



# AMS-02: LA ODISEA DE UN DETECTOR DE RAYOS CÓSMICOS

**E**l 16 de mayo de 2011, a las 8:56 a.m. (EDT), despegó desde el Kennedy Space Center (KSC, Cabo Cañaveral, Florida), rumbo a la Estación Espacial Internacional (ISS), la misión espacial STS-134. Esta misión ha sido la última realizada por el trasbordador Endeavour de la NASA (National Aeronautics Space Administration), a bordo del cual ha viajado el instrumento AMS-02 (Espectrómetro Magnético Alpha). El acoplamiento del trasbordador a la Estación Espacial se produjo el día 18 de mayo a las 6:15 a.m. A las 2:30 a.m. del día 19 de mayo se completaba la operación de trasvase del instrumento AMS-02 a su posición definitiva en el eje S3 de la ISS, donde permanecerá hasta la desorbitación de ésta en el año 2028, e iniciaba sin incidencias su operación y recogida de datos científicos. La misión STS-134 concluía felizmente el 1 de junio a las 2:34 a.m. con el aterrizaje del Endeavour en la pista del KSC.

**POR MANUEL AGUILAR**

Lanzamiento de Endeavour en  
la Misión STS-134.

\*<http://theatlantic.com>

## AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

Es innegable que casi todo lo que conocemos acerca del Universo se basa en la observación y estudio de la componente electromagnética neutra de la radiación cósmica, procedente del espacio exterior. El descubrimiento de la radiación cósmica de microondas y sus anisotropías, los púlsares, las fuentes emisoras de rayos X, son solamente algunos ejemplos. Gracias a las medidas relacionadas con las anisotropías del fondo cósmico de microondas, las luminosidades de las supernovas SN1a lejanas y la morfología de cúmulos galácticos, se tiene una idea bastante precisa de la composición actual en materia-energía del Universo y, también, de cómo era en el momento del desacople de fotones ocurrido cuando el Universo tenía aproximadamente 370.000 años de existencia.

Estas medidas han puesto de manifiesto, entre otras cosas, que solo aproximadamente el 5% del total de la materia-energía del Universo está formado por los átomos conocidos. El resto está formado por un tipo de materia y de energía cuya naturaleza no es conocida. Este nuevo tipo de materia representa aproximadamente un 25 % del total, no emite ni absorbe radiación electromagnética y se ha detectado únicamente a través de efectos gravitacionales. De ahí que se denomine "materia oscura". El nuevo tipo de energía, denominada "energía oscura", representa aproximadamente el 70% del total, es de tipo repulsivo y es el agente propuesto para explicar la expansión acelerada del Universo. El descubrimiento de la energía oscura, a finales de la década de los 90, fue considerado por la revista Science el hito científico más sobresaliente del año 1998. La validación del Modelo Cosmológico Estándar, que cuantifica las fracciones de materia y energía que conforman el Universo, fue consi-

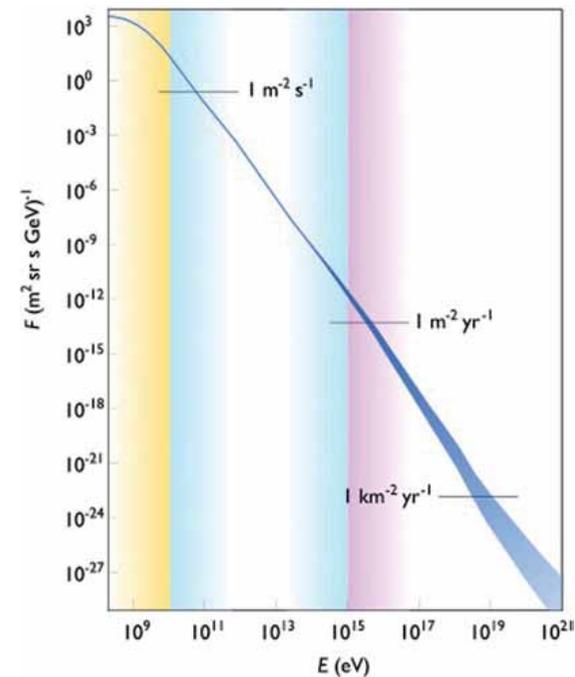
derado el hito científico más sobresaliente del año 2003 según dicha revista.

Hay otra componente neutra de la radiación cósmica que ha sido objeto de numerosos estudios desde hace varias décadas: los neutrinos. La observación de un aparente déficit del flujo de neutrinos, producidos en el proceso de generación de energía en el interior del Sol, y de asimetrías azimutales en el flujo de neutrinos, producidos al final de las cascadas originadas por la interacción de la radiación cósmica con la atmósfera, ha permitido, tras años de polémicas controversias experimentales y teóricas, validar el Modelo Estándar del Sol y proporcionar la primera prueba observacional que evidencia las limitaciones del Modelo Estándar de Partículas. Las medidas realizadas indican que, contrariamente a una de las hipótesis de partida de esta teoría, los neutrinos son partículas de masa no nula y tienen la propiedad de cambiar su identidad leptónica a través de un mecanismo cuántico denominado "oscilaciones de sabor".

La componente cargada de la radiación cósmica, electrones, positrones y núcleos atómicos, se ha estudiado con numerosos dispositivos experimentales, desde su descubrimiento en 1912 por el físico austriaco Víctor Hess, Premio Nobel de Física en 1936. Los resultados obtenidos han sido de gran importancia en el campo de la Física de Partículas Elementales, aunque su relevancia para el conocimiento del Universo no es comparable, a día de hoy, con lo que ha aportado el estudio de la radiación

**"El descubrimiento de la energía oscura a finales de la década de los 90 fue considerado por la revista Science el hito científico más sobresaliente del año 1998."**

Espectro energético de los rayos cósmicos cargados.



electromagnética. No es aventurado afirmar que, desde el punto de vista experimental, la Física de Partículas nace con el estudio de la radiación cósmica, herramienta que mantendrá su posición privilegiada hasta mediados de los años 50, cuando el advenimiento de los grandes aceleradores de partículas, la invención de la cámara de burbujas y, posteriormente, las cámaras proporcionales multi-hilos, cambiarían radicalmente el escenario de la investigación experimental del microcosmos.

El estudio de los rayos cósmicos cargados, durante cerca de 100 años, ha puesto de manifiesto que el flujo tiene una gran dependencia con la energía, como se muestra en la figura. Abarca cerca de 30 órdenes de magnitud y la energía llega a alcanzar valores macroscó-

picos,  $10^{20}$  eV (unos 16 Julios). Su distribución angular es isotrópica. A pesar del extenso trabajo experimental y teórico realizado, quedan numerosas cuestiones por resolver: ¿cuáles son los mecanismos de aceleración?, ¿existe un valor máximo para la energía?, ¿cuáles son las fuentes de procedencia?, ¿cuál es su composición?, etc.

Es probable que el insuficiente conocimiento de los rayos cósmicos cargados tenga su origen en las dificultades experimentales para la realización de medidas precisas y de larga duración. Es evidente que la elección de una determinada técnica experimental viene condicionada, entre otras cosas, por la región del espectro de energías que desea estudiarse. Los distintos valores del flujo en función de la energía determinan el tamaño y posible localización de la instrumentación requerida.

La observación de la radiación cósmica cargada, con instrumentación desplegada en laboratorios convencionales en superficie, viene dificultada por la existencia de la atmósfera terrestre, que enmascara la naturaleza y propiedades de la radiación. Por otra parte, la operación en plataformas espaciales, que subsanarían estas limitaciones, de sistemas magnéticos, herramientas necesarias para la determinación del signo de la carga eléctrica, entraña dificultades experimentales considerables.

El instrumento AMS-02, instalado en la Estación Espacial Internacional, es un detector construido con las ideas y tecnologías desarrolladas para la experimentación en aceleradores de partículas, pero adaptadas a las exigentes condiciones del entorno espacial.

## AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

### LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

La Estación Espacial Internacional, es un proyecto inicialmente concebido por la NASA, a principios de la década de los 80, en respuesta a los planes de la antigua Unión Soviética, que disponía de las estaciones espaciales Salyut y Mir. El final de la carrera espacial propició una estrategia de colaboración internacional en la que Estados Unidos, Europa, Rusia, Japón y Canadá se asociaron con el objetivo de construir una única estación espacial para uso conjunto. El proyecto se aprobó en 1993, iniciándose el ensamblaje de sus componentes en noviembre de 1998. La plataforma se terminó de construir a finales de 2010. En marzo de ese año, las agencias espaciales responsables de la Estación acordaron extender la vida útil de la plataforma, inicialmente prevista hasta el 2015, hasta el año 2028.

El elemento esencial, en el proceso de ensamblaje en órbita de la ISS, son los trasbordadores espaciales de la NASA (Challenger, Columbia, Discovery, Endeavour, Atlantis) que transportan los distintos componentes de la plataforma. Un total de 35 misiones de los trasbordadores se han utilizado para construir la ISS. Con el vuelo del Atlantis, se dará por concluida la era de los trasbordadores espaciales de la NASA.

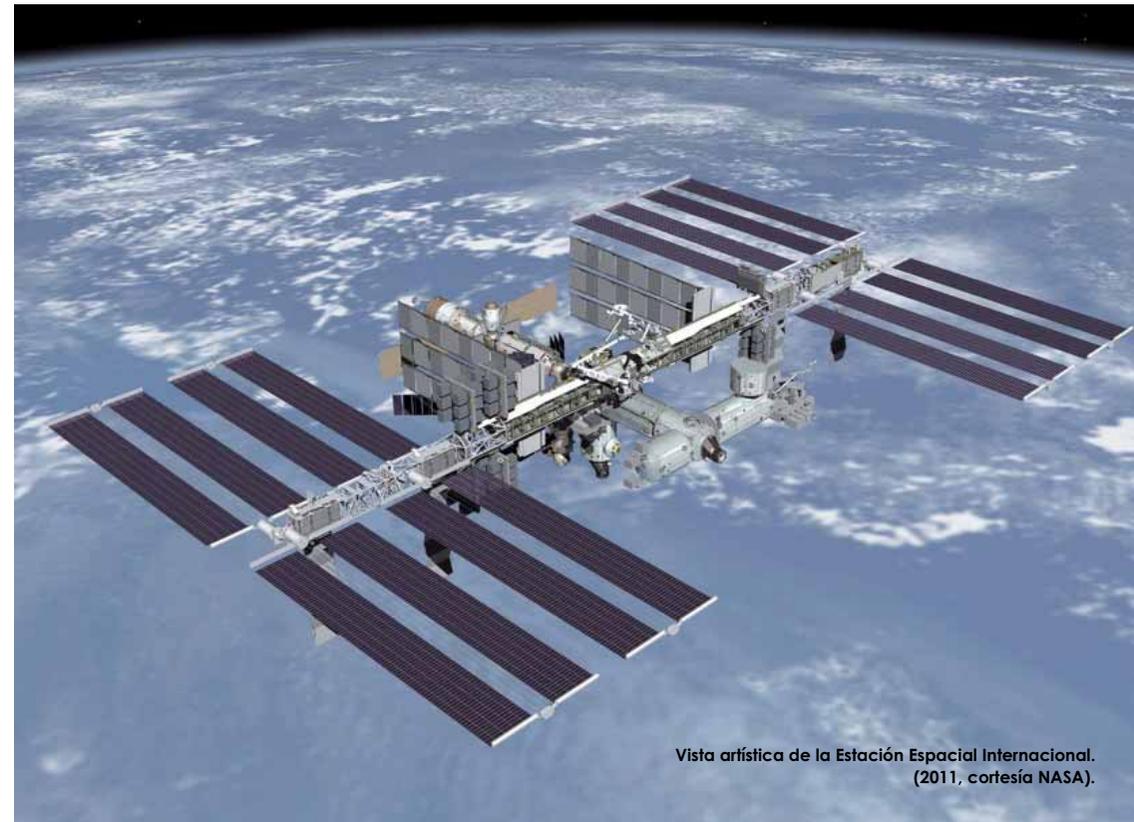
La ISS es la instalación científica de mayor coste construida hasta la fecha. El coste de esta instalación alcanza la cifra de 157 mil millones de dólares, más de 25 veces el coste del acelerador LHC (*Large Hadron Collider*) que el CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear con sede en Ginebra, Suiza) ha puesto en funcionamiento a finales del año 2009, o más de 10 veces el coste previsto del reactor experimental de fusión termonuclear por confinamiento magnético ITER (*Internacional Thermonuclear Experimental Reactor*) cuya construcción se completará dentro de 15-20 años.

Las dimensiones de la ISS son 108,5 × 72,8 × 27,40 metros (longitud × anchura × altura) y pesa 471.736 kg. El volumen presurizado es de unos 1000 m<sup>3</sup>. La inclinación de la órbita es de 51,64 grados y la altitud típica es de 340,5 km. La velocidad de la ISS es de 27.743 km/hora y el periodo orbital es de 91,34 minutos. La tripulación prevista para su funcionamiento y apoyo a los programas de investigación es de 6 astronautas.

La fuente de energía eléctrica de la ISS es la radiación solar. Con la ayuda de paneles solares, con una superficie total de 375 m<sup>2</sup>, que se orientan automáticamente para optimizar la colección de energía solar, se generan 89 kilovatios.

La ISS se mantiene en una órbita a una altitud mínima (máxima) de 278 km (460 km). A la altitud orbital de la ISS, la intensidad de la atracción gravitatoria debida a la tierra es el 88% de la medida a nivel del mar. Debido al desplazamiento en caída libre de la ISS, y de acuerdo con el principio de equivalencia, ésta se encuentra en condiciones casi idénticas a las de ausencia de gravedad y de ahí el calificativo de microgravedad que se da al entorno orbital de la Estación.

Uno de los objetivos principales de la ISS era proporcionar un lugar privilegiado para realizar programas experimentales que requerirían o se beneficiarían de las condiciones especiales presentes en la Estación. Los ámbitos de investigación más notables identificados hasta la fecha son biología (incluyendo biomedicina y biotecnología), física (incluyendo física de fluidos, ciencia de materiales y física cuántica), astronomía (incluyendo astrofísica y cosmología) y meteorología. Desde el año 2005, un segmento de la ISS ha sido designado como Laboratorio Nacional USA. Hasta la fecha, la actividad



Vista artística de la Estación Espacial Internacional. (2011, cortesía NASA).

investigadora en la ISS ha sido muy reducida, pero se espera que este año se pongan en marcha diversos programas especializados de investigación.

La ISS constituye una plataforma única para el estudio de la radiación cósmica primaria, al eliminar los problemas derivados de la existencia de atmósfera. Sin embargo, las restricciones impuestas por el limitado suministro eléctrico, el peso de la instrumentación y la anchura de banda disponible para la transmisión de información, así como las implicaciones debidas al entorno de vacío, microgravedad, radiaciones y variaciones de temperatura, constituyen un enorme desafío para el diseño, construcción y operación de instrumentación del tipo de la utilizada en experimentos de física de partículas.

**“Con AMS-02 se inicia una nueva era en el estudio de la radiación cósmica cargada.”**

## AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

### AMS-02: LA ODISEA TERRENAL DE UN DETECTOR DE RAYOS CÓSMICOS

AMS-02, es un experimento diseñado y construido para el estudio detallado (medidas de alta precisión y larga duración) de la radiación cósmica, con especial énfasis en la componente cargada. La elección de la plataforma espacial ISS tiene una ventaja fundamental: en la órbita de la ISS no hay contaminación atmosférica, lo que hace posible la medida precisa de las características de las partículas y núcleos cósmicos (masa, carga eléctrica, energía).

Los 100 km de espesor de la atmósfera equivalen a unos 10 m de espesor de agua o 2.5 m de aluminio. Esto implica que las medidas realizadas con instrumentos en superficie, o a bordo de globos sonda, vienen degradadas por las interacciones de la radiación cósmica primaria con el medio atmosférico. Esto dificulta la medida de la energía y hace inviable la determinación de la masa y carga eléctrica. Las técnicas de reconstrucción de la energía, a partir de las partículas secundarias detectadas, se basan en las técnicas y algoritmos calorimétricos desarrollados para experimentos de física

de partículas y, en ausencia de procedimientos fiables de calibración, generan importantes incertidumbres sistemáticas.

Desgraciadamente, la experimentación a bordo de la ISS no está libre de dificultades. Como indicó en 1995 el Dr. Daniel Golding, Administrador General de la NASA, "el espa-

**"El objetivo científico era avanzar en el conocimiento del Universo y rastrear las reliquias de antimateria primordial."**

Vista del instrumento AMS-02 en la sala SSPF del KSC (4 marzo 2011).

cio es un entorno extremadamente hostil". Entre los más importantes desafíos, que entraña la investigación espacial, destacamos: limitación de peso, limitación de la potencia eléctrica disponible, limitación del ancho de banda, exposición a ciclos térmicos, microgravedad, vacío, vibraciones, aceleración y desaceleración, radiaciones, interferencias electromagnéticas, micro-meteoritos, la exigencia de redundancia y fiabilidad, la operación y mantenimiento de sistemas criogénicos y superconductores complejos.

Todos estos condicionantes han exigido, en el caso de AMS-02, un amplio, diversificado y ambicioso programa de I+D que, a su vez, ha necesitado, en algunos casos, la construcción de nuevas instalaciones, o la adaptación de las ya existentes, para realizar las pruebas de calificación espacial y proceder a la determinación de las prestaciones de sus componentes.

La idea de enviar al espacio un espectrómetro magnético, con capacidad para determinar el signo de la carga eléctrica de los rayos cósmicos, se remonta a mediados de los años 70 y se debe a L. Álvarez (Premio Nobel de Física en 1968) y G. Smoot (Premio Nobel de Física en 2005), concretándose en una propuesta, Astromag, que nunca llegó a convertirse en realidad.

En 1994, un reducido grupo de investigadores, liderado por el Profesor del Massachusetts Institute of Technology (MIT), Samuel C. Ting (Premio Nobel de Física en 1976), propusieron la construcción de un espectrómetro basado en un imán permanente, para su ubicación en la Estación Espacial Internacional. El objetivo científico era avanzar en el conocimiento del Universo y, en particular, rastrear las reliquias de antimateria primordial, abundantemente presente en el Universo primigenio.

Esta propuesta fue aprobada el 20 de septiembre de 1995 mediante acuerdo firmado por la NASA y el Departamento de Energía (DOE) del Gobierno de los Estados Unidos. En el acuerdo para la implementación de la propuesta, se especificaba que el proyecto debería realizarse en dos fases: una primera, de corta duración, a bordo de un trasbordador en misión logística a la Estación Espacial MIR, para validación conceptual y medida del ruido de fondo en condiciones reales, y una segunda, en la que el instrumento permanecería durante 3 años como módulo externo de la ISS para la realización del programa científico, al término del cual retornaría a la tierra.

En mayo de 1997, un grupo de investigadores del Departamento de Investigación Básica del CIEMAT aceptó la invitación del Profesor Ting, con quien venían trabajando desde 1981 en los laboratorios DESY (*Deutsches Elektronen Synchrotron*, Hamburgo, Alemania) y CERN (Ginebra, Suiza), para formar parte de la Colaboración AMS. En mayo de 2000, el Profesor Ting visitó el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) invitando a un grupo de sus investigadores a participar en el proyecto AMS.

En junio de 1998, se realizó la primera fase del proyecto AMS con un detector prototipo, AMS-01, ensamblado en el Instituto de Física de Partículas del *Eidgenössische Technische Hochschule* de Zúrich (ETHZ). Esta fase se desarrolló con AMS-01 a bordo del trasbordador Discovery en la misión STS-91 de apoyo logístico a la Estación Espacial rusa MIR. La misión STS-91 despegó, desde el Kennedy Space Center, el 2 de junio y aterrizó el 12 de junio. Durante los 10 días de duración de la misión, AMS-01 registró aproximadamente 100 millones de rayos cósmicos, cuyo estudio demostró la viabilidad de un experimento de esta naturaleza en el espacio y su potencial científico.



## AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

El diseño de AMS-01 incluía un imán permanente, un espectrómetro instrumentado con detectores de silicio para la medida de coordenadas de trayectorias, contadores de centelleo, un detector Cherenkov de tipo umbral, con aerogel de silicio como radiador, y la electrónica para selección de sucesos y adquisición de datos. La experiencia adquirida en esta primera fase aconsejaba, para la segunda fase del proyecto, reemplazar el imán permanente por un imán superconductor que incrementase el valor del campo magnético en un factor significativo, robustecer el espectrómetro con sensores de silicio adicionales, mejorar sensiblemente la capacidad de identificar partículas y, en particular, distinguir entre electrones y protones. También parecía prudente realizar la fase final de ensamblaje y pruebas en un laboratorio que pudiese aportar importante apoyo técnico en áreas críticas (vacío, criogenia, superconductividad, imanes, metrología, ingeniería, integración, tecnologías de la información, etc), así como en cuestiones administrativas y logísticas (transportes, compras, control de gastos, relaciones públicas, etc.). Estas eran, en cierta medida, las condiciones de contorno para la construcción del instrumento AMS-02.

Los componentes principales del instrumento AMS-02, en su configuración definitiva, son los siguientes.

- Un detector basado en el efecto de la radiación de transición (*Transition Radiation Detector*, TRD) para identificar positrones con un factor de rechazo a hadrones de  $10^2$ – $10^3$  en el intervalo de energías 1.5–300 GeV.
- Cuatro planos de contadores de centelleo para la medida de tiempos (*Time of Flight*, TOF) con precisión de unos 120 picosegundos que proporcionan información sobre la pérdida de energía por ionización ( $dE/dx$ ). El TOF es la herramienta principal del sistema de disparo (*trigger*) de primer nivel.

- Nueve planos de sensores de silicio, con unos 8 m<sup>2</sup> de área total, (*Silicon Tracker Detector*, STD) que proporcionan una resolución espacial en la medida de coordenadas de 10  $\mu$ m (30  $\mu$ m) en el plano de curvatura (en el plano ortogonal al de curvatura) e información sobre la pérdida de energía por ionización ( $dE/dx$ ).
- Contadores de veto (*Anticoincidence Counters*, ACC) para asegurar que solo son aceptadas las partículas que atraviesan la apertura geométrica del imán.
- Un detector basado en el efecto de radiación Cherenkov (*Ring Imaging Cherenkov Radiation Counter*, RICH) que mide la velocidad de las partículas y núcleos atómicos con una precisión del 0.1 % y el valor absoluto de su carga eléctrica.
- Un calorímetro de muestreo 3D (*Electromagnetic Calorimeter*, ECAL) que mide la energía de los rayos gamma, electrones y positrones y distingue electrones y positrones de hadrones con un factor de rechazo  $10^4$  en el intervalo 1.5 GeV–1 TeV.
- Un imán permanente de forma cilíndrica, longitud 800 mm, diámetro interno 1115 mm y diámetro externo 1298 mm, con una aceptación geométrica de 0.82 m<sup>2</sup>sr. Este imán permanente ya fue utilizado en AMS-01 y proporcionaba un poder de curvatura  $BL^2 = 0.15 \text{ Tm}^2$ . En el diseño original, AMS-02 tenía un imán superconductor, enfriado a la temperatura 1.8 K mediante 2500 litros de helio líquido superfluido, que proporcionaba un poder de curvatura  $BL^2 = 0.86 \text{ Tm}^2$ . Como se relata más adelante, esta opción fue descartada por razones de índole diversa.

AMS-02 tiene dimensiones: 5 x 4 x 3 m<sup>3</sup>, pesa 7,5 toneladas, consume 2.5 kW y va equipado con 650 microprocesadores y 300.000 canales electrónicos. Los datos registrados serán transmitidos vía satélite con destino a distintos cen-

tros de investigación espacial, en Florida, Alabama y Texas, de Estados Unidos, y, posteriormente, también al CERN donde serán procesados, analizados y distribuidos a los centros de investigación que participan en el proyecto.

En 1997 el CERN aceptó el experimento AMS como "Recognized Experiment". En diciembre de 2003 el CERN y la Colaboración AMS firmaron un "Memorandum of Understanding" (MOU), por una duración de 5 años, que se renovó por otros 5 años en junio de 2008 y al que se añadió un apéndice en 2010. En virtud de estos acuerdos, el CERN aceptó conceder espacio en la zona de Preveessin para la construcción de una sala limpia de 700 m<sup>2</sup> y clase 10000, financiada por la Colaboración AMS, en la que se ha ensamblado el instrumento AMS-02. El CERN también aceptó albergar el Centro de Operaciones y Control (*Payload Operation and Control Center*, POCC), para lo cual se ha construido un nuevo edificio en la zona de Preveessin, e instalar el Centro de Ciencia (*Science Operation Center*, SOC) en el Centro de Cálculo de la Organización.

El 1 de febrero de 2003 el trasbordador Columbia, que estaba a punto de concluir la misión STS-107, se desintegró al entrar en la atmósfera causando la muerte de sus siete tripulantes.



## AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

Este incidente acarreó la inmediata cancelación de los vuelos de los trasbordadores, que solo se reanudarían en 2005, y fijó el año 2010 como fecha límite para los vuelos de los trasbordadores y el año 2015 como fin de la vida útil de la Estación Espacial Internacional.

El 5 de octubre de 2005, el Dr. Michael Griffin, Administrador General de la NASA, comunicó que la NASA no dispondría de un vuelo para llevar AMS-02 a la Estación Espacial y que, en consecuencia, desaparecería de la lista de vuelos (*Shuttle Space Manifest*). Afortunadamente, la NASA continuó financiando las actividades de sus equipos en el KSC y en el JSC (*Johnson Space Center*, Houston, Texas) asignados al proyecto AMS. Esta decisión, aparentemente contradictoria con la anterior, ha sido clave para completar satisfactoriamente el proyecto.

En julio de 2007 se completó la construcción de la sala limpia destinada a la integración de AMS-02 en el área de Prevessin del CERN. A partir de ese momento, los distintos subsistemas, diseñados, construidos y probados en los diferentes centros que integran la Colaboración AMS, empezaron a llegar al CERN para proceder a la integración final. Un primer ejercicio de integración se realizó durante 10

meses utilizando una réplica no instrumentada (*STA—Structure Test Article*) del imán superconductor, cuya construcción en la empresa Space Cryomagnetics Ltd (SCL) se encontraba en fase avanzada, aunque no exenta de dificultades técnicas. Durante estos meses se rediseñó y puso a punto en el CERN el sistema criogénico auxiliar para el imán superconductor (*CGSE—Cryomagnet Ground Support Equipment*).

El imán superconductor llegaría al CERN en diciembre de 2008, procediéndose al comisionado del mismo e iniciándose la fase fi-

nal de integración de AMS-02 y calibración con rayos cósmicos, tareas que se completarían en enero de 2010. A principios de febrero de 2010 el detector se calibró con haces de partículas (electrones, protones y fotones) de distintas energías en el área Norte de experimentación del CERN.

En octubre de 2008, tras una intensa actividad del Comité Ejecutivo de la Colaboración AMS con miembros del Congreso y del Senado de Estados Unidos, el Presidente Bush firmaría la resolución H. J. Res. 6063 por la que se aprobaba un vuelo adicional de

un trasbordador espacial para transportar AMS-02 a la Estación Espacial.

En febrero de 2010 el instrumento AMS-02 se transportó al centro ESTEC (*European Space Research and Technology Centre*) de la Agencia Europea del Espacio en Noordwijk (Holanda) para la realización de las pruebas de calificación espacial en la cámara Maxwell (compatibilidad electromagnética) y en el gran simulador espacial (ciclos térmicos). Aunque las medidas realizadas en ESTEC hasta mediados de abril fueron satisfactorias, la determinación de la carga de calor, que determina el con-



Lanzamiento de Endeavour en la Misión STS-134 (16 de mayo de 2011, cortesía NASA).



Delegación española en el KSC (28 de Abril 2011).

## AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

sumo del helio líquido superfluido (2500 litros) y condiciona la duración funcional del imán, resultó superior a lo requerido en las especificaciones técnicas. La operatividad efectiva del imán sería de  $20 \pm 4$  meses, en lugar de los 3 años exigidos. Aunque esta estimación podría mejorarse utilizando crió-refrigeradores de última generación, las pruebas realizadas revelaban incertidumbres de índole diversa (en particular, relacionadas con el posible tiempo de espera de AMS-02 en la rampa de lanzamiento del KSC y los efectos debidos a cargas próximas al instrumento una vez anclado en la ISS) que no permitían hacer una determinación absolutamente fiable de la vida útil del imán.

En marzo de 2010, al tiempo que seguían realizándose pruebas en ESTEC, las Agencias responsables de la Estación Espacial acordaron extender el funcionamiento de la Estación hasta el año 2028, al tiempo que confirmaban el año 2011 como fecha límite para los vuelos de los trasbordadores de la NASA. Esta segunda consideración eliminaba el retorno de AMS-02 a tierra, como estaba inicialmente establecido en el acuerdo NASA-DOE de 1995, y hacía prácticamente inviable la opción, técnicamente posible, de rellenar en órbita el depósito de helio.

La prolongación de la vida útil de la Estación y la limitada duración operativa del imán superconductor aconsejaron, en abril de 2010, descartar su utilización y remodelar AMS-02 con el imán permanente utilizado en el vuelo precursor con AMS-01. Esta opción fue aprobada por la NASA que, desde el incidente ocurrido en la red magnética del LHC del CERN en septiembre de 2008, tenía ciertas reticencias acerca de la idoneidad de un imán superconductor operando en la Estación Espacial. El menor campo magnético generado por el imán permanente aconsejaba una reconfiguración del espectró-

metro que implicaba una diferente disposición espacial de los planos de sensores de silicio y la adición de un plano complementario.

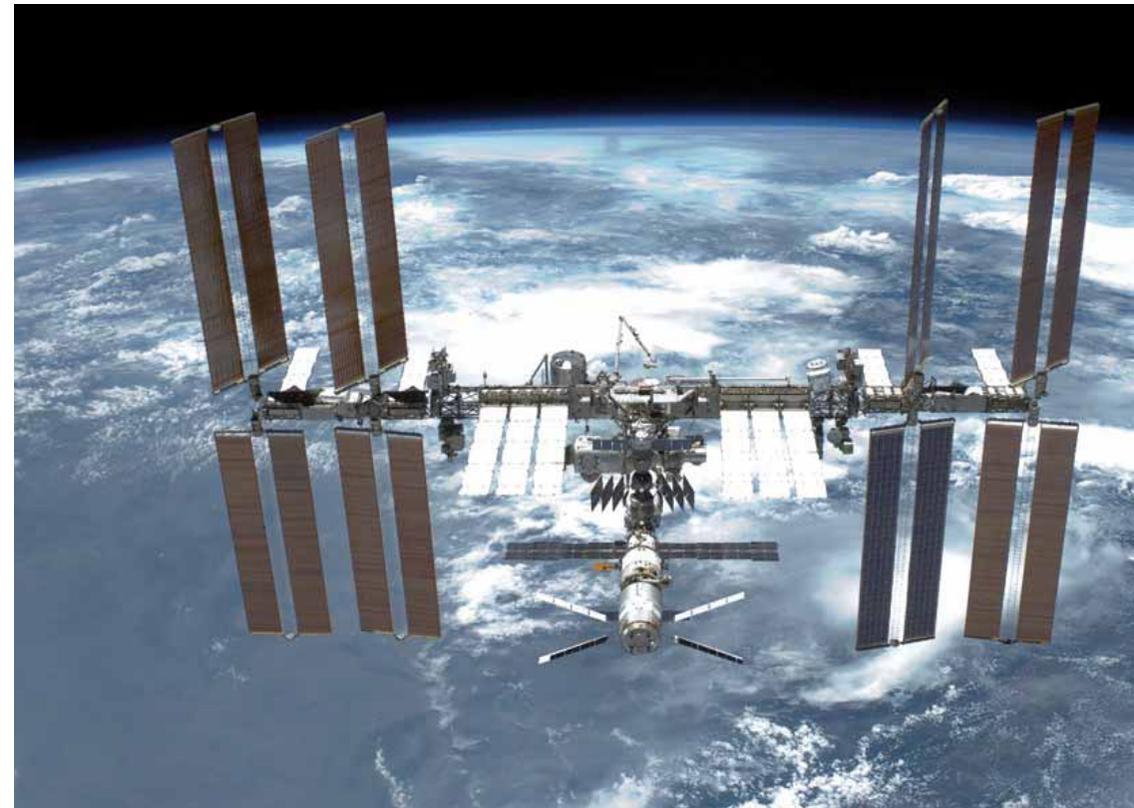
Con objeto de proceder a esta importante remodelación, el instrumento se transportó al CERN el 25 de abril de 2010. Las tareas de remodelación se completaron a principios de agosto, repitiéndose a continuación las calibraciones con haces de partículas. El 24 de agosto AMS-02 abandonó el CERN en dirección al aeropuerto de Cointrin en Ginebra y el día 26, a bordo de un avión Super Galaxy C5 de las fuerzas aéreas estadounidenses, despegó en dirección al KSC. A su llegada al KSC, ese mismo día, se inició en la *Space Station Processing Facility* (SSPF) el proceso de ajuste de interfaces con el trasbordador Endeavour y con la Estación Espacial Internacional. En paralelo, se ponían a punto los centros temporales de control y operación en el KSC y en el JSC, mientras que, en el CERN, se construía el edificio que albergará el centro operativo principal a partir de julio de 2011.

En noviembre de 2010, AMS-02 estaba listo para su ubicación en la bodega del Endeavour, cuya puesta a punto en el *Orbiter Processing Facility* (OPF) se completaba el 28 de febrero de 2011. El 10 de marzo, una vez integrados en el *Vehicle Assembly Building* (VAB) el depósito de combustible líquido externo (ET-External Tank) y los cohetes propulsores con combustible sólido (SRS-Solid Rocket Boosters), el Endeavour se desplazó a la rampa de lanzamiento (Pad 39-A). El 26 de marzo AMS-02 se instalaba en la bodega del Endeavour completándose el proceso.

Tras retrasos importantes (casi 4 meses), ocasionados por problemas técnicos en la misión STS-133, que finalmente realizó el Discovery desde el 24 de febrero al 9 de marzo, la misión



Dos vistas de AMS-02 en el eje S3 de la Estación Espacial Internacional (20 de mayo de 2011, cortesía NASA).



## AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

Vista del detector RICH en la sala limpia del CERN.



**“España ha liderado, junto con Estados Unidos, Italia, Alemania, Francia, Suiza y Taiwan, el proyecto científico de mayor envergadura en la búsqueda de antimateria y materia oscura en el Universo: la construcción del instrumento AMS-02.”**

STS-134 debía iniciarse el 19 de abril. Por restricciones de tráfico en la Estación el lanzamiento se retrasó al 29 de abril, y, debido a problemas eléctricos en el Endeavour, se produjo un nuevo retraso. Finalmente, el 16 de mayo a las 8:56 a.m. EDT tuvo lugar el lanzamiento. El día 18 tuvo lugar el amarre con la Estación y el día 19 el traslado de AMS-02 desde la bodega del Endeavour a su posición definitiva en el eje S3 de la Estación. Una vez realizadas las conexiones eléctricas y activadas las líneas de transmisión de información, AMS-02 ha comenzado a enviar datos al Centro de Operaciones y Control en el JSC y, desde éste, al Centro de Ciencia en el CERN, que demuestran el correcto funcionamiento de todos los subsistemas del detector.

### FÍSICA FUNDAMENTAL CON AMS-02

AMS-02 estudiará la naturaleza y composición de los rayos cósmicos cargados y de la abundancia relativa de los isótopos ligeros, proporcionando valiosa información acerca de los mecanismos de aceleración, los modelos de propagación y la densidad de materia interestelar. La medida precisa de los flujos de antiprotones, positrones y rayos gamma permitirá profundizar en la comprensión de la naturaleza de la materia oscura. También buscará evidencia de la existencia de antimateria cósmica primaria con una sensibilidad  $10^3$ – $10^6$  superior a los límites actuales y posibles nuevos fenómenos como, por ejemplo, materia extraña.

### PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN LA CONSTRUCCIÓN DE AMS-02

España ha liderado, junto con Estados Unidos, Italia, Alemania, Francia, Suiza y Taiwan, el proyecto científico de mayor envergadura en la búsqueda de antimateria y materia oscura en el Universo: la construcción del instrumento AMS-02.

La participación española en el proyecto AMS está dirigida por el Departamento de Investigación Básica del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), Organismo Público de Investigación, dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN), con notable reputación internacional en el campo de la Física y Astrofísica de Partículas Elementales. En el proyecto también participa el Instituto de Astrofísica de Canarias, igualmente dependiente del MICINN, con larga tradición en el campo de la Astronomía y Astrofísica.

Investigadores del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), dependiente del Ministerio de Fomento, han participa-

do en algunas fases del proyecto. Igualmente relevante ha sido el soporte tecnológico del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), dependiente del Ministerio de Defensa, en donde se han realizado pruebas de calificación espacial de la instrumentación construida en España.

En el proyecto de construcción de AMS-02, la contribución de diversas empresas españolas, con contrastada experiencia en distintos campos de la investigación aeronáutica y aeroespacial, ha sido esencial. En particular EADS-CRISA, líder a nivel mundial en el campo de la microelectrónica espacial, e IberEspacio, con consolidada experiencia en el uso de tecnologías térmicas para misiones espaciales.

La participación española en el proyecto AMS, que se inició en 1997, ha sido financiada por el propio CIEMAT, el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) y por subvenciones a proyectos de investigación con cargo a diversos Programas Nacionales (Espacio, Física de Partículas, Astronomía y Astrofísica) del Plan Nacional de Ciencia y Tecnología.

La contribución española se ha focalizado en tres áreas relevantes:

- El diseño, construcción y validación de un detector (*Ring Imaging Cherenkov Counter*, RICH) para la medida precisa de la velocidad y carga eléctrica de las partículas y núcleos atómicos cósmicos. Este subsistema se integró en una sala limpia construida para este fin en el CIEMAT. El grupo del CIEMAT coordinó las actividades de integración con el resto del instrumento y las pruebas de funcionalidad y verificación de prestaciones con rayos cósmicos, con haces de partículas en el CERN y en ESTEC, así como las pruebas definitivas del RICH realizadas en el KSC y el JSC.

## AMS-02: la odisea de un detector de rayos cósmicos

- El diseño, construcción y validación del sistema electrónico de control del imán superconductor (*Avionics Box*), que tenía como misión cargar eléctricamente el imán, realizar la telemetría con los 200 sensores que controlan la temperatura, presión, voltaje de la instrumentación criogénica y proteger y reactivar la operación del imán en el caso de una transición al estado resistivo (*quench*). En este proyecto, el CIEMAT actuó como soporte interlocutor entre EADS-CRISA y AMS y también contribuyó a la financiación de diversas tareas en la empresa británica SCL (*Space Cryomagnetism Limited*), encargada del diseño y construcción del imán superconductor. La experiencia acumulada en criogenia y supercon-
- ductividad en entornos espaciales será de gran utilidad para el desarrollo de misiones espaciales tripuladas de larga duración.
- La contribución a la gobernanza de la Colaboración AMS, asumiendo la responsabilidad de la elaboración de un documento (*Memorandum of Understanding*) entre el CERN y AMS para la integración de AMS-02 en el CERN. Asimismo, fue responsabilidad del CIEMAT la redacción del documento de acuerdo entre todas las instituciones que forman parte del proyecto para estructurar el funcionamiento de la Colaboración AMS y la financiación de tareas durante las fases de ensamblaje y operación del instrumento en el CERN, ESTEC, KSC, JSC e ISS.



### EPÍLOGO

AMS-02 es un excepcional instrumento científico que permitirá investigar en condiciones experimentales óptimas cuestiones científicas de máxima relevancia (trazas de antimateria cósmica primaria, señales de materia oscura) y tal vez poner de manifiesto fenómenos nuevos que solo esta novedosa y robusta instrumentación y el entorno privilegiado que ofrece la Estación Espacial Internacional hace posible. Con AMS-02 se inicia una nueva era en el estudio de la radiación cósmica cargada que confiamos conduzca a la obtención de resultados científicos tan relevantes como los obtenidos con la componente neutra de la misma.

### AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo quiere agradecer a todos los miembros del grupo AMS-CIEMAT y, muy en particular, a Javier Berdugo, Jorge Casaus, Ignacio Cernuda, Carlos Delgado, Carlos Díaz, Joaquín García, Francesca Giovacchini, Carlos Mañá, Jesús Marín y Gustavo Martínez, la excepcional dedicación y el excelente trabajo realizado durante el desarrollo de este fascinante y difícil proyecto.

Manuel Aguilar  
Dpto. de Investigación Básica  
CIEMAT

