

EL ESPECTACULAR AUGE DE LA ASTRONOMÍA EN ESPAÑA

Xavier Barcons

Instituto de Física de Cantabria. CSIC-Universidad de Cantabria

Rafael Rodrigo

*Instituto de Astrofísica de Andalucía
Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

ABSTRACT: *The development of Astronomical research in Spain during the last 30 years has been truly spectacular. From a handful of active researchers and a dozen scientific publications in international journals in the seventies, the situation has changed to more than 500 active researchers which publish well over 700 papers per year, which represent over 6% of the total production in the world in this discipline. In this paper we present an overview of several important facts in this rapid evolution and we describe what is the current situation of Astronomy in Spain in the european and world-wide context, both in terms of scientific and technological production, human resources, their training and the key infrastructures.*

KEY WORDS: *Astronomical research, astronomical observatories.*

1. ASPECTOS HISTÓRICOS

Aunque no es el motivo central de este artículo hacer énfasis en la historia pasada de la astronomía en España, conviene reseñar que, al igual que otras ciencias, la astronomía ha estado presente, y con éxito, en nuestro país en diversas etapas de su historia, pero de manera intermitente y sin la continuidad necesaria. Así, conviene destacar el auge de la astronomía Árabe-Española, desarrollada fundamentalmente en Al Andalus, hasta el siglo XIII y aquella del Medioevo llevada a cabo bajo los auspicios de Alfonso X el Sabio, y que perduró entre los siglos XVI y XVII. La expulsión de árabes y judíos, entre otras vicisitudes, rompe esta tradición y crea un vacío, lo que unido a la sucesión de guerras, dificultades socio-económicas y al desprecio de los gobiernos por las ciencias en general, sume a España en unos siglos de atraso y sombras de todos conocido. Sólo la influencia de la navegación y la necesidad de mantener el predominio en el transporte marítimo y la defensa naval, hace que la Armada, a propuesta de Jorge Juan, propugne la creación en 1753 del Real Observatorio de Cádiz (actual Real Instituto y Observatorio de la Armada de San Fernando), quizás la institución científica más antigua de España.

ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura
CLXXXIII 727 septiembre-octubre (2007) 705-719 ISSN: 0210-1963

RESUMEN: El desarrollo de la investigación en Astronomía en España durante los últimos 30 años ha sido espectacular. De unos pocos investigadores en activo y una docena de publicaciones científicas en revistas internacionales en la década de los setenta, se ha pasado a más de 500 investigadores en activo, que publican más de 700 artículos por año, lo que representa más del 6% del total mundial en esta disciplina. En este artículo se repasan algunos hechos importantes en esta rápida evolución, y se describe cuál es la situación actual de la Astronomía española en el contexto europeo y mundial, tanto en términos de producción científica y tecnológica como en recursos humanos, su formación y en las infraestructuras clave.

PALABRAS CLAVE: Astronomía, observatorios astronómicos.

A esta institución le sigue el Observatorio Astronómico Nacional, fundado por iniciativa de Carlos III, también a sugerencia de Jorge Juan, en 1790. Pero, tras este auge y unos años de florecimiento, surge de nuevo la desidia de las autoridades y sólo es posible destacar algunas pocas individualidades que no consiguen crear "escuelas" que perduren en el tiempo. Y eso hasta los primeros años del siglo XX en los que el empuje y buen hacer de la Compañía de Jesús logra la creación de dos nuevos observatorios, Cartuja (1902) y Ebro (1904), con una vocación científica clara. Pero no es hasta mediados del siglo XX cuando empiezan a aflorar tímidamente algunos estudios en las Universidades donde se crean algunas cátedras, básicamente dedicadas a Astronomía de posición, al mismo tiempo que se instalan nuevos pequeños observatorios a lo largo de todo el Estado y España estabiliza y refuerza su pertenencia a la Unión Astronómica Internacional.

2. LAS CONDICIONES INICIALES

Es imposible entender el estado actual de la investigación en Astronomía en España, sin hacer referencia a una serie

de hechos ocurridos a partir de la década de los setenta en el siglo pasado. Estos hechos ocurrieron en distintos lugares de la geografía española, pero no estuvieron en principio conectados directamente entre sí, ni formaron parte de un "plan maestro". Muchos de estos hechos tuvieron que ver con la instalación de telescopios y centros relacionados con Astronomía, en muchos casos por organismos ajenos al sistema español. Las razones para la coincidencia temporal en el despliegue de esta batería de instalaciones internacionales en España probablemente haya que asignarlas, aparte de a la calidad del cielo desde el punto de vista astronómico, al hecho de que la transición de una dictadura a una democracia en España se condujo por cauces pacíficos y en condiciones de gran estabilidad institucional, así como al hecho de que los costes laborales en esa época eran mucho más asequibles que en otros países de nuestro entorno.

El primero de los hechos reseñables fue la creación de Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) en 1975. Este centro se crea –y se mantiene en la actualidad– como un consorcio público participado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), la Universidad de La Laguna y el Cabildo Insular de Tenerife. Su sede está en La Laguna, nutriéndose de profesores de dicha Universidad, investigadores del CSIC, también en la actualidad de funcionarios del Gobierno de Canarias y finalmente de investigadores del MEC para constituir una plantilla estable propia.

La creación del IAC en las islas Canarias respondía sin duda a la posibilidad de explotar su cielo de gran calidad con fines Astronómicos. Así en 1972, antes de la creación del IAC, el Imperial College de Londres pone en marcha un telescopio infrarrojo de 1,55 metros de apertura en el Observatorio del Teide, hoy conocido como Telescopio "Carlos Sánchez" en honor a este investigador del IAC fallecido en 1985.

La firma de los "Acuerdos Internacionales" para la explotación científica de los observatorios astronómicos del Teide y del Roque de los Muchachos en 1979 proporcionó el marco apropiado para consolidar la presencia de instrumentos de observación del cielo de la máxima calidad en Canarias. Los países firmantes de estos Acuerdos fueron en un principio el Reino Unido, Dinamarca, Suecia y España, a los que se han añadido Alemania, Francia, Holanda e Italia. En dichos

Acuerdos Internacionales destaca el hecho de que un 20% del tiempo de observación en los telescopios que se instalen en los observatorios de Canarias, deberán dedicarse a proyectos de observación para la (entonces incipiente) comunidad española que investiga en Astronomía administrándose dicho porcentaje por el IAC. Un 5% adicional del tiempo de observación se reserva para proyectos de ámbito cooperativo entre los países participantes en los acuerdos.

Destaca en aquel momento el traslado del Telescopio "Isaac Newton" de 2,5 metros de apertura desde Herstmonceux, al Sureste de Inglaterra, hasta el Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma, donde las condiciones de observación por la calidad del cielo le convierten en una herramienta enormemente productiva. Fruto de aquellas semillas, vinieron más tarde una gran cantidad de instalaciones de observación del cielo (telescopios solares, telescopios ópticos e infrarrojos de observación nocturna, telescopios Čerenkov para la detección de rayos gamma de muy alta energía, instrumentos de observación de la Radiación Cósmica de Fondo en la banda de radio, etc.).

Muy en paralelo a lo que sucedía en Canarias, el CSIC decide crear también en 1975 un centro de investigación en Granada denominado "Instituto de Astrofísica de Andalucía" (IAA). Inicialmente ubicado en el Palacio de La Madraza, antigua Universidad árabe.

En efecto, en 1972 la Comisión Nacional de Astronomía (CNA), órgano asesor del Gobierno español en temas de Astronomía, firma con la Sociedad Max-Planck de Alemania un convenio para la creación de un "Centro Astronómico Hispano-Alemán" (CAHA) que contempla la instalación de un observatorio en Calar Alto, en la Sierra de los Filabres y cerca de Sierra Nevada. En 1976 se pone en marcha el primero de una serie de telescopios en dicho observatorio, de 1,23 metros de apertura. Al igual que en Canarias, España se reserva un porcentaje de la utilización de los telescopios de Calar Alto, en este caso un 10% administrado por la propia CNA.

El IAA también crea su propio observatorio en Sierra Nevada, en la actualidad uno de los más altos en los que se realiza operación humana (su altitud es de 2.896 m), y cuya calidad del cielo en términos de vapor de agua precipitable, lo sitúan entre los más competitivos del mundo para la observación en el infrarrojo medio.

Finalmente, en 1982, el consorcio IRAM ("Institut de Radio-Astronomie Millimetrique") instala en Pico Veleta una antena de 30 m de diámetro para la observación del cielo en banda milimétrica, que complementa el interferómetro de "Plateau de Bure" operando a longitudes de onda similares en los Alpes. IRAM es a su vez un consorcio internacional participado por la Sociedad Max-Planck (MPG) por parte de Alemania, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS) por parte de Francia y el Instituto Geográfico Nacional (IGN) por parte de España.

Otro hecho de capital importancia para la Astronomía española fue la instalación en Villafranca del Castillo, cerca de Madrid, de una estación de seguimiento de satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA, de sus siglas en inglés) en 1977. Dicha estación, conocida popularmente como VILSPA, fue un ingrediente importante de la participación española en la ESA, Organismo Internacional del que España fue miembro fundador en 1975. Las actividades de ESA cubren todo el espectro de actividades civiles en el espacio, siendo su Programa Científico el único de obligada suscripción para todos sus estados miembros. A pesar de que el peso presupuestario de este programa en la ESA no alcanza en la actualidad el 15%, desde sus inicios fue una de las banderas de la Agencia, abonada por el éxito de sus misiones.

El "International Ultraviolet Explorer" (IUE) fue una de esas misiones, fruto de una colaboración con NASA y con el Reino Unido. IUE, que fue diseñado y construido para estar operando durante unos pocos años, terminó sus operaciones después de 19 años de éxitos. El Centro de Operaciones Científicas Europeo de IUE, lo más parecido a un observatorio en una misión de observación astronómica en el espacio, fue instalado en VILSPA.

En todos los casos (Canarias, Andalucía y Madrid) la presencia de investigadores internacionalmente reconocidos en los respectivos observatorios, ayudó de forma decisiva al crecimiento de la Astronomía española. Algunos astrónomos procedentes de otros países se quedaron en España y continuaron aquí una labor importantísima de investigación y formación. Otros, que regresaron a sus países de origen, contribuyeron sin embargo a formar nuevas generaciones de astrónomos profesionales, en un contexto y un ambiente internacional donde la calidad y la competencia eran y son la costumbre. Estas divisas afianzaron de forma muy importante el nivel de nuestros centros.

Ya más metidos en la década de los ochenta, las Universidades empezaron también a dar el salto. Aquellas donde la Astronomía ya formaba parte de su actividad docente e investigadora desde hacía años, crecieron en general ampliando su espectro de temas de investigación para incluir aspectos más cercanos al estudio Físico de los astros, y no solamente su posición (lo que se ha dado en llamar Astrofísica). En otras Universidades donde la Astronomía no existía, fueron nuevamente iniciativas de profesores universitarios las que terminaron fundando grupos de investigación, a menudo de tamaño modesto, pero igual de competitivos. Estos grupos Universitarios empezaron o bien muy cercanos a los estudios teóricos, o bien aprovechando las oportunidades de realizar observaciones astronómicas en los telescopios instalados en suelo español (o en el espacio) a través de los convenios correspondientes. Con el paso del tiempo la actividad de investigación y desarrollo en Astronomía desarrollada en las Universidades españolas difiere poco de la realizada en los Centros de investigación, existiendo además importantes colaboraciones entre ambas.

3. LA GRAN EXPANSIÓN

Las semillas que sembraron la Astronomía española durante los setenta y los ochenta crecieron en prácticamente todos los frentes posibles. Aunque sin una relación directa entre las distintas iniciativas, sí es cierto que hubo sinergias positivas. Así, el afianzamiento de los observatorios de Canarias y Calar Alto con la instalación de numerosos telescopios fruto de la colaboración internacional (ver Tabla 4), contribuyó sin duda a la creación de plazas de investigador en los Centros más cercanos a las mismas y también de forma indirecta en otros lugares, Universidades incluidas.

El IAC ha pasado con el tiempo a ser el mayor centro de investigación en prácticamente todas las disciplinas de la Astronomía en España y también un importante referente en Europa y el mundo. Su producción científica (ver Tabla 5) supera el 25% de la producción científica total de la Astronomía española, en línea con la cantidad de investigadores que contiene. El IAC es un centro de investigación en prácticamente todos los temas de Astronomía, pero entre los que domina la escena española cabe destacar la

Física Solar, la búsqueda y caracterización de exoplanetas y todo lo referente al diseño y desarrollo de telescopios e instrumentación óptica e infrarroja. La Física estelar, la Astronomía extragaláctica y la cosmología forman parte también del amplio espectro de temas en los que el IAC mantiene una importante actividad.

También el IAA ha experimentado un espectacular crecimiento, acelerado si cabe en la última década. En línea con este crecimiento, su producción científica no está lejos del 20% del total de la Astronomía española. También el IAA es un centro donde se trabaja en prácticamente todos los temas de Astronomía, pero sin duda los estudios del Sistema Solar es el área en que el IAA encabeza el esfuerzo en España. Otros centros del CSIC, de tamaño más modesto, se han ido abriendo camino en los últimos 12 años en Cantabria, Barcelona y Madrid, cubriendo también importantes áreas de la investigación en Astronomía moderna, como la Astronomía Infrarroja y Molecular, la Astrofísica Nuclear, la Cosmología, la Radioastronomía o la Astronomía con rayos X.

El Observatorio Astronómico Nacional (OAN) se ha convertido con el tiempo en un centro de referencia mundial en Radioastronomía. Al igual que el IAC y el IAA, además de una importantísima labor investigadora, el OAN lleva a cabo importantes proyectos de desarrollo tecnológico e instrumentación dentro del campo de la Radioastronomía.

El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), dependiente del Ministerio de Defensa, ha tenido desde siempre un protagonismo muy importante en el desarrollo de cargas útiles para misiones espaciales y en general en la instrumentación. Además de los equipos técnicos, el INTA tiene también un Laboratorio en Villafranca del Castillo, junto a la estación de la ESA, en la que se realiza sobre todo investigación en Astronomía y desarrollos relacionados con bases de datos. El INTA también comparte con el CSIC la titularidad del Centro de Astrobiología.

En paralelo a esto, la actividad investigadora en Astronomía también ha ido floreciendo en las Universidades, tanto las que poseían Cátedras de Astronomía, como en otras a las que investigadores en activo en esta disciplina han ido ensamblando grupos de investigación muy competitivos.

Una herramienta que ha tenido una gran influencia en el apoyo al crecimiento de los grupos de investigación en Astronomía han sido los Planes Nacionales de Investigación y Desarrollo. Durante largos años sin embargo, la Astronomía no tuvo un Programa Nacional propio y la financiación –más bien escasa– venía a través del Programa Sectorial de Promoción General del Conocimiento. Si bien ésta no era claramente la forma adecuada de financiar esta actividad, lo cierto es que el nivel de exigencia que había en dicho Plan, donde el criterio único para la financiación de la investigación era la calidad (independientemente del tema) curtió a los grupos y sentó las bases para que la calidad fuera la enseña de todos los proyectos en esta disciplina. Ya con el Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica en funcionamiento desde el año 2000, es muy de destacar que la evaluación de los proyectos que realiza la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva arroja una calificación generalmente muy alta de prácticamente todas las solicitudes a este programa.

Mención aparte merece el Programa Nacional de Investigación Espacial o de Espacio, según la época. Este Programa, por su peculiar temática, ha pasado por distintas fases, habiendo tenido en distintas etapas el INTA y el CDTI la encomienda de gestión. Sus objetivos han tenido siempre un fuerte énfasis, en lo que respecta a la Astronomía, hacia la contribución a misiones científicas espaciales, particularmente en misiones de la ESA. La explotación científica, obtenida como retorno de estas contribuciones por los grupos correspondientes, también ha formado parte de las prioridades de este Programa Nacional actualmente en manos de la Dirección General de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia, y que posee un equivalente enfocado para la industria en el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Desde su inicio, el Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica ha tenido cuatro objetivos fundamentales:

1. Investigación básica en Astronomía y Astrofísica.
2. Diseño y desarrollo de instrumentación astronómica.
3. Explotación científica de los recursos existentes.
4. I+D en tecnologías relacionadas con la Astronomía.

Uno de los retos de la Astronomía española ha sido el activar los objetivos 2 y 4, algo que se ha ido consiguiendo

en los últimos años, pero que todavía debe crecer más y diseminarse más entre distintos centros.

Pero sin duda ha sido en la última década donde la Astronomía española ha tenido, al amparo de los Planes Nacionales, su más espectacular expansión. Por un lado, se ha acometido la construcción de grandes infraestructuras que suponían un reto importantísimo para la capacidad de nuestro país. Cabe destacar aquí la antena de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes, diseñada y construida íntegramente en España, bajo el liderazgo del IGN. También es importante mencionar el cambio de estatus del Centro Astronómico Hispano Alemán, que en 2004 pasó a ser copropiedad al 50% de la Sociedad Max-Planck y el CSIC. Desde entonces, la Sociedad Calar Alto, AIE, coparticipada por ambos Organismos, es la encargada de mantener el observatorio en operación.

Pero el proyecto estrella en España es el Gran Telescopio Canarias (GTC). Se trata de un telescopio con un espejo primario segmentado de 10,4 metros de diámetro (en 36 piezas hexagonales de poco más de un metro de diámetro), cuya construcción está terminándose en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma. Cuando se concluya, el GTC será el mayor telescopio óptico del mundo, aportando un nuevo "ojo gigante" al cielo desde el hemisferio Norte. El proyecto GTC está participado por España, la Universidad de Florida y México, a través de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. La empresa pública Grantecan, S.A., formada por los Gobiernos español y canario, es la encargada de construir, caracterizar y operar este telescopio.

Hay que concluir este repaso por el camino seguido por la Astronomía española con posiblemente el hito más importante de su historia y que ha sido la adhesión al Observatorio Europeo Austral (ESO) en 2006. ESO es el mayor organismo de Astronomía terrestre del mundo, y aglutina a la mayoría de países europeos con actividad en este campo. La entrada de España en ESO ha sido una reivindicación científica de los investigadores en este campo desde hace mucho tiempo. En la creación de

la Sociedad Española de Astronomía (SEA) –sociedad de astrónomos profesionales a la que pertenecen más de tres cuartas partes de los astrónomos españoles– en 1992, ya se planteó esta adhesión como uno de los objetivos fundamentales, y no era ni de lejos la primera vez. En 1996, la asamblea de la SEA decidió apoyar sin reservas la construcción de GTC y la entrada en ESO. El Gobierno español decidió al poco tiempo que debía darse prioridad a la construcción de GTC, y en el Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e innovación tecnológica 2004-2007 se incluyó explícitamente la entrada de España en ESO como objetivo. Después de muchos intentos fallidos, en esta ocasión se contaba con el apoyo no sólo de los propios investigadores, sino también de la administración, y del propio convencimiento del Consejo de ESO de la necesidad de incorporar a España en su seno. Concluidas las negociaciones a finales de 2005, el Gobierno y las Cortes Españolas aprobaron la adhesión de España a ESO en 2006, que ha pasado así a ser el duodécimo Estado miembro de ESO (junto a Alemania, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Holanda, Italia, Portugal, Reino Unido, Suecia y Suiza).

4. LA ACTUALIDAD

4.1. Las Instituciones y los centros

En la actualidad la investigación en Astronomía ha proliferado en multitud de centros y Departamentos Universitarios. A través del Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica, se han financiado proyectos en un total de 26 organismos (Organismos Públicos de Investigación, Consorcios, Fundaciones y Universidades), con participación de más de 40 centros distintos. A éstos habría que añadir algunos más en los que han desarrollado o desarrollan su investigación, al menos en parte, otras personas al amparo de dichos proyectos. En una gran mayoría de estos casos, el encadenamiento de proyectos financiados por el Plan Nacional en régimen de concurrencia competitiva ha sido constante, lo que indica la presencia de grupos de investigación bien establecidos (Tabla 1).

TABLA 1: ORGANISMOS, CON SUS CORRESPONDIENTES CENTROS, EN LOS QUE EL PROGRAMA NACIONAL DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA HA FINANCIADO PROYECTOS DESDE SU CREACIÓN EN 2000 HASTA 2006

Organismo	Centro/Departamento
Instituto de Astrofísica de Canarias	Instituto de Astrofísica de Canarias
Consejo Superior de Investigaciones Científicas	Instituto de Astrofísica de Andalucía Instituto de Estructura de la Materia Instituto de Ciencias del Espacio Instituto de Física de Cantabria (mixto con la Universidad de Cantabria) Instituto de Física Aplicada
Instituto Geográfico Nacional	Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial	Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental Cargas útiles e instrumentación Centro de Astrobiología (mixto con el CSIC)
Universidad de Barcelona	Dep. Astronomía y Meteorología Dep. Química Orgánica
Universidad Complutense de Madrid	Dep. Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera Dep. Astronomía y Geodesia
Universidad de Valencia	Dep. Astronomía y Astrofísica Observatorio Astronómico Instituto de Ciencia de Materiales
Universidad Autónoma de Madrid	Dep. Física Teórica
Universidad de Granada	Dep. Física Teórica y del Cosmos
Universidad de Cantabria	Dep. Física Moderna Instituto de Física de Cantabria Dep. Física Aplicada
Universidad de Santiago de Compostela	Observatorio Ramón María Aller Dep. Física Aplicada
Universidad Politécnica de Cataluña	Dep. Física Aplicada Dep. Física e Ingeniería Nuclear Dep. Física
Universidad de Jaén	Sección de Astronomía
Real Instituto y Observatorio de la Armada	Institut d'Estudis Espacials de Catalunya
Institut d'Estudis Espacials de Catalunya	Dep. Física, Ing. de sistemas y Teo. Señal Dep. Física Aplicada Dep. Matemática aplicada
Universidad de Alicante	Dep. Matemática Aplicada fundamental Dep. Matemática Aplicada a la ingeniería Dep. Ciencias Navegación y de la Tierra
Universidad de Valladolid	Dep. de Física Dep. de Física Aplicada I Dep. Física y Arquitectura de Computadores
Universidad de A Coruña	Dep. Física Aplicada
Universitat de les Illes Balears	Dep. de Física Aplicada
Universidad del País Vasco	Dep. de Física Aplicada
Universidad Miguel Hernández	Dep. de Física Aplicada
Universidad de Alcalá de Henares	Dep. de Física Aplicada
Universidad de Vigo	Dep. Ingeniería informática y Matemáticas
Universitat Rovira i Virgili	Dep. Física Aplicada
Universidad Politécnica de Valencia	
Institut de Radioastronomie Millimetrique	

4.2. Los nuevos temas

Los temas en los que se realiza investigación de calidad en España, cubren prácticamente todo el espectro temático de la Astronomía moderna. Como ha ido ocurriendo en todos los países de nuestro entorno, la Astronomía ha pasado a ser una ciencia definida por sus objetivos científicos más que por sus herramientas. Progresivamente, los grupos de investigación y los propios investigadores individuales han pasado a ir utilizando –y dominando– varias técnicas para obtener un enfoque más completo de los objetos celestes que se estudian.

Así la tradicional Astronomía de Posición ha pasado a ser, además de un tema básico, una herramienta usada en Mecánica Celeste, pero también en el estudio de los movimientos de las estrellas y de la formación de nuestra galaxia. A las observaciones ópticas tradicionales, realizadas con telescopios convencionales, se les ha añadido una dimensión "física", mediante sofisticada instrumentación que permite descomponer la luz recibida en longitudes de onda (obteniendo espectros), viendo sus variaciones temporales hasta escalas minúsculas, o incluso estudiando la polarización de dicha luz.

A su vez estas técnicas se han ido ampliando a todo el rango del espectro electromagnético, desde las ondas de Radio, Milimétricas, Submilimétricas, Infrarrojo Lejano, Infrarrojo Medio e Infrarrojo Cercano, Óptico, Ultravioleta, Rayos X, Rayos Gamma y Rayos Gamma de muy alta energía. Dado que la envoltura terrestre es opaca a la mayoría de estas radiaciones, muchos de los observatorios están en el espacio. Desde tierra se puede observar cómodamente en ondas de Radio, en el Infrarrojo Cercano, y en el Óptico. En lugares particularmente altos y secos, hay también ventanas en el Infrarrojo Medio, la banda Milimétrica y Submilimétrica. El Infrarrojo Lejano, el Ultravioleta, los Rayos X y los Rayos Gamma son hoy en día competencia del espacio. Los Rayos Gamma de muy alta energía, se pueden capturar indirectamente desde tierra, gracias a la cascada de luz (llamada luz Čerenkov) que producen al penetrar en la atmósfera. En un futuro no lejano, además de recibir y analizar luz en todas las bandas del espectro electromagnético, habrá detectores de partículas elementales como neutrinos u observatorios de ondas gravitatorias.

La cantidad de información que se puede recoger en la actualidad sobre los objetos celestes mediante la observación

remota, permite por tanto determinar no sólo su posición y velocidad en el cielo, sino también el estudio de los fenómenos físicos que ocurren en el mismo, sus abundancias químicas e incluso es previsible que se puedan observar trazadores directos de actividad biológica. De ahí la proliferación, en España y en el resto del mundo, de denominaciones como Astrofísica, Astroquímica (o Cosmoquímica) o más recientemente Astrobiología. Estas disciplinas son por tanto aspectos de la Astronomía que han prosperado gracias al progreso en las técnicas de observación, la instrumentación y la capacidad de los investigadores para interpretar y entender estas observaciones.

Hay otra componente fundamental entre las herramientas de estudio del Cosmos y que también ha tenido un importante afianzamiento en España, y es la exploración "in situ" de cuerpos del Sistema Solar. El envío de sondas que acaban orbitando alrededor de planetas del Sistema Solar o sus lunas, o que incluso acaban posándose en su superficie es otra técnica de estudio de los cuerpos celestes más próximos que ha permitido realizar verdaderos estudios geológicos o meteorológicos fuera de la tierra.

Armados con estas herramientas, los Astrónomos españoles están abordando estudios del Cosmos de toda naturaleza. Sirva como ejemplo el siguiente listado incompleto, que se cita más para ilustrar el tipo de investigación que se hace que para dar un compendio exhaustivo de todas las actividades que tienen lugar en los grupos españoles.

- Atmósferas planetarias de cuerpos del Sistema Solar.
- Estudio de Cometas y Asteroides.
- Estudio del interior solar (mediante, por ejemplo, heliosismología), de la fotosfera y de la corona del Sol.
- Viento solar y medio interplanetario.
- Formación de estrellas y medio interestelar.
- Estructura estelar, últimos estadios de la vida de una estrella.
- Novas, Supernovas y restos de Supernova.
- Enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros en sistemas binarios.
- Búsqueda y caracterización de enanas marrones y planetas fuera del sistema solar.
- Estructura y cinemática de nuestra Galaxia y de galaxias externas.

- Formación estelar en galaxias externas.
- Galaxias activas y cuásares.
- Formación y Evolución de galaxias.
- Estructura a gran escala en el Universo: cúmulos, supercúmulos y vacíos.
- La Radiación Cósmica de Fondo, parámetros cosmológicos.
- El Universo primitivo, inflación.

4.3. Los recursos humanos

Es difícil precisar el número total de investigadores en Astronomía en España en la actualidad, entre otras cosas por las fronteras "difusas" que existen con distintas áreas de la Física, la Matemática, la Química e incluso la Geología y la Biología. Por un lado hay que contabilizar la plantilla de investigadores del CSIC que trabajan en Astronomía y Ciencias del Espacio. Similarmente los profesores universitarios del área de Astronomía y Astrofísica, así como aquellos que estando en áreas próximas (como Física Teórica o Matemática aplicada) realizan su labor investigadora en Astronomía y Astrofísica. Además de la Universidad y el CSIC, otros Organismos aportan investigadores de sus plantillas a la investigación en Astronomía. Tal es el caso del IAC, el OAN (perteneciente al IGN del Ministerio de Fomento) y el INTA del Ministerio de Defensa.

En los últimos años ha sido importantísimo el crecimiento en el número de investigadores en activo, a través de los programas I3P en el CSIC, y "Juan de La Cierva" y "Ramón y Cajal" en el MEC. Al igual que en otras áreas de la investigación en España, esto ha supuesto un cambio importante en el panorama, al incorporar a los equipos investigadores personal joven, a la par que muy competente.

Finalmente, el número de investigadores en formación ha crecido también espectacularmente en los últimos años, y los centros españoles cuentan en nuestros días con más de un centenar de ellos en activo.

Las estimaciones apuntan a que incluyendo los investigadores en formación, hay más de 500 profesionales investigando activamente en Astronomía en centros españoles. En este conteo no se incluyen los investigadores adscritos a centros internacionales o extranjeros, como ESA o los Organismos que operan los telescopios en suelo español.

4.4. La enseñanza de la Astronomía en la Universidad

En el contexto de la enseñanza Universitaria, la Astronomía forma parte principalmente de las licenciaturas de Física y Matemáticas, aunque no en todas las Universidades. Las asignaturas relacionadas con la Astronomía están impartidas habitualmente (aunque no siempre) por profesores adscritos al área de conocimiento Universitaria de "Astronomía y Astrofísica".

A diferencia de otros países europeos, no existe sin embargo una licenciatura en "Astronomía" o en "Física y Astronomía". Es de destacar que en países como el Reino Unido o Alemania, las Universidades (particularmente las más nuevas) se han dotado a menudo de una plantilla de profesores de Astronomía, con lo que la oferta docente ha pasado a incluir esta disciplina. A menudo esto ha mantenido el nivel de demanda por parte de los alumnos en los estudios de Física o Matemáticas.

En España, sin embargo, los conocimientos en Astronomía no se han considerado de suficiente entidad dentro de las Licenciaturas de Física o Matemáticas para merecer ser troncales en los planes de estudio vigentes. En el mejor de los casos, algunas Universidades han incluido asignaturas de Astronomía como obligatorias. En paralelo, las asignaturas troncales que formalmente están capacitados para impartir los Profesores del área de Astronomía y Astrofísica son bastante limitadas en su ámbito natural como es la Licenciatura en Física. Así, los Profesores de esta área pueden impartir Física General en varias Licenciaturas e Ingenierías, pero incomprensiblemente no pueden impartir esta asignatura en la Licenciatura en Física.

A pesar de esto, la demanda que hay entre los jóvenes universitarios de conocimientos en Astronomía, ha motivado la existencia de especialidades y orientaciones relacionadas con esta disciplina, y que acostumbran a recibir una importante fracción de las exiguas cifras de alumnos de la licenciatura de Física. En particular, se está haciendo un importante esfuerzo en los programas de postgrado y doctorado. Las Universidades Complutense y Autónoma de Madrid ofertan un Máster de Astrofísica conjunto, y también la Universidad de La Laguna. Otras Universidades han incluido una fuerte componente de Astronomía en programas de Máster o Doctorado en Física o temas afines. En la Tabla 2 se da un listado de dichos programas, en marcha a principios de 2007.

TABLA 2: UNIVERSIDADES ESPAÑOLAS CON PROGRAMAS DE POSGRADO QUE CONTIENEN UNA COMPONENTE IMPORTANTE DE ASTRONOMÍA

Universidad	Tipo	Nombre
Complutense y Autónoma de Madrid	Máster y Doctorado	Máster en Astrofísica
La Laguna	Máster	Máster en Astrofísica
Barcelona	Máster Europeo	Máster en Astrofísica, Física de Partículas y Cosmología
Granada	Máster	Máster en Física y Matemáticas (incluye una orientación Astrofísica)
Valencia	Máster	Máster en Física Avanzada (incluye una orientación en Astrofísica)
Illes Balears	Máster	Máster en Física
Cantabria	Doctorado	Física y Ciencias de la Tierra

Un producto fundamental de esta actividad formativa es sin duda el número de doctores que todos los años realizan su tesis doctoral en temas relacionados con la Astronomía. Nuevamente, debido a las fronteras difusas con la Física y la Matemática es difícil obtener un cálculo estricto de este número, pero una estimación aproximada da cuenta de que se leen alrededor de 25 tesis doctorales por año. Esta cifra es en la actualidad todavía algo inferior al número total de becas de Formación de Personal Investigador que inyectan los Programas Nacionales de Astronomía y Astrofísica y de Espacio, más otros agentes, por lo que es de esperar que este número esté creciendo.

4.5. Las herramientas para la investigación en Astronomía

En la actualidad los investigadores en Astronomía radicados en centros españoles, disponen de acceso a una completa batería de observatorios astronómicos. En primer lugar, y gracias a la pertenencia de España a ESA y ESO, se dispone de acceso en régimen de concurrencia competitiva a observatorios espaciales como el Hubble Space Telescope (óptico), XMM-Newton (rayos X) e INTEGRAL (rayos γ), así como a los telescopios que ESO mantiene en operación en la actualidad y que se recogen en la Tabla 3.

TABLA 3: TELESCOPIOS OPERADOS POR ESO EN LA ACTUALIDAD Y A LOS QUE ESPAÑA TIENE ACCESO EN RÉGIMEN DE CONCURRENCIA COMPETITIVA

Lugar	Telescopio	Descripción
Cerro Paranal	VLT-UT1 (Antu)	Telescopio óptico-infrarrojo 8,2 m
	VLT-UT2 (Kueyen)	Telescopio óptico-infrarrojo 8,2 m
	VLT-UT3 (Melipal)	Telescopio óptico-infrarrojo 8,2 m
	VLT-UT4 (Yepun)	Telescopio óptico-infrarrojo 8,2 m
	VLTI	Interferómetro, que puede usar las UT anteriores más 4 telescopios auxiliares móviles de 1,8 m
	VST	Telescopio óptico de gran campo
	VISTA	Telescopio infrarrojo de gran campo
La Silla	3,6 m	Telescopio óptico de 3,6 m
	NTT	Telescopio óptico-infrarrojo de 3,5 m
	2,2 m	Telescopio óptico de 2,2 m
Llano de Chajnantor	APEX	Telescopio milimétrico y submilimétrico de 12 m

En suelo español, la mayoría de los observatorios se hallan agrupados dentro de las llamadas Instalaciones Científico-Técnico Singulares, de las cuales hay 5 dedicadas en su integridad a la Astronomía: el Centro Astronómico de Yebes (CAY), la antena de 30 metros de Pico Veleta del Institut

de Radio Astronomie Millimetrique (IRAM), el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), el Observatorio del Teide (OT), el Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto (CAHA) y el Gran Telescopio Canarias (GTC) (Tabla 4).

TABLA 4: INFRAESTRUCTURAS CIENTÍFICO-TÉCNICO SINGULARES DE ASTRONOMÍA EN ESPAÑA

ICTS	Institución(es) de la(s) que depende	Instalaciones que contiene
Centro Astronómico de Yebes (CAY)	Instituto Geográfico Nacional	Radiotelescopio de 14 m Radiotelescopio de 40 m
Centro Astronómico Hispano Alemán (CAHA)	Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Sociedad Max-Planck	Telescopio de 3,5 m Telescopio de 2,2 m Telescopio de 1,23 m (no operativo) Telescopio Schmidt (no operativo)
Gran Telescopio Canarias (GTC)	Grantecan, S.A. (co-participada por los Gobiernos de España y Canarias)	Telescopio de 10,4 m Telescopio Solar SST 1 m
Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM)	Instituto de Astrofísica de Canarias	Telescopio Solar DOT 0,45 m Telescopio Meridiano Carlsberg Telescopio Mercator 1,2 m Telescopio Robótico Liverpool 2 m Telescopio Jacobus Kapteyn 1 m (no ofrecido) Telescopio Isaac Newton 2,5 m Telescopio Nazionale Galileo 3,5 m Telescopio William Herschel 4,2 m Telescopio Cerenkov MAGIC
Observatorio del Teide (OT)	Instituto de Astrofísica de Canarias	Telescopio Solar VTT 0,7 m Telescopio Solar Themis 0,9 m Telescopio Solar Gregor 1,5 m Telescopio Carlos Sánchez 1,5 m Telescopio IAC80, 0,8 m
Institute de Radioastronomie Millimetrique (IRAM)	Instituto Geográfico Nacional	Radiotelescopio Milimétrico 30 m

A estas instalaciones hay que añadir otros observatorios que pertenecen a instituciones determinadas, como por ejemplo el Observatorio de Sierra Nevada del Instituto de

Astrofísica de Andalucía, que dispone de dos telescopios ópticos de 0,9 y 1,5 metros, o una multitud de telescopios robóticos ubicados en distintos lugares.

Otro ingrediente muy importante de la investigación en Astronomía moderna es todo lo que tiene que ver con eficiencia, que en este caso se puede desglosar en dos componentes: la Astronomía numérica –que requiere en general la utilización de grandes recursos de computación– y el archivo de datos, cuya versión más moderna se conoce con el nombre de "Observatorio Virtual". En el primero de estos campos existe en España una pujante actividad en prácticamente todos los temas, desde el estudio de la estructura del Sol, las galaxias o la Cosmología. Los códigos numéricos que se están desarrollando –por ejemplo para simulaciones– y que permiten estudiar problemas muy complejos imposibles de abordar por otras técnicas, hacen trabajar siempre al límite los recursos de computación de que se dispone. Así está teniendo cada vez un peso mayor la utilización del computador "Mare Nostrum" en muchos proyectos de Astronomía, como también lo tienen equipos distribuidos más modestos pero dedicados en su totalidad a proyectos concretos.

En cuanto al Observatorio Virtual, la comunidad Española se ha sumado al esfuerzo internacional, amparado por la International Virtual Observatory Alliance, por el que todos los datos recogidos por todos los telescopios terrestres y espaciales se archivan electrónicamente en unos determinados formatos que facilitan su utilización posterior por la comunidad. Este importante esfuerzo está empezando a dar sus primeros frutos científicos, ya que permite que desde cualquier rincón del mundo un investigador pueda acceder de forma inmediata a datos utilizables sobre un determinado astro de los que ni tan siquiera conocía su existencia.

4.6. Producción científica: las publicaciones

El número de publicaciones científicas en Astronomía ha crecido en paralelo al despliegue de los grupos de investigación. En la Figura 1 se muestra el espectacular crecimiento de las publicaciones internacionales recogidas en el *ISI Web of Science*, desde 1973 hasta 2006, año en el que España se acerca ya a las 900 publicaciones catalogadas como Astronomía y Astrofísica.

En el ISI Essential Science Indicators, se recogen dentro de la categoría "Space Sciences" un total de 6.149 publicaciones de autores en España durante el período que va del 1 de enero de 1996 a 31 de diciembre de 2006.

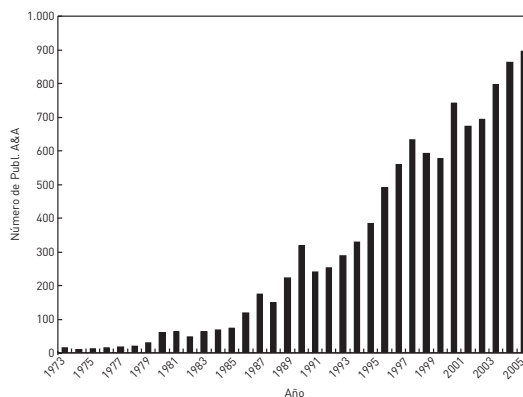


Figura 1. Número de publicaciones ISI con autor en España dentro de la categoría de Astronomía y Astrofísica.

Esas publicaciones han recogido un total de 77.538 citas, con una media de 12,61 citas por artículo. España es el octavo mayor contribuyente a las publicaciones de esta categoría, después de Estados Unidos de América, Alemania, Inglaterra, Francia, Italia, Rusia y Japón. En citas, España ocupa el décimo lugar por detrás de los mismos países a excepción de Rusia, pero también detrás de Canadá y Australia. Es interesante comparar estos números con los que comprenden todas las áreas científicas, en los que con 263.469 publicaciones y 2.200.683 citas recibidas durante el mismo período de 11 años, España ocupa el décimo lugar en cuanto a países generadores de publicaciones científicas y el undécimo lugar como receptor de citas.

En este notable incremento de la producción científica de la Astronomía española a lo largo de las últimas décadas, tampoco hay que olvidar que la investigación en España ha experimentado un importantísimo crecimiento general. De las poco más de 1.000 publicaciones a principios de la década de los setenta, se ha pasado a casi 40.000 publicaciones en 2006. Aun así, es importante destacar (como se muestra en la Figura 2) que las publicaciones en Astronomía y Astrofísica han crecido a un ritmo mucho mayor que las de otras disciplinas. La fracción de publicaciones en Astronomía y Astrofísica con autores españoles ha subido desde el 0,5% en los setenta hasta alrededor del 2,5% en los últimos años.



Así, mientras que la producción española se cifra en el 3,18% de la producción mundial en el período 2001-2005, esta fracción llega hasta el 6,1% para el caso de las ciencias del espacio en el mismo período.

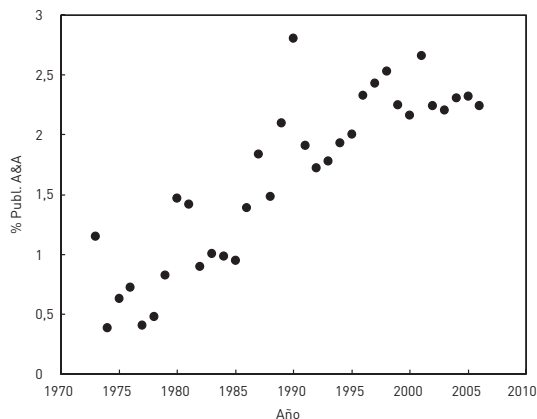


Figura 2. Porcentaje de publicaciones ISI con autor en España dentro de la categoría de Astronomía y Astrofísica.

Hemos analizado también la contribución de las distintas instituciones del sistema español de I+D a estas publicaciones en el momento presente. Para ello, nos hemos restringido a los años 2004, 2005 y 2006, y hemos excluido las publicaciones en revistas más afines a otras áreas.

En la Tabla 5 se presentan los resultados para aquellas instituciones con más de 10 publicaciones recogidas por ISI en dicho trienio. Los científicos del CSIC son los que más publicaciones tienen globalmente, seguidos por los del Instituto de Astrofísica de Canarias. En realidad entre las publicaciones del IAC hay también 66 firmadas por personal de dicha Institución y que pertenece al CSIC. Se puede ver también en esta tabla que las Universidades contribuyen de forma muy importante a la producción científica en Astronomía en España, con un total conjunto de más de 500 publicaciones en este trienio. Otras instituciones españolas de investigación y desarrollo, como el Observatorio Astronómico Nacional, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial o el Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, también tienen contribuciones muy significativas.

TABLA 5: PUBLICACIONES ISI EN ASTRONOMÍA, DURANTE EL TRIENIO 2004-2006 EN DISTINTAS INSTITUCIONES ESPAÑOLAS DE I+D (SÓLO SE MUESTRAN LAS QUE TIENEN MÁS DE 10 PUBLICACIONES)

Organismo	Publicaciones
Consejo Superior de Investigaciones Científicas	500
Instituto de Astrofísica de Canarias	474
Universitat de Barcelona	108
Universitat de València	79
Universidad de La Laguna	75
Universidad Complutense de Madrid	67
Universidad de Cantabria	55
Universitat Politècnica de Catalunya	54
Institut d'Estudis Espacials de Catalunya	48
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial	47
Universidad Autónoma de Madrid	44
Observatorio Astronómico Nacional	42
Universidad de Alicante	40
Universitat Autònoma de Barcelona	35
Universidad de Jaén	33
Universidad de Granada	32
Universitat de les Illes Balears	22
Universidad de Santiago de Compostela	15
Universidad del País Vasco	12
Universidad de Extremadura	12
Universidad de Valladolid	12
Universidad de Vigo	11

4.7. Producción Tecnológica

Otro importante indicador de la actividad de la Astronomía española es su creciente implicación y liderazgo en desarrollos tecnológicos relacionados con esta disciplina. A diferencia de otras disciplinas, la mayoría de los instrumentos que se usan en Astronomía para efectuar las mediciones científicas son en realidad prototipos para un solo uso. Aunque obviamente en un telescopio existen componentes que pueden comprarse a proveedores especializados, cada equipo requiere un diseño y desarrollo único y –salvo excepciones– irrepetible. La implicación de este hecho es que los avances importantes en el conocimiento del Universo vienen precedidos de un importante esfuerzo en la concepción, diseño, desarrollo y construcción de nuevos instrumentos. Así, los centros más competitivos de la Astronomía en el mundo,

acostumbran a combinar la actividad investigadora con un importante esfuerzo en desarrollo, al amparo de equipos que combinan investigadores y técnicos.

Durante los primeros años del desarrollo de la Astronomía en España, no se sintió en exceso la necesidad de acometer este tipo de labor de producción tecnológica, gracias a que la incipiente comunidad de investigadores en Astronomía en España disponía de acceso suficiente a infraestructuras en suelo español o en el espacio. Con el paso del tiempo y el crecimiento de la actividad, la necesidad de desarrollar instrumentación propia se fue haciendo patente. No hay que olvidar que el esfuerzo que requiere este tipo de actividad es muy alto, tanto en términos de financiación como de dedicación de personal –particularmente personal técnico–, y que los réditos científicos de estos desarrollos sólo se visualizan a medio o largo plazo.

Quizás por la pertenencia de España a la ESA desde su fundación y por la existencia de un Programa Nacional de Investigación Espacial, la participación en instrumentación científica para misiones espaciales cuenta con una actividad más dilatada y extendida que su equivalente para observatorios terrestres. En la Tabla 6 se da un listado de las misiones espaciales de Astronomía (incluyendo tanto las de observación remota como las de exploración científica *in-situ*) de la ESA en las que los centros españoles de I+D en España han tenido participación. Hay que destacar dos hechos: que la calidad y relevancia de estas contribuciones ha ido creciendo con el tiempo y que en la actualidad los centros españoles participan en todas las misiones científicas de la ESA. Solamente en un caso un español ha sido investigador principal de un instrumento embarcado: el OMC (Optical Monitor Camera) en INTEGRAL.

TABLA 6: CONTRIBUCIONES DE LOS CENTROS ESPAÑOLES DE I+D A MISIONES DEL PROGRAMA CIENTÍFICO DE LA AGENCIA EUROPEA DEL ESPACIO, YA LANZADAS O EN FASE DE CONSTRUCCIÓN

Misión	Objetivos	Contribución española
Hipparcos	Astrometría	Catálogo de entrada
SOHO	Observatorio del Sol	Instrumentos CEPAC y GOLF
ISO	Observatorio Infrarrojo	Instrumento ISOPHOT
XMM-Newton	Observatorio de rayos X	Survey Science Centre
INTEGRAL	Observatorio de rayos γ	Instrumentos IBIS, JEM-X, SPI y OMC
Mars Express	Orbitador de Marte	Instrumento PFS
Rosetta	Misión al cometa CG	Instrumentos OSIRIS y GIADA
Huygens	Descenso en Titán	Instrumento HASI
Venus Express	Orbitador de Venus	Instrumentos PFS y VIRTIS
LISA-PF	Caída libre	LPF Technology Package
Planck	Fondo Cósmico de Microondas	Instrumento LFI
Herschel	Observatorio Infrarrojo Lejano	Instrumentos PACS, SPIRE e HIFI
JWST	Observatorio Infrarrojo Cercano	Instrumentos NIRSPEC y MIRI
BepiColombo	Orbitadores en Mercurio	Instrumentos BELA y MIXS

En cuanto a la instrumentación para telescopios terrestres, aunque la actividad ha tenido un arranque algo más prolongado, el tema está en ebullición en la actualidad. Se han construido instrumentos de observación como AL-FOSC, ALBIREO o LIRIS que están en operación en distintos telescopios. Frente al reto que supone la explotación del Gran Telescopio Canarias (GTC), España ha liderado tam-

bién el diseño y desarrollo de tres instrumentos punteros: ELMER, OSIRIS y EMIR, los dos primeros operando en el óptico y el último en el infrarrojo cercano.

En el campo de la Astronomía milimétrica y la Radioastronomía son muy de destacar también los desarrollos de amplificadores HEMT en el Observatorio Astronómico Na-

cional así como las contribuciones en especie que España está realizando al proyecto ALMA, fruto del trabajo en el mismo centro y en el CSIC. La participación española en el interferómetro milimétrico/submilimétrico ALMA merece un comentario adicional, ya que España se sumó a este proyecto ya en 2002, anteriormente a la entrada en ESO. ALMA es en la actualidad un proyecto en construcción fruto de la colaboración entre 3 agencias: ESO por Europa, el National Radio Astronomy Observatory por Estados Unidos y Canadá y el National Astronomical Observatory por Japón. El comienzo de sus operaciones científicas está previsto para 2012 y desde 2002 España está contribuyendo de forma muy importante a su fase de construcción.

Pero sin duda los mayores retos tecnológicos para la Astronomía española han venido de la mano de la concepción, diseño, desarrollo y construcción de las grandes infraestructuras en sí. En particular, la antena de 40 metros del Centro Astronómico de Yebes y el telescopio óptico-infrarrojo de 10,4 metros de diámetro GTC en el Observatorio del Roque de los Muchachos han supuesto una auténtica aventura para todo el sistema español. Ambas instalaciones están culminando su construcción o caracterización y a la espera de comenzar a operar científicamente en un futuro muy próximo.

Todas estas actividades de desarrollo tecnológico en los centros españoles de Astronomía, han ido en paralelo a un crecimiento de la actividad en la industria. La estrecha relación entre los centros de I+D y la industria ha sido y es la clave para la realización de estos ambiciosos proyectos. La industria espacial, de comunicaciones o la muy directamente involucrada en proyectos de Astronomía han contribuido de forma sustancial a los instrumentos de observación y a la vez han adquirido unas capacidades que le permitirán abordar otros proyectos todavía más ambiciosos en el futuro.

5. LECCIONES APRENDIDAS

El importante despegue de la Astronomía en España en las últimas décadas, ha situado esta rama de la investigación en los primeros lugares entre todas las ramas del saber en nuestro país. Coincidiendo con la entrada de España en ESO, y junto a la entrada en funcionamiento de grandes

infraestructuras diseñadas y construidas por España, como GTC, se puede afirmar que la Astronomía española ha alcanzado su madurez. En todos los aspectos, por tanto, esta aventura se puede considerar culminada con éxito, siempre y cuando esto no se considere como un punto final sino más bien como un punto de partida.

Si la ciencia actual está totalmente globalizada, gracias a que el intercambio de información entre investigadores de todo el mundo se realiza de forma instantánea, en el caso de la Astronomía esta globalización viene motivada por otro factor adicional que es el elevadísimo coste de las infraestructuras que se necesitan para el futuro. Esto obliga a planificar el futuro de forma coordinada con otros países, óptimamente dentro de nuestro contexto Europeo natural.

Así, una serie de agencias financieras de la Astronomía europea (entre ellas el Ministerio de Educación y Ciencia de España) se han unido en una Red de tipo ERA-NET llamada ASTRONET, cofinanciada por la Comisión Europea, con el objetivo principal de determinar cuáles van a ser los objetivos científicos de la Astronomía en las próximas dos décadas y cuáles son las infraestructuras necesarias para poder conseguirlos. En el momento de escribir este artículo (marzo de 2007), ASTRONET ha concluido el primero de estos pasos, identificando los grandes objetivos científicos. En 2008 se espera contar con una "hoja de ruta" de cara a priorizar la construcción de las infraestructuras que Europa necesita para mantener su perfil.

No es sorprendente que los dos proyectos en tierra que aparecen como más necesarios sean un telescopio europeo extremadamente grande en el óptico e infrarrojo (E-ELT) y el Square Kilometre Array (SKA), ya que ambos fueron también priorizados por el European Science Forum for Research Infrastructures (ESFRI) en el área de Astronomía. El E-ELT es un proyecto que forma parte de los objetivos inmediatos de ESO, y se ha empezado ya una fase de diseño detallado que se espera concluir en 2009. Se trata de un telescopio de unos 40 m de diámetro cuya ubicación se va a discutir también en un futuro próximo y para el que España ofrece el ORM. SKA es un proyecto global, con contribuciones de todos los continentes, y que consiste en un conjunto de antenas sumando un kilómetro cuadrado de área, y distribuidas en multitud de ubicaciones para poder observar el cielo en ondas de radio centimétricas

en modo interferométrico. Los costes estimados de ambos proyectos están en la escala de los mil millones de euros, algo claramente inalcanzable ni por un solo país europeo ni siquiera por pequeños consorcios entre varios.

En el espacio, la ESA también ha fijado sus objetivos científicos a largo plazo, mediante el programa Cosmic Vision 2015-2025. En estos momentos, la ESA ha abierto la primera llamada para misiones que implementen dichos objetivos, esperándose los primeros lanzamientos alrededor de 2017 ó 2018.

Echando la vista atrás y analizando con un poco de sentido crítico lo ocurrido en estas décadas con la Astronomía en España, queremos ofrecer unas pocas reflexiones que podrían ser de utilidad de cara al futuro desarrollo de esta disciplina en nuestro país:

- La planificación a largo plazo es fundamental. Los larguísimos tiempos de desarrollo que requieren las infraestructuras en Astronomía, obligan a que se estudien y decidan los objetivos y estrategias al menos a 10 años vista (preferiblemente más), lo cual es obviamente muy superior al ciclo de vigencia de los Planes Nacionales. Esta planificación debe seguir un ejercicio de prospectiva serio, con participación de los propios investigadores, pero también de paneles de expertos internacionales.
- Deben planificarse las actuaciones teniendo en cuenta el contexto nacional, europeo y mundial. No tendría sentido a día de hoy plantearse la construcción de ninguna infraestructura en Astronomía sin tener en cuenta

las que están en consideración por otros países con los que compartimos objetivos, por ejemplo en ESA y ESO.

- Deben tomarse medidas que incentiven la mejora de la calidad de la investigación en Astronomía. A pesar de los impresionantes números en producción científica que arroja el balance actual de la Astronomía Española, no hay un liderazgo de calidad suficiente. Por ejemplo, no hay ningún artículo liderado por investigadores en centros españoles y que esté entre los 100 más citados del área en los últimos 10 años según el ISI Essential Science Indicators (de hecho hay que ir hasta el lugar 203 para encontrar el primer artículo con primer autor en un centro español). Teniendo en cuenta que España produce más del 6% del total de los artículos, éste es un indicador de una carencia importante.
- Debe mejorarse muy sustancialmente el apoyo a los proyectos de desarrollo tecnológico, concretamente los de instrumentación científica. El hecho de que sólo en un instrumento de una misión científica de la ESA, el investigador principal haya sido español es un fiel reflejo de las dificultades con las que se deben enfrentar nuestros grupos para este tipo de aventuras. Las limitadísimas plantillas de personal técnico y de apoyo en Centros y Departamentos, así como la ausencia de una carrera profesional para este tipo de personal, hacen que sea prácticamente imposible competir en igualdad de condiciones con nuestros colegas europeos en el liderazgo de proyectos instrumentales. A ello hay que añadir la rigidez administrativa a la que se ven sometidas nuestras instituciones con una falta de flexibilidad y capacidades que dificulta aún más asumir ese liderazgo.

Recibido: 1 de junio de 2007

Aceptado: 10 de julio de 2007

