que se está llevando a cabo a partir del archivo de datos liberados. También, científicos españoles están accediendo a datos (bien ya liberados bien a través de colaboraciones con

los IP de los instrumentos) para cartografiar la composición de la atmósfera y determinar su circulación global, para determinar el efecto de la atmósfera en la superficie, así como la interacción de la atmósfera con el viento solar. Desde 2017 la cámara VMC está bajo la responsabilidad científica de la UPV/EHU.

ROSETTA (ESA) (ibid.)

Rosetta se aprobó en noviembre de 1993 como una de las últimas misiones cornerstone de la ESA. El objetivo de la misión es estudiar en detalle el interior, la superficie, inicio y evolución de la actividad de un cometa. El blanco de esta era el cometa 46 P/Wirtanen. Sin embargo, el lanzamiento -por un cohete Ariane 5 G+ - tuvo que aplazarse y el objetivo pasó a ser el cometa 67 P/Churyumov-Gerasimenko. En su viaje de 10 años hacia el cometa, la nave ha pasado por dos asteroides: 2867 Steins (en 2008) y 21 Lutetia (en 2010). La nave entró en modo de hibernación 2011 y se mantuvo en este estado hasta el 20 de enero 2014, cuando se inició la secuencia de salida de la hibernación. España, específicamente el IAA, el INTA y la UPM, han contribuido con unidades y subunidades importantes de dos instrumentos: OSIRIS – sistema de cámaras de alta (NAC) y media (WAC) resolución espacial equipadas con filtros específicos para estudiar la mineralogía de la superficie cometaria y para la composición del coma gaseoso- y GIADA –para el estudio de la masa y velocidad, o sea, del momento del polvo cometario-.La exploración del cometa 67 CG se llevó a cabo exitosamente durante los años 2014, 2015 y 2016, y los datos aportados por sus instrumentos pueden descargarse de ESA PDA y NASA PDS.

Venus Express (ESA) (ibid.)

Venus Express fue la primera misión de la ESA al planeta más cercano a la Tierra, Venus. La misión nació después de que la ESA solicitara propuestas en marzo de 2001 que pudieran reutilizar el diseño de la nave espacial Mars Express, los mismos equipos industriales y estar lista para lanzar en el 2005, como así ocurrió. Participaron de forma directa en la misma el grupo del IAA y el GCP de la UPV/EHU. La misión ha estado operativa entre 2006 y 2014 proporcionando importante información de la atmósfera de Venus, su superficie y su entorno planetario. Los datos pueden descargarse del archivo ESA PDA.

Mars Science Laboratory (NASA) (ibid.)

La misión Mars Science Laboratory es parte del Programa de Exploración de Marte de la NASA, un esfuerzo a largo plazo de exploración robótica del planeta rojo. El explorador Curiosity se diseñó para evaluar si Marte alguna vez tuvo un ambiente capaz de soportar formas de vida. En otras palabras, su misión es determinar la potencial habitabilidad del planeta rojo. Para averiguarlo, el rover lleva tres cámaras, cuatro espectrómetros, dos detectores de radiación, un sensor atmosférico y un sensor ambiental cuya institución IP es el CAB. El instrumento, llamado REMS Rover Environmental Monitoring Station, medirá y proporcionará diariamente la presión atmosférica, humedad, radiación UV en la superficie, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y temperatura del suelo marciano alrededor de la localización del rover. La misión Mars Science

Laboratory se lanzó desde Cabo Cañaveral el 26 de noviembre de 2011, siete meses después (6 agosto de 2012) aterrizó con éxito en la base del cráter Gale. La misión se encuentra plenamente operativa desde entonces. La UPV/EHU participa en el análisis de los datos proporcionados por REMS. Todos los datos de la misma se liberan periódicamente en NASA PDS.

5. Grandes proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro:

GAIA (ESA) (pág. 131)

Esta misión está dedicada a realizar un mapa tridimensional de nuestra galaxia, la Vía Láctea, permitiendo así conocer la composición, formación y evolución de la misma. GAIA ha proporcionado medidas de posición y velocidad radial con tal exactitud que se podrá crear un censo estereoscópico y cinemático de aproximadamente mil millones de estrellas. La carga científica es un único instrumento: un telescopio doble compartiendo banco óptico y plano focal con 106 CCDs. Las funciones de este instrumento son realizar astrometría, fotometría entre 320 y 1000 nm, y espectrometría de alta resolución entre 847 y 874 nm. Aunque no es una misión de exploración del Sistema Solar, mientras GAIA escruta la galaxia, en sus 106 CCDs no solo hay información de estrellas, sino de los pobladores del Sistema Solar, especialmente cuerpos menores. La búsqueda de estos y de la información recabada por GAIA está siendo usada para caracterizar espectroscópicamente miles de asteroides, información que combinada con los datos de

WISE representa un salto cualitativo gigantesco en el conocimiento de las diferentes poblaciones y familias de pequeños cuerpos del sistema solar. La información está siendo usada para mejorar las órbitas de decenas de miles de pequeños cuerpos y mejorar las predicciones de ocultaciones de estrellas por estos objetos abriendo una puerta al estudio de sus tamaños y formas. Lanzada en 2013 se espera continúe operativa hasta 2024.

Bepi-Colombo (ESA-JAXA) (ibid.)

BepiColombo (ESA-JAXA) consta de dos módulos, un orbital planetario, MPO, responsabilidad de la ESA y otro responsable el MMO de la agencia espacial japonesa JAXA orientado a estudiar la magnetosfera de Mercurio. La misión fue lanzada en Octubre de 2018 y se acercará a Mercurio en varios sobrevuelos desde el 2021 hasta la entrada en órbita en el 2025. Proporcionará un gran avance en la comprensión de su superficie a diferentes longitudes de onda permitiendo así conocer la composición mineralógica y elemental. También será posible determinar si el interior del planeta es sólido o líquido e investigar el alcance y origen del campo magnético, algo que se presenta como una de las mayores incógnitas sobre Mercurio. El módulo planetario consta de 11 instrumentos. España (IAA y CAB, respectivamente) ha contribuido con hardware a dos de ellos: BeLA, el primer altímetro láser europeo a bordo de una misión interplanetaria y un espectrómetro de rayos X, MIXS. Se espera investigar el planeta Venus durante dos sobrevuelos en 2020 y 2021.

5.1.1. Instrumentos terrestres:

EST (Telescopio Solar Europeo) (pág. 132)

EST fue incluido en 2016 en la hoja de ruta ESFRI, en la cual aparecen los proyectos estratégicos prioritarios a nivel de Europa. El proyecto se encuentra en la actualidad en su fase preparatoria (con financiación de la UE a través del proyecto PRE-EST, también coordinado por el IAC, y complementado con aportaciones de los socios). En esta fase, se concluirá el diseño de la infraestructura y se espera consolidar la contribución de los diferentes países para la creación de una entidad propia (ERIC) que gestione su construcción y operación.

DKIST (ibid.)

DKIST verá primera luz científica en verano de 2020. Los últimos años de su construcción se han llevado a cabo bajo la dirección por parte de Valentín Martínez Pillet del NSO americano.

5.1.2. Infraestructuras espaciales:

Solar Orbiter (pág. 133)

A fecha de diciembre de 2019, los instrumentos ya fueron entregados cotejados e integrados en la plataforma. Tras las pruebas de esta última, la nave se encuentra en Cabo Cañaveral dispuesta a su lanzamiento que tendrá lugar en febrero de 2020. Con estas nuevas fechas, la fase nominal de la misión se extenderá hasta finales de 2026, tras la cual se prevé una fase extendida que se prolongue hasta finales de 2031.

Solar C (ibid.)

El proyecto Solar C ha cambiado por completo y, a fecha de diciembre de 2019, sólo contempla la instrumentación ultra-

violeta, en la que la comunidad española no prevé implicación instrumental. El uso, eso sí, de los datos se espera muy fructífero.

5.2.1. Infraestructuras espaciales:

Programa ExoMars (ESA-Russian Federal Space Agency) (pág. 135)

El programa ExoMars vuela dos misiones, un orbitador operativo desde Octubre de 2016 (Trace Gas Orbiter, TGO) y un rover y plataforma de superficie que serán lanzados en julio de 2020, en una asociación entre la ESA y la agencia espacial rusa, Roscosmos. Su principal objetivo es dar respuesta a una de las preguntas científicas sobresalientes de nuestro tiempo: ¿ha existido la vida en Marte? Además, ExoMars permitirá a Europa el desarrollo de nuevas capacidades técnicas para el aterrizaje, desplazamiento sobre la superficie, la perforación y la preparación de muestras para allanar el camino para una futura misión de retorno de muestras de Marte en la década de 2020.

El Trace Gas Orbiter (TGO) está dedicado a la detección y medida del metano y de otros gases atmosféricos que podrían ser signos de procesos biológicos o geológicos activos. España participa como Co-PI en el instrumento SOIR-NOMAD y proporciona toda la electrónica del instrumento SOIR-NOMAD es un espectrómetro que mide la composición química de la atmósfera de Marte con una precisión sin precedentes. El conocimiento sobre el vapor de agua y ozono (entre otras cosas) ayudará a los investigadores a entender mejor el clima, las estaciones y la habitabilidad del planeta.

Adicionalmente al instrumento SOIR-NOMAD, España aporta carga científica en el módulo de descenso, dentro de una estación meteorológica llamada DREAMS. La aportación española (INTA-CAB) consiste en un medidor de radiación solar en la superficie del planeta, cuyo acrónimo es RDS-SIS.

OSIRIS-Rex (NASA) (pág. 136)

OSIRIS-Rex es una misión de NASA que forma parte del programa New Horizons y que tiene como objetivo traer muestras de un asteroide. Fue lanzada en septiembre de 2016, llegando al asteroide primitivo (101955) Bennu el 3 Diciembre 2018 y estudiando desde entonces sus propiedades. Se espera que retorne a la Tierra con unos 60 gramos de material del mismo en Septiembre de 2023. El grupo del IAC es parte del equipo científico de la misión.

JUICE (ESA) (ibid.)

Esta misión al sistema de Júpiter es la primera selección de la ESA de una misión denominada "large", L1, dentro del programa Cosmic Vision 2015-2025, con lanzamiento previsto en el 2022 con un cohete Ariane 5 y llegada a Júpiter en 2030. La sonda espacial explorará las lunas heladas de Júpiter, así como el propio planeta gigante. JUICE (acrónimo de Jupiter Icy Moons Explorer) pasará por lo menos 3,5 años dentro del sistema joviano, investigando tres de los cuatro satélites galileanos: Ganímedes, Calisto y Europa así como la atmósfera de Júpiter. Se trata de una misión de caracterización de estos mundos de gran interés astrobiológico, pues en el interior de estos satélites hay océanos de agua líquida y el agua es el ingrediente fundamental para la aparición de la vida. El

lema de JUICE es explorar la emergencia de mundos habitables que orbitan planetas gigantes. Además abordará otras cuestiones científicas tan importantes como ¿cuáles son las condiciones para la formación de planetas y cómo funciona el sistema solar? España participó desde sus inicios allá por 2004 en la definición científica de la misión y, en la actualidad, ya con la instrumentación seleccionada, el IAA aporta subunidades y unidades de la cámara JANUS y del altímetro láser GALA, siendo Co-I en ambos instrumentos, con la participación de la UPV/EHU en las operaciones científicas del instrumento JANUS. Ambos instrumentos son complementarios desde el punto de vista científico ya que la cámara proporcionará, entre otros objetivos, un mapa global de Ganímedes a diferentes resoluciones espaciales y el altímetro láser dará información sobre la topografía del satélite. Europa, Calisto y la atmósfera de Júpiter serán investigados por la cámara, y por el altímetro láser los satélites solo. La UPV/EHU participa como Co-I del instrumento MAGIS, una cámara para espectro-imagen que cubre los rangos espectrales del visible y del infrarrojo próximo (hasta 5 micras).

MARS 2020 (NASA) (ibid. -adición)

Se trata de un rover que será lanzado en julio de 2020 a Marte, continuación del Curiosity/MSL, y que se posará en la región del cráter Jezero en Febrero del 2021. España es la encargada del instrumento MEDA (INTA y CAB), un conjunto de sensores meteorológicos para la medida del viento, la presión, temperatura, humedad y radiación en diferentes longitudes de onda. Participan a nivel de Co-I la UPV/EHU y Instituto de Física-Química Rocasolano-CSIC.

Comet Interceptor (ESA) (ibid. -adición)

Esta misión fue seleccionada en Julio 2019, dentro del nuevo tipo de "misiones rápidas" clase-F de la ESA. Consistirá en tres vehículos que tendrán como objetivo la investigación de un cometa joven (nuevo) o de un posible objeto interestelar que se aproxime a la órbita terrestre. Los tres módulos se estacionarán en el punto L2 de Lagrange del sistema Sol-Tierra y desde allí, con sus medios de propulsión, se acercarán al objetivo una vez esté definido para observar e investigar al cometa (gas, polvo, plasma) desde diferentes posiciones y con instrumentación complementaria, alrededor del mismo. La participación española en esta misión corre a cargo del IAA-CSIC

a través del desarrollo de subsistemas para tres cámaras CoCa (en nave A), OPIC y EnVisS (en nave B2), y un espectrómetro de masas MANIaC (en nave A).

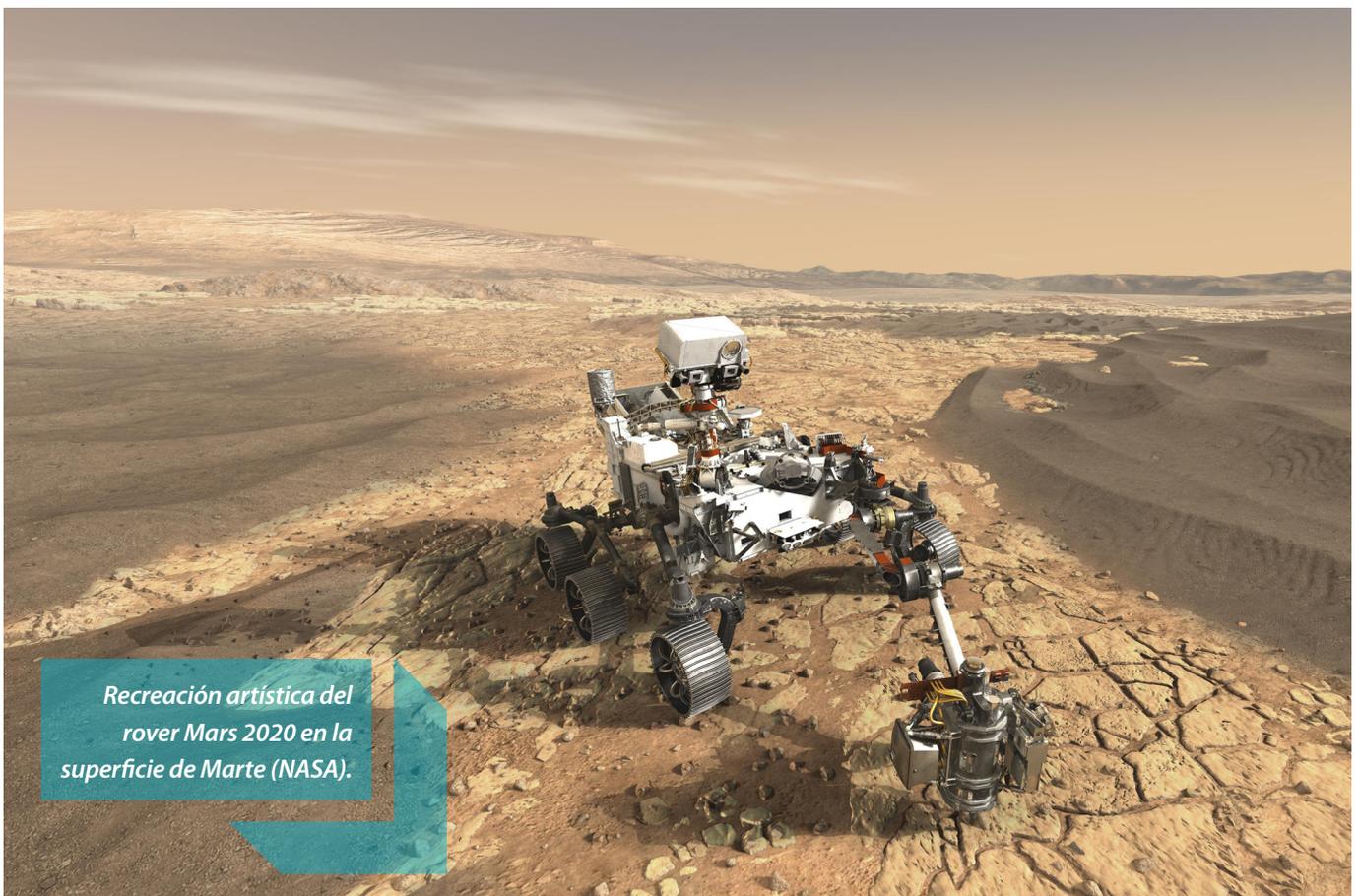
EnVision (ESA) (ibid. -adición)

EnVision es una misión ESA a Venus que se encuentra actualmente en su fase conceptual para una selección como M5 prevista para 2021, y lanzamiento en el 2032 y llega al planeta tras solo 5 meses de navegación.

La misión tiene objetivos como determinar el nivel y la naturaleza de la actividad geológica y la secuencia de eventos que generaron las características actuales de la superficie del planeta, evaluar si Venus alguna vez tuvo océanos (y por lo tanto,

tal vez reunió las condiciones para albergar vida). EnVision utilizará una serie de técnicas diferentes para buscar procesos geológicos activos, medir los cambios en la temperatura de la superficie asociados con el volcanismo activo, caracterizar las características geológicas regionales y locales, determinar los mecanismos de soporte de la corteza y restringir las propiedades del manto y núcleo.

Entre los instrumentos que llevar, el IAA-CSIC es responsable de varios subsistemas para VenSpec, un conjunto de tres espectrómetros y espectros de imagen: VenSpec-M (generador de imágenes infrarrojas), VenSpec-H (espectrómetro IR) y VenSpec-U (espectrómetro UV).



Epílogo

La financiación de Astronomía y Astrofísica en la Agencia Estatal de Investigación

Con el establecimiento en 2015 de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) como el principal instrumento para la gestión y financiación de los fondos públicos estatales destinados a actividades de I+D+i, se han centralizado en ella tanto las actividades de evaluación científica de las solicitudes de proyectos, infraestructura y recursos humanos que eran llevadas a cabo por la antigua ANEP, como la gestión de la financiación llevada a cabo por los gestores del Plan Nacional de Astronomía y Astrofísica. En la actualidad, dentro del esquema de la AEI, Astronomía y Astrofísica (AYA) sigue manteniéndose como una de las subáreas del área de Física (FIS), junto con Física de Partículas y Nuclear (FPN), Espacio (ESP) y Física y Aplicaciones (FYA). El equipo de AYA en la AEI está formado por dos personas, un coordinador y un colaborador que se encargan de la gestión de las solicitudes de financiación de proyectos, infraestructuras, etc y de recursos humanos en el ámbito de la Astrofísica, junto con el equipo de ESP, para el caso de investigación astrofísica fuera de la atmósfera.

Desgraciadamente, la creación de la AEI ha coincidido con un periodo de grandes recortes económicos a la financiación

de la investigación en este país, lo que ha supuesto un enorme perjuicio para los grupos de investigación involucrados en las grandes colaboraciones internacionales que están desarrollando los futuros instrumentos de observación astronómica, tanto terrestres como en el espacio, tal como este informe claramente expone. Por dar unos breves datos, en los últimos 3 años de existencia real de la AEI, la sobrepetición de recursos económicos de proyectos de investigación en AYA se ha mantenido entorno a un factor 4 respecto del presupuesto disponible. Sin embargo, siendo esto ya grave para poder cumplir con los objetivos de investigación de los diferentes grupos, creo que es todavía más dramático la enorme pérdida en recursos humanos que hemos sufrido, con un recorte sustancial en las plazas ofertadas de las convocatorias postdoctorales "estrella", Ramón y Cajal y Juan de la Cierva y de personal técnico Torres Quevedo. Un dato que me parece importante mencionar, y que demuestra la imperiosa necesidad de recuperar talento para los grupos de investigación Astrofísicos en España, es el hecho de que en las últimas convocatorias de proyectos de investigación, casi el 60% del presupuesto solicitado es para

contratación de personal, tanto científico como técnico. Quiere esto decir que la comunidad astrofísica, que ha dado cumplidas muestras de su capacidad para afrontar grandes retos científico-tecnológicos, y de estar presente en prácticamente todos los grandes proyectos observacionales mundiales, tiene una gran necesidad de aumentar su "masa crítica" para poder afrontar todos los retos con garantías de éxito. En este sentido, me gustaría agradecer a todos aquellos investigadores que han participado en la elaboración de este informe de perspectivas sobre el estado de la investigación en Astronomía en España. Con este informe se justifica la urgente necesidad de incrementar los recursos económicos destinados a investigación en Astronomía por las entidades de financiación nacionales y autonómicas. Desde la AEI, los miembros de AYA estaríamos encantados de poder distribuir un presupuesto sustancialmente superior al actual entre los múltiples proyectos de calidad que cada año se presentan a las distintas convocatorias. Espero que en los próximos años esto sea, más que un deseo, una realidad tangible.

Gustavo Yepes Alonso
Coordinador de AYA en la AEI.



Editor de la versión final:
Vicent J. Martínez.
Diseño y maquetación:
Fernando J. Ballesteros.
Esta edición se terminó
en febrero de 2020.



ASTRONOMÍA. Un estudio de prospectiva