

Informe del panel de Cosmología de la RIA

Este informe preliminar 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 principales: Fondo Cósmico de Microondas, cartografiados de galaxias, astronomía de 21 centímetros, simulaciones cosmológicas, primera luz y detección de materia oscura. Se ha hecho especial énfasis en los aspectos más instrumentales de cada una de las áreas. El informe ha sido elaborado por el siguiente panel: Txitxo Benítez, Francisco Castander, Rosa Domínguez Tenreiro, Juan García-Bellido, Diego Herranz, Enrique Martínez González y Evencio Mediavilla

1. Objetivos científicos para la Década

1.1 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 observables anisotropías en temperatura y polarización y 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 contiene la huella dejada por el Fondo de Ondas Gravitacionales (GWB 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. Es por ello que la detección de este modo B de polarización suponga 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.

1.2 Cartografiados 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. Los cartografiados o *surveys* de galaxias de gran campo han experimentado 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 cartografiados 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 SNIe, 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. Los proyectos que utilizan el efecto lente gravitatoria precisan además, de imágenes ópticas de gran calidad. Por último, los cartografiados que buscan SNIe, requieren llevar a cabo sus observaciones con una secuencia temporal adecuada para la detección 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 solo 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*.

1.3 Astronomía de 21 centímetros

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 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 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 se formó 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, 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 otras 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.

1.4 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 z s? ¿Cómo se originaron los elementos pesados, el polvo y las primeras estrellas? ¿Qué relación existe entre formación estelar y de agujeros negros a altos z s? ¿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 reionizaron 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. La primera detección de estos emisores a muy alto z podrá llevarse a cabo con el JWST 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”.

1.5 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 (CMB & 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).

1.6 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. 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, www.etp4hpc.eu), 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:

- a) 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.
- b) 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 macrosimulaciones, 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 pcs, 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).

2. Estado actual

2.1 Fondo Cósmico de microondas

En las últimas décadas el estudio del Fondo Cósmico de Microondas (CMB de sus siglas en inglés) 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 y más recientemente Planck de la ESA que confirman el modelo Λ CDM plano 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 ≈ 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).

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 del GWB 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: EBEX, SPTPol, SPIDER y PolarBear, liderados por grupos de EEUU, y el experimento hispano-británico QUIJOTE ubicado en el Observatorio del Teide y liderado por grupos españoles. Desde globo estratosférico, el experimento LSPE está liderado 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, más ambiciosa y con unos objetivos más amplios, también a la ESA.

2.2 Cartografiados 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 y han permitido un avance en nuestro entendimiento de la cosmología. Desde entonces, otros *surveys* han muestreado *redshift* más altos, pero no de manera exhaustiva y abarcando un área pequeña. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, WiggleZ, VIPERS.

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 (Albrecht et al 2006) 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 *survey* de gran campo (>5000 grados cuadrados) en desarrollo o que se van a llevar a cabo en los próximos años.

Survey	Area	z	Inicio	Fin	Tipo	dz/(1+z)	N gal.	DETF
BOSS	10,000	$z < 0.7$	2009	2014	Espec.	0.001	1.5M	III
DES	5,000	$z < 1.5$	2013	2017	Fotom.	0.05	300M	III
eBOSS	10,000	$z < 3$	2014		Espec	0.001	2M	III
JPAS	8,500	$z < 1.5$	2014	2020	Fotom.	0.003	100M	IV
WEAVE	10,000	$z < 1.3$	2017		Espec.	0.001	10M	IV
MS-DESI	10,500	$z < 1.6$	2019		Espec.	0.001	10M	IV
LSST	20,000		2020		Fotom	0.03	10000M	IV
Euclid	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	Area	z	Inicio	Fin	Tipo	dz/(1+z)	N gal.	DETF
ALHAMBRA	4	$z < 1.5$	2005	2012	Fotom	0.013	0.6M	
PAU	200	$z < 1.5$	2013	2016	Fotom.	0.003	3M	III
JPAS-Pathfinder	200	$z < 1.5$	2013	2014	Fotom.	0.003	2M	
KIDS/Viking	1500	$z < 1.5$	2012		Fotom.	0.03		

SuMIRe/HSC-PFS	1500	$z < 1.7$	2013-2017		Fotom/Esp	0.001	2M	
----------------	------	-----------	-----------	--	-----------	-------	----	--

La comunidad española tiene una notable presencia en muchos de estos proyectos. Grupos del IAA y de la Universitat de Valencia 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, desarrollado desde el Observatorio de Calar Alto, y que recientemente ha hecho públicos sus datos para la comunidad española (NOTA: la fecha de *release* es el 21 de junio). Este *survey* ha sido un campo de pruebas fundamental para planear JPAS, que no solo es un proyecto propuesto liderado desde España, y 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. También cuentan con una amplia y destacada representación española los proyectos DES y Euclid. Los *surveys* PAU y JPAS-Pathfinder son también liderados y llevados a cabo desde España.

Desde el punto de vista instrumental, en España se ha diseñado y se está construyendo en su integridad la cámara de PAU. También hay aportaciones importantes a otras cámaras como JPCam, DECam y WEAVE. Nuestra contribución también es destacable en Euclid.

2.3 Astronomía de 21 cm

El objetivo prioritario de la comunidad internacional para finales de esta década y principios de la que viene es el construcción y puesta en marcha del *Square Kilometre Array* (SKA)¹, 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 PrepSKA² dentro del Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea, y en España el proyecto VIA-SKA³ 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 empresas⁴ cuya experiencia y capacidad productiva les coloca en una posición competitiva a la

1

□ <http://www.skatelescope.org/>

2

□ <http://www.prepska.org/KeyScienceIssuesOfTheSKA.html>

3

□ <http://www.via-ska.es/ska/>

4

□ <http://www.via-ska.es/ska/servlets/members?PRILIST>

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 digital, 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. En concreto, los grupos de investigación participantes están aportando por su cuenta entre el 30% y el 65% del coste estimado de la aportación total propuesta en esta fase de 36 meses de Pre-construcción de SKA, y alguna empresa en torno al 15%. En números, 800.000 euros han sido aportados por los grupos y empresas, salidos íntegramente de sus proyectos/presupuestos, mano de obra y equipos propios, etc. Sin embargo, hasta la fecha el nivel de co-financiación de aportado por el MINECO ha sido nulo.

Paralelamente a estas iniciativas, 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 de investigación españoles colaboran a título individual en algunos proyectos científicos y observaciones con estos instrumentos.

2.4 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 (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 ($z > 5$). También en el CAB y en el OAN hay grupos que trabajan en la formación de galaxias utilizando este instrumento.

- 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 en la banda H Lyman-alpha a $z=11$, para detectar la posible primera re-ionización incompleta causada por las estrellas de población III.

- 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 al CAB (CSIC-INTA) han tenido y están teniendo una activa participación en la construcción de componentes de ALMA, así como su futura utilización para estudiar la formación de galaxias.

- 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-alpha. También participan en el Equipo Científico y recibirán tiempo garantizado.

2.5 Detección de materia oscura

España participa 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 Universidad de Zaragoza. 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 Universidad Politécnica de Valencia.
- 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. 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 *Cherenkov Telescope Array* (CTA), una red de telescopios de rayos gamma de diversos tamaños, 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).

2.6 Simulaciones cosmológicas

Los logros parciales 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. En este momento se está trabajando activamente en cubrir las etapas intermedias, tales como:

a) Simulaciones frontera (Grand Challenge):

Las simulaciones cosmológicas de mayor volumen realizadas hasta ahora usan cajas de varios Gpc, son *acolisionales* que no incorporan gas. Las de mayor rango dinámico (relación entre el volumen de la caja y la resolución espacial) son:

- Millenium XXL: 3/h Gpc, 6720^3 partículas (<http://galformod.mpagarching.mpg.de/mxxlbrowser/>)
- DEUS simulation (14.7 /h Gpc con 8192^3 partículas (<http://www.deus-consortium.org/>)
- JUBILEE project (6/h Gpc con 6000^3 partículas) (<http://jubilee-project.org>)
- (BIG)MULTIDARK project (2.5/h Gpc con 3840^3 partículas (<http://www.multidark.org>))
- MICE Grand Challenge simulations (3/h Gpc y 4096^3 partículas. <http://maia.ice.cat/mice/>).

Las simulaciones de mayor volumen que incorporan *gas* (*sin cooling*) son en cajas de hasta 500/h Mpc (Marenostrum Universe). Las de mayor volumen que incorporan *gas*, *enfriamiento*, *formación estelar* y *procesos de realimentación por explosiones de supernovas* son de decenas de Mpc (OWL simulations,

GALFOBS). Recientemente se ha llegado a varios centenares de Mpc (CURIE Universe, <http://curiehz.ft.uam.es>). Con la tecnología actual, el volumen máximo alcanzable, con suficiente resolución es de casi 1/h Gpc (Magenitcum MHD simulation de Klaus Dolag.)

b) Códigos & simulaciones que incorporan gran parte de los procesos físicos enumerados en Sección 1.4:

- Códigos hidrodinámicos capaces de maximizar en este momento el rango dinámico: GADGET, RAMSES, GASOLINE, MASCLET, P-DEVA. *Los dos últimos han sido desarrollados por equipos españoles; los dos primeros son utilizados por equipos españoles que han desarrollado variantes; el tercero ha sido implementado y corrido en el BSC, recibiendo inputs de los equipos profesionales de este centro.*
- Simulaciones cosmológicas hidrodinámicas realizadas hasta el momento que optimizan las demandas de 1.4.b:
 - *MareNostrum Universe* (la más competitiva en su momento, realizada por un equipo español (UAM) <http://astro.ft.uam.es/marenostrum>)
 - *GALFOBS*: 80 Mpc³, hasta $z=0$. Incorpora hidrodinámica, enfriamiento, formación estelar, un modelo detallado de evolución química, feedback químico.
 - *MareNostrum High-z Universe*: Hasta $z=4$ para estudiar la formación de las galaxias primordiales. <http://astro.ft.uam.es/marenostrum>
 - *CURIE High-z Universe* Hasta $z=0$. Posibilidad de resimular cualquier objeto con hasta un rango dinámico de 16000³ partículas) (<http://curiehz.ft.uam.es>)

Vemos que las etapas intermedias que se están cubriendo ahora tienen que ver con: Entender la formación y evolución de galaxias y cúmulos en un contexto cosmológico, lo que informará sobre hasta qué punto éstos trazan la DM (“DM versus light connection problem”), para lo que se necesita entender cómo y cuándo se forman (y se distribuyen) los elementos más pesados que el helio. Entender los procesos físicos que afectan a la radiación electromagnética en su camino, desde su emisión hasta que alcanza los instrumentos de medida, a través de un universo estructurado.

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. España es partner 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 prestaciones de supercomputación altamente competitivas, a las que se accede sobre la base de competición en proyectos, a través de DECI (Distributed European Computing Initiative). DECI es el sistema de acceso a la HPC europea, ahora vía [PRACE-2IP](http://prace2ip.eu/). A nivel europeo, los astrónomos tienen un 10% del share total (es decir, incluyendo el tiempo utilizado por la industria europea, alto) en el sistema.

En España se trabaja a través de la Red Española de Supercomputación (RES) y el Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (CNS- BSC, <http://www.bsc.es/>). 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). Es vía PRACE y desde las instituciones científicas españolas vía RES. El share por parte de los astrónomos 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 realización 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 fructífera.

Los equipos españoles que trabajan en el tema y sus proyectos más relevantes son:

- **Barcelona**
Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña (IEEC) -CSIC <http://maia.ice.cat/mice/>
MICE Grand Challenge simulations: acoliciones de gran volumen con vistas a realización de catálogos simulados de los surveys DES, PAU, EUCLID, VHS and PLACK. Con detalle máximo.
 - PAU-MICE galaxy mock
 - DES-MICE Shear All-sky Tomographic CatalogueInstituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (ICCUB)-CSIC
Simulaciones acoliciones para ver los efectos de no gaussianidad en observables:
 - Non-Gaussian Simulations Comparison Project
(<http://icc.ub.edu/~liciaverde/NGSCP.html>)
Simulaciones acoliciones de formación de grupos de galaxias:
 - IDILICO Project (<http://www.am.ub.edu/extragalactic/idilico/>)
- **Madrid** Universidad Autónoma de Madrid.
Grupo MareNostrum de Cosmología Numérica :
JUBILEE y MULTIDARK simulations: acoliciones de gran volumen, con vistas a realización de catálogos para surveys (BOSS, EBOSS, BigBOSS, Euclid)
 - Hidrodinámicas de Cúmulos de Galaxias (Proyecto MUSIC <http://music.ft.uam.es>)
 - Hidrodinámicas de galaxias alto z (CURIE-HZ: <http://curiehz.ft.uam.es>)
 - Del Universo LOCAL, Proyecto CLUES (<http://clues-project.org>)Grupo Formación de Galaxias en un Contexto Cosmológico + Software Telescopes:
Hidrodinámicas de formación galaxias en un contexto cosmológico (Proyecto GALFOBS, proyecto MUGS)
 - Software para mimetizar las SEDs e imágenes de galaxias simuladas (Proyecto GRASIL-3D)
 - Desarrollo de códigos hidrodinámicos que incorporan evolución química: P-DEVA
- **Valencia:** Universitat de Valencia
(http://www.uv.es/~quilis/vicent/Computational_Cosmology.html)
 - Desarrollo de códigos hidrodinámicos Eulerianos (MASCLET)
 - Simulaciones hidrodinámicas de formación de galaxias y cúmulos de galaxias, a escala más pequeña.

Se trata de 4 grupos 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 (Madrid).

3. Necesidades instrumentales

3.1 Fondo Cósmico de microondas

La instrumentación en microondas se basa en dos tipos de detectores dependiendo de la frecuencia de observación: por debajo de ≈ 100 GHz 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. 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 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 participado tanto en el desarrollo instrumental (principalmente el desarrollo de parte de los radiómetros a 30 y 44 GHz así como la electrónica de control del LFI. Además el grupo del Dpto. de Física Teórica y del Cosmos de la U. Granada ha contribuido con el regulador de la criogenia a 4K del HFI) como en el análisis de los datos y la obtención de los resultados cosmológicos, liderando algunos de los artículos recientemente publicados. 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

10

significado que el nuevo reto en este campo sea la medida de la polarización. Con los datos de polarización de Planck que se harán públicos el próximo año se espera obtener una sensibilidad de $r \approx 0.1$. Aunque el ruido instrumental 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 EBEX, SPTPol, SPIDER, PolarBear, LSPE y QUIJOTE que esperan alcanzar una sensibilidad en el modo B en el rango de $r \approx 0.1-0.025$ (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 (U. Cantabria). Consta de dos telescopios de 3 m y tres instrumentos cubriendo el rango espectral 10-50 GHz. Por un lado supone un importante complemento a la información obtenida por Planck a frecuencias más bajas donde la emisión anómala alcanza su máximo de emisión, y por otro se espera mejorar la sensibilidad por pixel en las bandas comunes con Planck. Actualmente un telescopio y el instrumento MFI (Multi-Frequency Instrument, 10-20GHz) están operativos y se ha comenzado a medir tanto la emisión sincrotrón como la anómala de nuestra galaxia. Se espera que en el plazo de un año 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 valores 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.

Finalmente se espera volver a proponer a la ESA, en una futura llamada para misiones M4, el satélite de tipo M “Cosmic Origins Explorer” (CORe) para la medida de la polarización en todo el cielo en 15 bandas de frecuencia cubriendo un rango espectral de 45-795 GHz (de aprobarse su lanzamiento probablemente no sería antes de 2025). Con el doble de resolución frecuencial y 30 veces más sensibilidad que Planck, CORe espera obtener una sensibilidad en la señal del GWB (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. Por último, se está proponiendo una misión tipo L, PRISM, como respuesta a la reciente llamada de ESA, que representaría 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.

Por otro lado, 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. Observaciones con Herschel han aportado información esencial para la correcta interpretación de las fuentes detectadas por Planck.

3.2 Cartografiados de galaxias

Los surveys cosmológicos requieren de instrumentación de gran campo que pueda detectar objetos hasta alto redshift 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/MS-DESI, HET/Virus and Subaru/PFS.

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: Javalambre/JPCam, VST/Omegacam, WHT/PAUcam, VISTA, Blanco/DECam, CFHT/MegaCam, PanSTARRS and Subaru/HSC. Una de las mejores combinaciones disponibles para

llevar a cabo imagen de campo amplio en el infrarrojo en el Hemisferio Norte, PANIC + el 2.2m de Calar Alto.

3.3 Astronomía de 21 cm

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.

3.4 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 en la banda H Lyman-alpha a $z=11$ y detectar la posible primera re-ionización incompleta causada por la estrellas de población III.
- 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.
- 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-alpha responsables de la “primera luz”.
- SPICA: para el estudio de galaxias con formación estelar muy grande a desplazamientos al rojo altos.

La participación Española está siendo financiada por el Plan Nacional 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.

3.5 Detección de materia oscura

Tal como se describe más arriba, asociado a los distintos grupos de detección de materia oscura, 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 Argon 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 (e.g. CTA por Alemania) o por USA (e.g. SuperCDMS, COUPP).

Más que 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, salvo quizá MAGIC y ANTARES, 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.

3.6 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 no obstante realizado importantísimos avances parciales.

Como hemos señalado más arriba, la ESFRI (Research Infrastructures - Research - European Commission), basándose en un informe de la European Technology Platform for High Performance Computing (HPC Europe, www.etp4hpc.eu), identifica la Astrofísica y Cosmología como uno de los campos en los que la hiper/supercomputación ha jugado (y jugará) un papel fundamental, siendo precisamente la "Cosmología y la Formación de Estructura a Gran Escala", y la "Formación y Evolución de Galaxias" dos de las 6 sub-áreas de Grand Challenge en HPC.

La situación española en este campo es, a nivel del hardware supercomputación, de una integración en Europa altamente satisfactoria. En efecto, como hemos dicho, España es partner 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, <http://www.bsc.es/>), 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, 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 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.

4. Proyectos consolidados y acciones estratégicas para el futuro

4.1 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 (U. Cantabria) poseen una amplia experiencia en el desarrollo de instrumentos del CMB, y los dos primeros, junto con el grupo de Cosmología Física del ICC, también en el análisis de datos y explotación científica. En la última década IFCA, IAC y DICOM 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 y se espera que los resultados finales basados en los datos completos de temperatura y polarización se hagan públicos a mediados de 2014. Por otro lado, dichos grupos están desarrollando el experimento de polarización del CMB, QUIJOTE (Q, U, I JOint TEnerife), 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 tipos de misiones que se están proponiendo a las diferentes convocatorias abiertas por la ESA, una de tipo M, CORe, y otra tipo L denominada provisionalmente PRISM. La diferencia entre ambas reside en, por un lado, una mayor resolución angular y un mayor número de canales de frecuencia en la misión de tipo L en relación a la medida de las anisotropías en temperatura y polarización y, por otro, la posibilidad de incluir en PRISM un espectrógrafo para medir las distorsiones del espectro de la radiación. 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 los detectores de los canales por debajo de 100 GHz 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.

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) y el Dpto. de Física Teórica y del Cosmos (UG).

4.2 Cartografiados 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 está 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 JPAS, 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 y Euclid, con destacada presencia de los grupos del IEEC y CIEMAT.

Desde el punto de vista instrumental, en España se ha diseñado y se está construyendo en su integridad la cámara de PAU. También hay aportaciones importantes a otras cámaras como JPCam, DECam 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.

4.3 Astronomía de 21 cm

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 cofinanciación por parte del MINECO, así como de dotación económica para proyectos de investigación de Plan Nacional 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.

4.4 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, el telescopio espacial infrarrojo japonés SPICA 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 nacional 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 nacional 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.

4.5 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 para estar consolidado, 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 un líder natural en el experimento internacional CTA. El grupo de ANAIS en Canfrac es también uno de los grupos con más experiencia en Europa en detección de Materia Oscura y sin duda formará parte del core 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 liderazgo español, de la mano de Manel Martínez (IFAE), si CTA termina siendo asignado a Canarias. El resto de los grupos necesitan un incremento significativo de personal para empezar a tener peso en los proyectos internacionales, incluso europeos.

4.6 Simulaciones cosmológicas

Los experimentos CDMS, COUPP, MAGIC y ANTARES están consolidados. ANAIS debería empezar su construcción próximamente. El experimento ArgonDM aún necesita un esfuerzo considerable para estar consolidado, al menos la parte española.

Los grupos asociados a estos experimentos varían mucho de tamaño y experiencia. Por ejemplo, el grupo español de MAGIC lleva muchos años trabajando en Astrofísica de Altas Energías y probablemente será un líder natural en el experimento internacional CTA. El grupo español de ANTARES es un grupo grande y consolidado, lo que no está todavía definido es que España participe en la construcción de Km³NeT. El grupo de ANAIS en Canfranc es uno de los que tiene más experiencia en Europa en detección directa de Materia Oscura y sin duda formará parte del core inicial de EURECA cuando se apruebe. El grupo español de CDMS es pequeño pero está en un experimento internacional puntero, por lo que una pequeña inversión en personal puede dar grandes beneficios y les puede permitir liderar los análisis teóricos del experimento. Finalmente, el grupo español de COUPP es también pequeño, pero con una pequeña inversión en personal puede liderar la técnica de detección acústica, fundamental en el experimento, y en la cual son expertos por su participación en ANTARES.

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. Los grupos necesitan un incremento significativo en personal para poder tener peso en los futuros proyectos internacionales.