

EL INSTRUMENTO AMS-02 EN LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

M. AGUILAR*; J. BERDUGO**; J. CASAUS**; I. CERNUDA**; D. CRESPO**; C. DELGADO**; C. DÍAZ**; J. GARCÍA**; F. GIOVACCHINI**; C. DE LA GUÍA**; C. MAÑA**; J. MARÍN**; G. MARTÍNEZ**

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Director del Departamento de Investigación Básica del CIEMAT

** Departamento de Investigación Básica, CIEMAT

RESUMEN

El 16 de mayo de 2011, a las 8:56 (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 de la NASA (*National Aeronautics Space Administration*) Endeavour, a bordo del cual ha viajado el instrumento AMS-02 (*Alpha Magnetic Spectrometer* / Espectrómetro Magnético Alpha). El acoplamiento del trasbordador a la Estación Espacial se produjo el día 18 de mayo a las 6:15. A las 2:30 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.

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, la energía oscura, son solamente algunos ejemplos recientes. 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 desacoplo de fotones ocurrido cuando el Universo tenía aproximadamente 370.000 años de existencia.

Estas medidas han puesto de manifiesto, entre otras cosas, que solamente un $\sim 5\%$ 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 y de ahí las denominaciones de materia oscura y energía oscura respectivamente. Este nuevo tipo de materia representa $\sim 25\%$ del total, no emite ni absorbe radiación electromagnética y se ha detectado únicamente a través de efectos gravitacionales. El nuevo tipo de energía representa $\sim 70\%$ 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. El Modelo Cosmológico Estándar, que cuantifica las fracciones de materia y energía que conforman el Universo, fue declarado por dicha revista como el hito científico más sobresaliente del año 2003.

Hay otra componente neutra de la radiación cósmica que ha sido objeto de numerosos estudios desde que W. Pauli, Premio Nobel de Física en 1945, propuso su existencia en 1930: 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 origi-

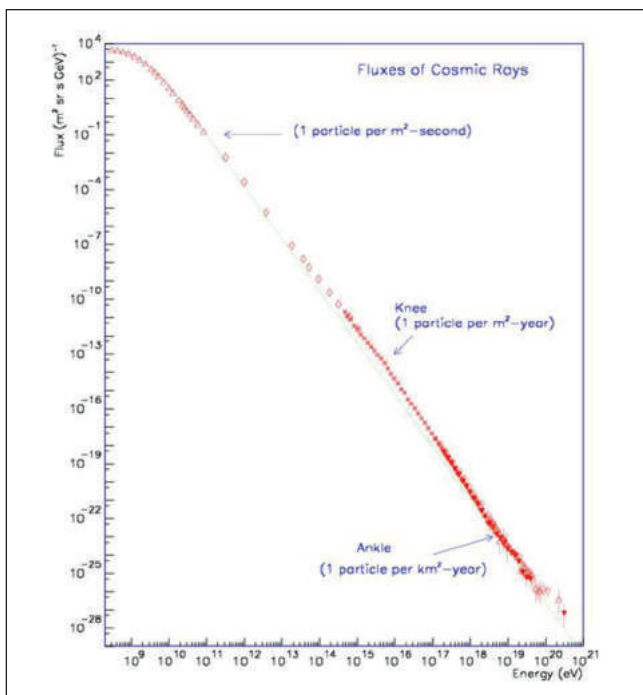


Figura 1. Flujo de rayos cósmicos cargados en función de la energía

nadas 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 e Interacciones. 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 Victor 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 electromagnética. No es aventurado afirmar que, desde el punto de vista experimental, la Física de Partículas nació con el estudio de la radiación cósmica, herramienta que mantendría 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, **Figura 1**. Abarca cerca de 30 órdenes de magnitud y la energía llega a alcanzar valores macroscópicos, 10^{20} eV (~ 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 insatisfactorio 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.

Es interesante hacer notar que, hasta la fecha, los aceleradores cósmicos siguen proporcionando las partículas más energéticas para su posterior estudio. Cuando el acelerador LHC (*Large Hadron Collider*) del CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear, Ginebra, Suiza), que ha entrado en funcionamiento en noviembre de 2009, alcance su energía nominal, hacia el año 2015, y se produzcan colisiones protón-protón a 14 TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$) en el sistema centro de masas, esto será equivalente a producir, en el sistema

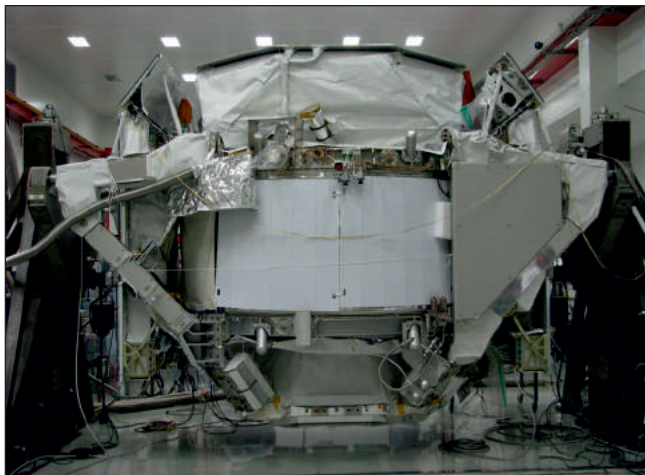


Figura 2. El instrumento AMS-02

de laboratorio, haces de protones de $\sim 10^{17}$ eV para su interacción con blancos fijos. Esto es, haces de partículas aproximadamente mil veces menos energéticas que las observadas en el experimento de rayos cósmicos del Observatorio Sur Pierre Auger (Malargüe, Argentina). Obviamente, esta inferior energía viene compensada al tratarse de flujos mucho más intensos y controlados. De hecho, el estudio de determinadas colisiones inelásticas con los datos del LHC será de gran utilidad para una mejor comprensión de las observaciones realizadas en este Observatorio.

El instrumento AMS-02, **Figura 2**, instalado en la Estación Espacial Internacional, que describiremos en este trabajo es un detector diseñado para el estudio de los rayos cósmicos y construido con las ideas y tecnologías desarrolladas para la experimentación en aceleradores de partículas, pero adaptadas a las exigentes condiciones del entorno espacial.

LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

La Estación Espacial Internacional, **Figura 3**, 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 con-



Figura 3. La Estación Espacial Internacional (cortesía NASA)

junto. 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 ha sido la flota de trasbordadores espaciales de la NASA (Challenger, Columbia, Discovery, Endeavour, Atlantis) que han transportado al espacio los distintos componentes de la plataforma para su integración. Un total de 37 misiones de los trasbordadores han sido necesarias para construir la ISS. Con la misión STS-135 realizada por el Atlantis en julio de 2011 concluye la era de los trasbordadores espaciales de la NASA.

Las naves rusas Soyuz y Progress han prestado servicio al mantenimiento de la ISS, especialmente desde el accidente del Columbia en febrero de 2003. En febrero de 2008 se acopló con éxito a la ISS el módulo Columbus de la Agencia Europea del Espacio (ESA), transportado por el Atlantis. El Columbus es un laboratorio multidisciplinar para la realización de experimentos en ciencias de la vida, ciencia de materiales y física de fluidos. En el futuro más inmediato, el mantenimiento de la Estación correrá a cargo de las naves rusas Soyuz y de vehículos no tripulados de otras agencias espaciales. En particular, naves del tipo Jules Verne o Johannes Kepler de la Agencia Europea del Espacio.

La ISS es la instalación científica de mayor coste construida hasta la fecha, que se estima en cerca de 160 mil millones de dólares, más de 25 veces el coste del acelerador LHC que el CERN 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 (*International 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 su peso es 471.736 kg. El volumen presurizado es de unos 1000 m³. 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 m², 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). Debido a diminutos efectos de gradiente gravitacional (originados por minúsculas aceleraciones vibracionales y correcciones orbitales) y de arrastre atmosférico (existe una densidad de partículas del orden de 10⁷ moléculas/cm³, 12 órdenes de magnitud inferior a la densidad atmosférica a nivel del mar), la ISS sufre un permanente proceso de caída hacia la tierra (varios km/año), que es necesario corregir propulsándola en dirección contraria varias veces al año con ayuda del módulo ruso Zvezda, los trasbordadores de la NASA y los módulos ATV de la ESA.

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.

Uno de los objetivos principales de la ISS era proporcionar un lugar privilegiado para realizar pro-

gramas 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 investigadora en la ISS ha sido muy reducida, pero se espera que a partir del año 2011 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.

El instrumento AMS-02 constituye un esfuerzo pionero para el aprovechamiento del extraordinario potencial de la Estación Espacial Internacional para el desarrollo de un ambicioso programa de investigación en astrofísica de partículas, una disciplina científica en la frontera de la física de partículas elementales, la astrofísica de altas energías y la cosmología. Por otra parte, las tecnologías desarrolladas a lo largo de este proyecto, así como los resultados de las medidas de precisión de las propiedades de los rayos cósmicos, tendrán aplicación en el desarrollo de las futuras misiones espaciales tripuladas de larga duración.

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 funda-

mental: 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 de la NASA, “el espacio es un entorno extremadamente hostil”. En los párrafos siguientes enunciamos algunos de los más importantes desafíos que entraña la investigación espacial:

1. Limitación de peso

La restricción impuesta por la NASA a las distintas cargas a bordo implica que el diseño de los componentes de los distintos instrumentos debe optimizarse para disminuir el peso manteniendo sus propiedades mecánicas

2. Limitación de potencia eléctrica disponible

La restricción impuesta por la NASA al consumo eléctrico implica que la instrumentación tiene que optimizar la eficiencia en el consumo eléctrico

3. Limitación de ancho de banda

Los sistemas de NASA de transmisión de datos a tierra, con una notable restricción en la conectividad, imponen limitaciones severas en el número de Mbits/s que pueden enviarse desde la ISS

4. Ciclos térmicos

La ISS realiza una órbita completa alrededor de la tierra cada $\sim 90'$, experimentando en el transcurso de ésta un ciclo térmico de más de 100°C . Esto impone severas restricciones a los sistemas de regulación térmica de la instrumentación. La disipación del calor producida en los componentes electrónicos y su modulación por los ciclos térmicos debe ser regulada convenientemente

5. Microgravedad

Buena parte de la instrumentación utilizada requiere el uso de fluidos (gases o líquidos). El movimiento de éstos en condiciones de microgravedad obedece a patrones distintos de los que se manejan habitualmente en laboratorios convencionales. El control de los flujos de fluidos requiere el desarrollo de técnicas apropiadas

6. Vacío

El proceso de envejecimiento de materiales en vacío es distinto del que tiene lugar en las condiciones habituales de humedad, presión y temperatura de los laboratorios en superficie, exigiendo medidas paliativas apropiadas

7. Vibraciones

Las frecuencias de vibración (150 dB) imponen restricciones en la construcción de componentes

8. Aceleración y desaceleración

En las fases de aceleración y frenado de los trasbordadores durante el despegue y aterrizaje se alcanzan valores de g entre 3 y 5, que pueden afectar la mecánica de componentes de la instrumentación a bordo

9. Radiaciones

La instrumentación mecánica, eléctrica y electrónica tiene que ser resistente a la radiación

10. Interferencias electromagnéticas

Los sistemas de navegación del trasbordador y de la Estación Espacial imponen severas restricciones en los sistemas eléctricos, electrónicos y de comunicación

11. Redundancia y fiabilidad

La dificultad, imposibilidad en la mayoría de los casos, de efectuar reparaciones en la instrumen-

tación a bordo exige altos niveles de redundancia y fiabilidad en los sistemas críticos

12. Micro-meteoritos

La órbita de la ISS no está libre de meteoritos de tamaño variable. La NASA dispone de un catálogo de ellos y es necesario proteger adecuadamente los componentes que podrían verse afectados de manera crítica por los impactos de estos objetos

13. Criogenia y superconductividad

La utilización de dispositivos superconductores, por ejemplo imanes, operando a temperaturas próximas al cero absoluto, implica la utilización de sistemas criogénicos de alta complejidad y delicadas condiciones operativas y de control cuya implementación exige el desarrollo de tecnologías muy sofisticadas

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 Samuel C. C. Ting (Premio Nobel de Física en 1976), **Figura 4**, del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), propuso 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 un 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 rusa 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 modulo 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 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, **Figura 5**, ensamblado en el Instituto de Física de Partículas del *Eidgenössische Technische Hochschule* de Zürich (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 MIR, **Figura 6**. La misión despegó desde el *Kennedy Space Center* el 2 de junio y aterrizó el 12 de junio. Durante



Figura 4. El Prof. Samuel C. C. Ting

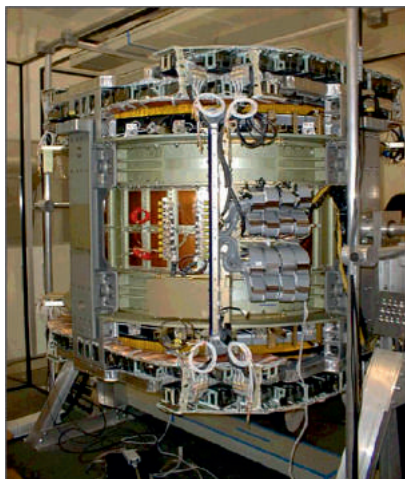


Figura 5. El instrumento AMS-01

los 10 días de duración de la misión, AMS-01 acumuló una estadística de aproximadamente 100 millones de rayos cósmicos, cuyo estudio demostró la viabilidad de un experimento de esta naturaleza en el espacio y su potencial científico.

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

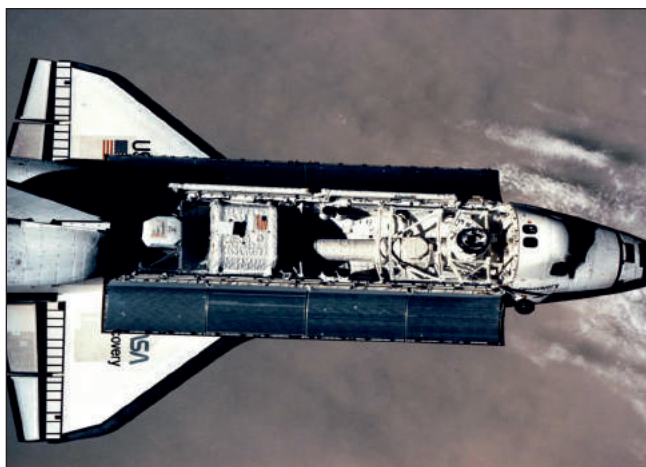


Figura 6. El trasbordador Discovery con el instrumento AMS-01 a bordo

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.

En 1997, el CERN aceptó el experimento AMS como experimento reconocido (*“Recognized Experiment”* (RE1)). 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 Prévessin para la construcción de una sala limpia de 700 m² 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 Prévessin, 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. Este incidente acarreó la inmediata cancelación de los vuelos de los trasbordadores, que sólo se reanudarían en 2005, y fijó el año 2010 como fecha límite para los vuelos de los trasbordadores. En este escenario, la vida útil de la Estación Espacial Internacional debería llegar a su término en el año 2015.

El 5 de octubre de 2005, el Dr. Michael Griffin, Administrador de la NASA, comunicó al Comité Ejecutivo de la Colaboración AMS, en una reunión celebrada en el cuartel general de la NASA en Washington D.C., que la NASA no dispondría de un



Figura 7. Vista de la sala limpia en el edificio 876 del Área Norte del CERN

vuelo para llevar AMS-02 a la Estación Espacial y que, en consecuencia, desaparecía de la lista de vuelos (*Shuttle Space Manifest*). Afortunadamente, la NASA continuó financiando las actividades de sus equipos científico-técnicos en el KSC (*Kennedy Space Center*, Cabo Cañaveral, Florida) y en el JSC (*Johnson Space Center*, Houston, Texas) asignados al proyecto AMS. Esta resolución, aparentemente contradictoria con la anterior, ha sido decisiva para poder completar satisfactoriamente el proyecto.

En julio de 2007 finalizó la construcción de la sala limpia destinada a la integración de AMS-02 en el área de Prévessin del CERN, **Figura 7**. A partir de ese momento, los distintos subsistemas, diseñados, contruidos y probados en los diferentes centros que



Figura 8. El imán superconductor en SCL (Space Cryomagnetics Ltd)

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 replica no instrumentada (STA / *Structure Test Article*) del imán superconductor, cuya construcción en la empresa *Space Cryomagnetics Ltd* (SCL, Culham, Reino Unido) se encontraba en fase avanzada, aunque no exenta de dificultades técnicas, **Figura 8**. 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 llegó al CERN en diciembre de 2008, procediéndose al comisionado del mismo e iniciándose la fase final de integración de AMS-02 y calibración con rayos cósmicos, tareas que se completaron 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 del CERN, **Figura 9**.

En octubre de 2008, tras una intensa actividad del Comité Ejecutivo de la Colaboración AMS con miembros del Congreso y Senado de Estados Unidos, el Presidente Bush firmó 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

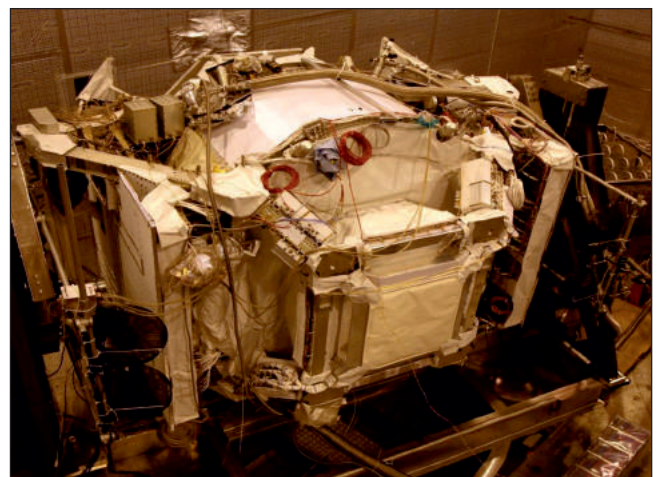


Figura 9. AMS-02 en el haz de test del Área Norte del CERN

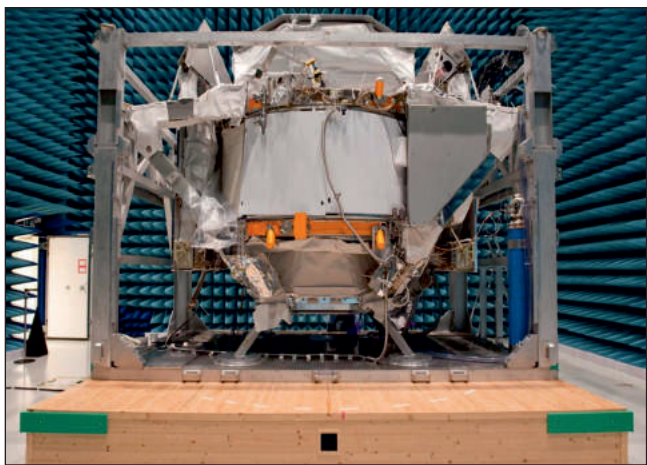


Figura 10. AMS-02 en la cámara Maxwell de ESTEC (ESA)

realización de las pruebas de calificación espacial en la cámara Maxwell (compatibilidad electromagnética), **Figura 10**, y en el gran simulador espacial (ciclos térmicos en vacío), **Figura 11**. Aunque las medidas realizadas en ESTEC hasta mediados de abril fueron satisfactorias, la determinación de la carga de calor (“*heat load*”), que determina el consumo del helio líquido super-fluido (2500 litros) y condiciona la duración funcional del imán (“*endurance*”), resultó superior a lo requerido en las especificaciones técnicas. La operatividad efectiva del imán se estimó en 20 ± 4 meses, en lugar de los 3 años exigidos. Aunque esta estimación podría mejorarse utilizando refrigeradores (*Cryo-Coolers*) de última generación, las pruebas realizadas revelaban incertidumbres de índole diversa (en particular, relacionados 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 realizando pruebas en ESTEC, las Agencias responsables de la Estación Espacial acordaron extender su funcionamiento 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 Espacial 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, **Figura 12**. 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 reservas 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 espectrómetro que implicaba una diferente disposición espacial de los planos de sensores de silicio y la adición de un plano complementario.

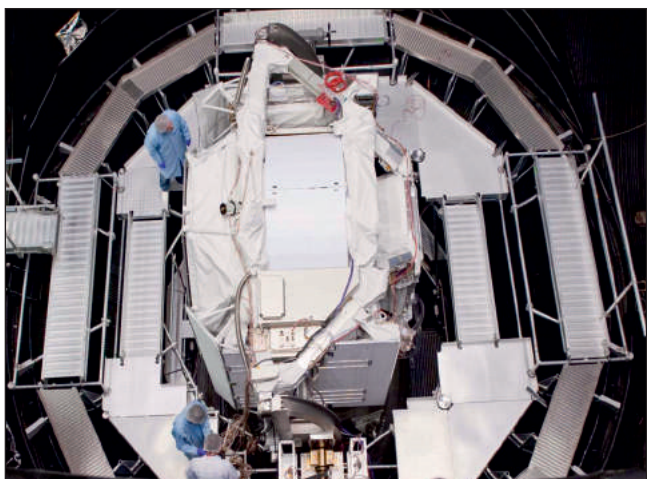


Figura 11. AMS-02 en el simulador espacial de ESTEC (ESA)

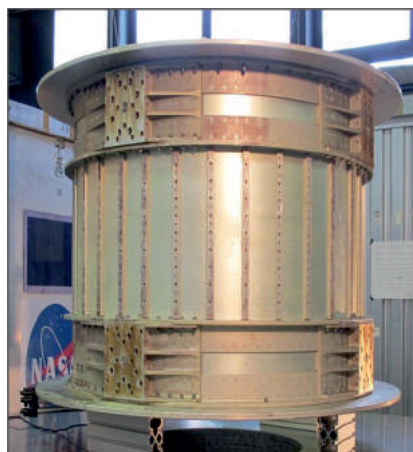


Figura 12. El imán permanente de AMS-01 en el RWTH (Aachen)



Figura 13. Traslado de AMS-02 desde el Área Norte del CERN al Aeropuerto de Ginebra



Figura 16. El centro de control POCC de AMS-02 en el Área Norte del CERN



Figura 14. AMS-02 embarcando en un Super Galaxy C5 de US Air Force



Figura 17. Interior del centro de control POCC en el Área Norte del CERN



Figura 15. AMS-02 en la instalación SSPF del KSC

Con objeto de proceder a esta importante modificación del instrumento, éste 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, **Figura 13**, y el día 26, a bordo de un avión Super Galaxy C5 de las fuerzas aéreas estadounidenses, despegó en dirección al KSC, **Figura 14**. A su llegada al KSC, ese mismo día, se inició en la instalación SSPF (*Space Station Processing Facility*), **Figura 15**, 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



Figura 18. AMS-02 en la bodega del trasbordador Endeavour



Figura 19. Cierre de las compuertas de la bodega del Endeavour



Figura 20. Lanzamiento del Endeavour desde el KSC, 16 de mayo de 2011

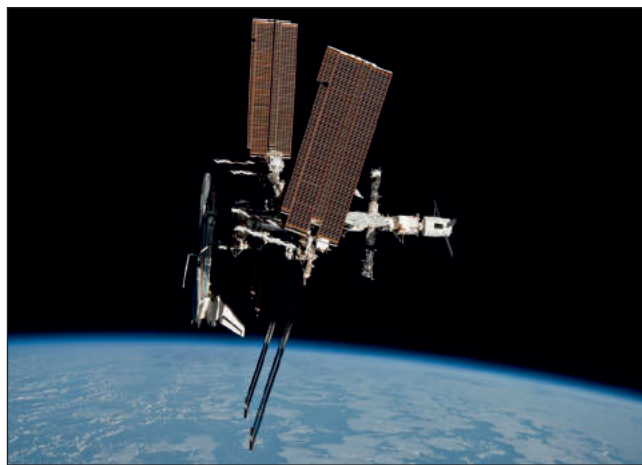


Figura 21. Amarre del Endeavour a la Estación Espacial Internacional

CERN, se construía el edificio que albergaría el centro operativo principal a partir de junio de 2011, **Figuras 16 y 17**. En noviembre de 2010, AMS-02 estaba listo para su ubicación en la bodega del Endeavour, cuyo procesamiento en la instalación OPF (*Orbiter Processing Facility*) se completó el 28 de febrero de 2011. El 10 de marzo de 2011, una vez integrados en el edificio VAB (*Vehicle Assembly Building*) el depósito de combustible líquido externo (ET / *External Tank*) y los cohetes propulsores con combustible sólido (SRS / *Solid Rocket Boosters*), Endeavour se desplazó a la rampa de lanzamiento (Pad 39-A). El 26 de marzo, se procedió a la instalación de AMS-02 en la bodega de Endeavour completándose el proceso, **Figuras 18 y 19**.

Tras retrasos importantes (cerca de 4 meses), ocasionados por problemas técnicos en la misión STS-133, que finalmente realizó el Discovery el 24 de febrero, la misión STS-134 debía iniciarse el 19 de abril de 2011. Por restricciones de tráfico en la Estación, el lanzamiento se retrasó al 29 de abril y, como consecuencia de problemas eléctricos en Endeavour, detectados horas antes de su lanzamiento, se produjo un nuevo retraso. Finalmente, el 16 de mayo a las 8:56 EDT tuvo lugar el lanzamiento de Endeavour, **Figura 20**. El día 18 se produjo el amarre con la Estación, **Figura 21**, y el día 19 el traslado de AMS-02 desde la bodega de Endeavour a su posición definitiva en el eje S3 de la Estación, **Figura 22 y Figura 23**. Una vez realizadas las conexiones eléctricas y activadas las líneas de transmisión de información, AMS-02 comenzó a enviar datos al Centro de



Figura 22. Traslado de AMS-02 desde el Endeavour al eje S3 de la ISS

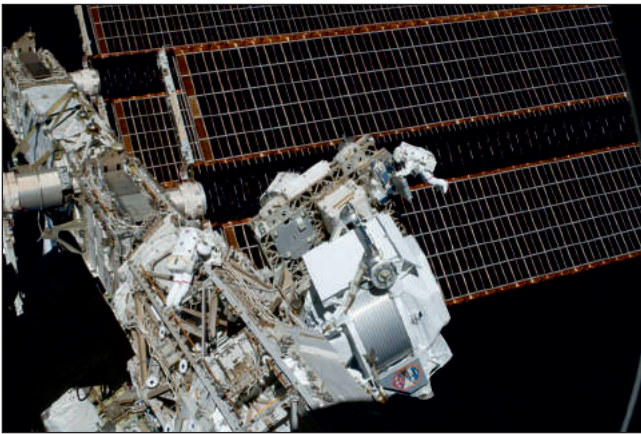


Figura 23. AMS-02 en su posición definitiva en la ISS

Operaciones y Control (POCC) en el JSC, y desde éste al Centro de Ciencia (SOC) en el CERN, que demuestran el correcto funcionamiento de todos los subsistemas del detector.

Durante el periodo de tiempo 19 de mayo-15 de agosto, AMS-02 ha coleccionado aproximadamente tres mil millones de candidatos de rayos cósmicos y se estima que cada año se acumularán del orden de siete mil millones de rayos cósmicos reconstruidos de acuerdo a los requisitos pre-establecidos y listos para el análisis científico.

EL INSTRUMENTO AMS-02

El Espectrómetro Magnético Alpha (AMS-02) es un detector de partículas diseñado para determinar las

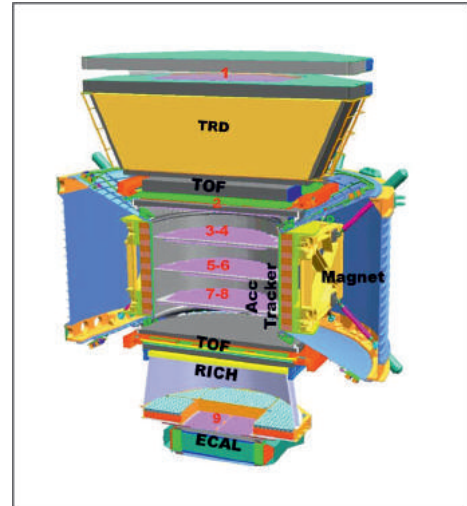


Figura 24. Esquema del instrumento AMS-02

características de los componentes de la radiación cósmica funcionando como un módulo externo acoplado a la Estación Espacial Internacional. Esta ubicación supone un entorno excelente para poder estudiar el Universo y sus orígenes ya que, al estar fuera de la atmósfera terrestre, nos permite obtener información sobre las características de partículas primarias de la radiación cósmica que no son medibles desde los laboratorios terrestres.

El detector AMS-02, **Figura 24**, ha sido construido por una colaboración internacional formado por aproximadamente 600 científicos, ingenieros y técnicos procedentes de 57 centros de investigación o departamentos universitarios en 16 países, **Figura 25**.

AMS-02 mide 5×4×3 metros, pesa 7,5 toneladas, consume 2 kW y contiene 300.000 canales electró-

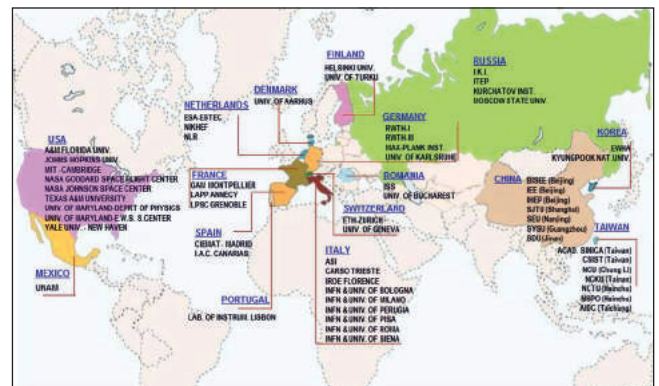


Figura 25. La Colaboración AMS

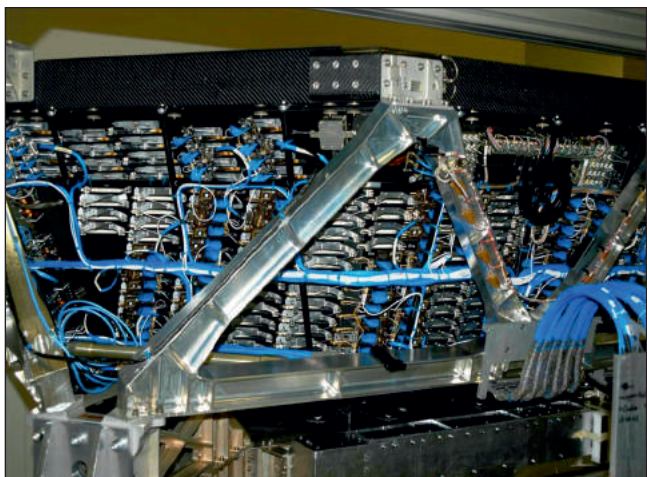


Figura 26. El detector de Radiación de Transición (TRD)

nicos y 650 microprocesadores. La resolución en la determinación espacial de puntos a lo largo de la trayectoria de las partículas es de 10 micrones (1micrón (μm)= 10^{-6} metros) y la resolución temporal es de 150 picosegundos (1 picosegundo (ps)= 10^{-12} segundos).

El espectrómetro AMS-02 está formado por un conjunto de sub-detectores que permiten determinar las propiedades de las partículas incidentes (energía, masa, carga eléctrica) en un amplio intervalo de energías. El núcleo del espectrómetro es un imán permanente de forma cilíndrica de 800 mm de longitud y 1115 mm (1298 mm) de diámetro interno (externo), que curva la trayectoria de las partículas que lo atraviesan dependiendo de su momento y de su carga eléctrica. La aceptación angular del imán es $0.82 \text{ m}^2 \text{ sr}$. Este imán está formado por 64 sectores, cada uno de los cuales contiene 100 bloques magnetizados de una aleación de neodimio, hierro y boro, de dimensiones $50 \times 50 \times 25 \text{ mm}$, cuyas magnetizaciones han sido estudiadas para proporcionar un campo magnético intenso (0.15 T) y uniforme en el interior del cilindro y un momento dipolar externo nulo para evitar que su interacción con el campo magnético terrestre perturbe los sistemas de navegación de la Estación Espacial y afecte a los astronautas en sus actividades en el exterior de la plataforma.

Encima del imán permanente se encuentra el Detector de Radiación de Transición (TRD), **Figura 26**. Este dispositivo está formado por 328 módulos, cada uno de los cuales incluye 16 tubos de deriva de longitudes que varían entre 80 y 200 cm, dispuestos en

capas de 20 mm de espesor formadas por un entramado de fibras de polietileno-propileno de $10 \mu\text{m}$ de diámetro y densidad 0.06 g/cm^3 . Los tubos de deriva contienen una mezcla de Xe (80%) y CO_2 (20%) que debe ser regulada con gran precisión y con una contaminación de impurezas inferior a 1 parte por millón. Cuando los electrones y positrones de alta energía cruzan el entramado de fibras, producen rayos X debido a los cambios bruscos del índice de refracción entre el material de las fibras y el vacío que se convierten en pares electrón-positrón y dan lugar a una avalancha de ionización que se detecta en el extremo de los tubos de deriva. La intensidad de la radiación emitida crece con el cociente E/m y por tanto es mucho menor para protones de la misma energía debido a su alta masa. Este dispositivo permite distinguir protones de positrones y antiprotones de electrones con un factor de rechazo de 10^{-2} hasta energías de 300 GeV.

En los extremos del volumen cilíndrico interior del imán se encuentran los Contadores de Tiempo de Vuelo (TOF), **Figura 27**. Este sistema de contadores de centelleo está compuesto por 2 planos superiores (inferiores), fabricados con placas de poliviniltolueno de 1 cm de grosor separados 1.2 m, dispuestos por encima (debajo) del imán. Cuando una partícula cargada los atraviesa, las moléculas del material se excitan y en el proceso de relajación se emite luz de fluorescencia en un corto intervalo de tiempo ($\sim 10^{-8}$ s) que se detecta en los extremos gracias a un conjunto de guías de luz y fotomultiplicadores. A partir de la diferencia de tiempos de llegada de las señales en los

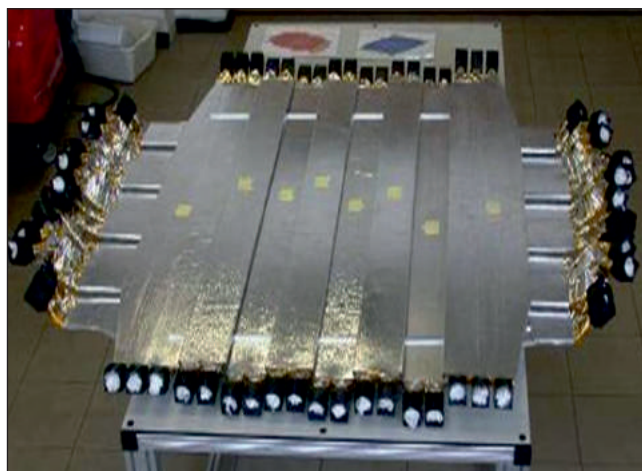


Figura 27. Uno de los Contadores de Tiempo de Vuelo (TOF)



Figura 28. Instalación de los Contadores de Anti-Coincidencia (ACC)

planos superior e inferior se puede determinar el sentido de incidencia de la partícula y, con una precisión del orden de 150 ps, el tiempo que tarda en atravesarlos y, por tanto, su velocidad. Por otra parte, la intensidad de la señal permite realizar una estimación de su carga.

Las partículas que penetran en el detector a través de las paredes del imán no atraviesan todos los detectores y sus características no pueden determinarse con precisión. Para rechazar este tipo de partículas hay un conjunto de 16 Contadores de Anti-Coincidencia (ACC) rodeando la pared interna del cilindro magnético, **Figura 28**. Estos contadores están contruidos con paneles de plástico centelleador de 8 mm de

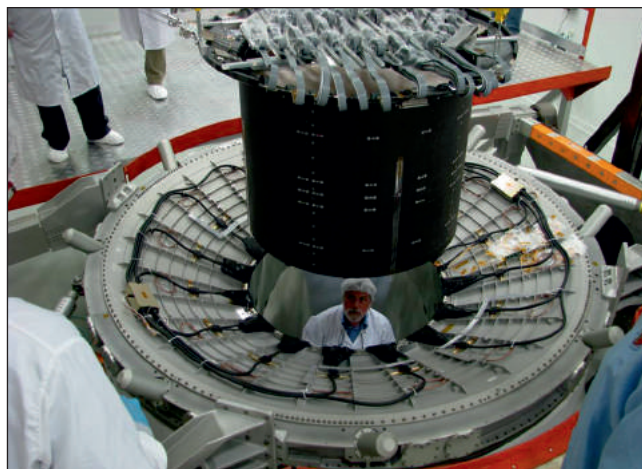


Figura 30. Integración del Detector de Trayectorias de Silicio (ST) en el imán

espesor (BICRON Bc414) y fotomultiplicadores que registran la luz emitida por éstos.

Los sub-detectores TOF y ACC son también parte esencial del sistema de adquisición de datos ya que, junto con el calorímetro electromagnético (ECAL), proporcionan la señal para comenzar a recoger la información proporcionada por un suceso.

En el interior del imán toroidal se encuentra un Detector de Trayectorias de Silicio (ST) formado por nueve planos de un entramado de bandas de silicio de alta pureza de 300 μm de grosor y 50 μm de separación, **Figuras 29 y 30**. Este detector permite determinar con gran precisión ($\sim 10 \mu\text{m}$) 9 puntos a lo largo de la trayectoria de la partícula, 7 de ellos dentro del volumen magnético. Cuanto mayor es el momento, mayor es el radio de curvatura de modo que a partir de éste se puede determinar la rigidez (momento sobre carga) de la partícula hasta valores de 2 TV. Por otra parte, la dirección de la curvatura proporciona el signo de la carga eléctrica permitiendo separar las partículas de materia y antimateria. Finalmente, a partir de la energía depositada por las partículas en las microbandas, también se puede obtener una determinación redundante del valor absoluto de su carga eléctrica. Un elemento esencial de este detector es un sistema óptico-mecánico que permite alinear los 7 planos de sensores de silicio dispuestos en el interior del imán con precisiones del orden de 10 μm .

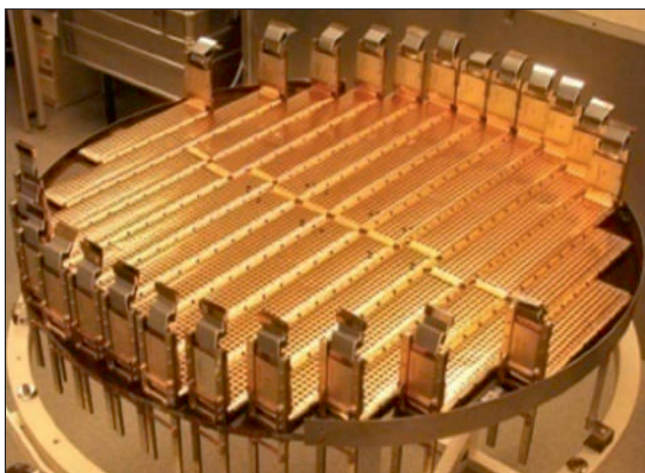


Figura 29. Uno de los planos del Detector de Trayectorias de Silicio (ST)

Debajo del imán y de los dos planos inferiores del Contador de Tiempo de Vuelo se encuentra el

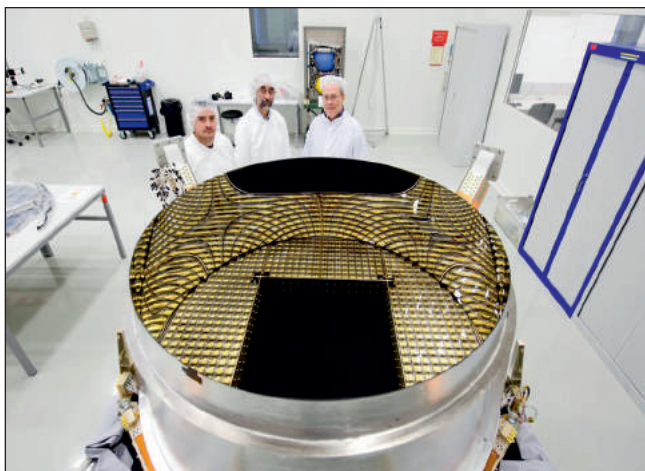


Figura 31. El Contador de Radiación Cherenkov (RICH)

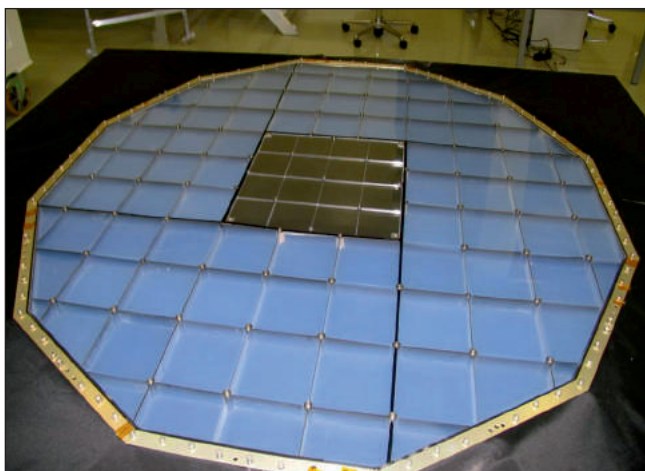


Figura 32. El radiador del RICH

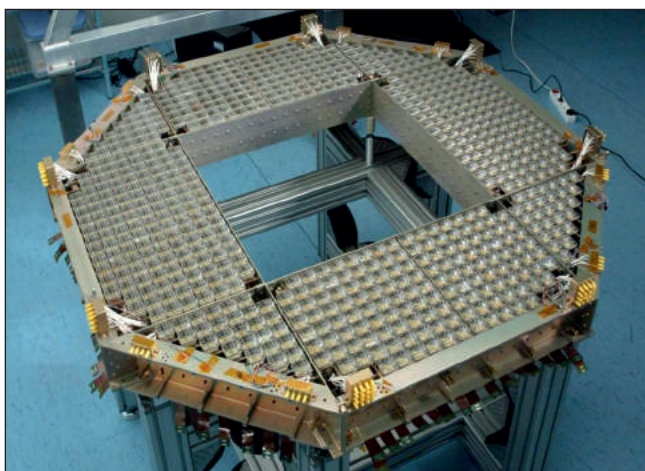


Figura 33. La matriz de fotomultiplicadores del RICH

Contador de Radiación Cherenkov (RICH), **Figura 31**. Este detector tiene la forma de un cono truncado de 114 cm (134 cm) de diámetro superior (inferior) y 47 cm de altura. Pesa 200 kg. La estructura mecánica del radiador consiste en 80 bloques rectangulares de aerogel de silicio de dimensiones $11.5 \times 11.5 \times 3$ cm e índice de refracción $n=1.03$ y 16 bloques centrales de fluoruro de sodio de dimensiones $8.5 \times 8.5 \times 0.5$ cm e índice de refracción $n=1.336$, **Figura 32**. Cuando una partícula cargada atraviesa este plano con una velocidad superior a la velocidad de la luz en el medio, polariza las moléculas del material induciendo la emisión de radiación electromagnética sobre un cono con el vértice centrado sobre la trayectoria de la partícula. La radiación emitida se detecta en un plano inferior situado a 47 cm formado por una matriz de 680 fotomultiplicadores, cada uno de los cuales consta de 16 píxeles, **Figura 33**. En total hay 10880 fotosensores. Con el propósito de aumentar la aceptación geométrica, la envoltura lateral del detector está formada por un reflector, construido a partir del compuesto BRYTE EX/1515/M55j Laminate, que redirige hacia el plano de detección los fotones que, de otro modo, escaparían por la superficie lateral. La apertura del cono permite determinar la velocidad de la partícula (con una precisión del 0.1%) de modo que, junto con el momento proporcionado por el Detector de Trayectorias de Silicio se conoce su energía y, a partir de la intensidad de la radiación detectada, se puede determinar el valor absoluto de la carga eléctrica.

Los positrones, antipartículas del electrón, tienen la misma carga eléctrica que los protones pero son mucho menos abundantes en la radiación cósmica: aproximadamente un positrón por cada cien mil protones. Es muy difícil distinguir entre protones y positrones (o electrones y antiprotones) de alto momento ya que sus trayectorias presentan una curvatura similar. Para poder separarlos eficientemente, el último elemento del espectrómetro es un Calorímetro Electromagnético (ECAL), **Figura 34**, que complementa al TRD. Este detector está formado por 9 capas dobles de 16.6 cm de grosor compuestas por láminas de plomo de 1mm de espesor y fibras de material centelleador con una superficie efectiva de $648 \times 648 \text{ mm}^2$ y un peso total de 496 kg. Cuando un electrón, positrón o fotón atraviesa las laminas de plomo se producen gran cantidad de electrones, positrones y fotones de menor energía que forman una cascada electromag-

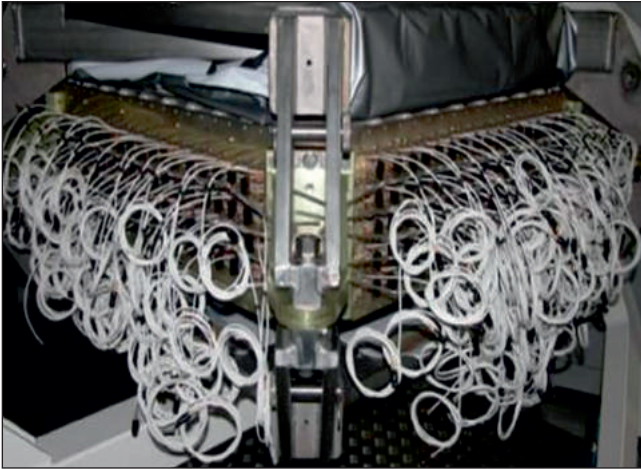


Figura 34. El Calorímetro Electromagnético ECAL

nética debida esencialmente a los fenómenos de frenado de la radiación electromagnética (*bremsstrahlung*) y de conversión de los fotones en pares electrón-positrón. Cuando la partícula que incide es un protón o un antiprotón se origina una *cascada* hadrónica caracterizada por la producción de muchos tipos de partículas (piones, kaones,...) con una forma distinta tanto longitudinal como transversal (más ancha). El ECAL permite reconstruir el perfil tridimensional de estas cascadas a lo largo de 18 planos pudiendo separar un positrón entre diez mil protones y determinar la dirección de la partícula incidente con una precisión de pocos grados.

Además de estos detectores, el espectrómetro AMS-02 contiene un receptor GPS que permite determinar con precisión su posición a lo largo de los 90

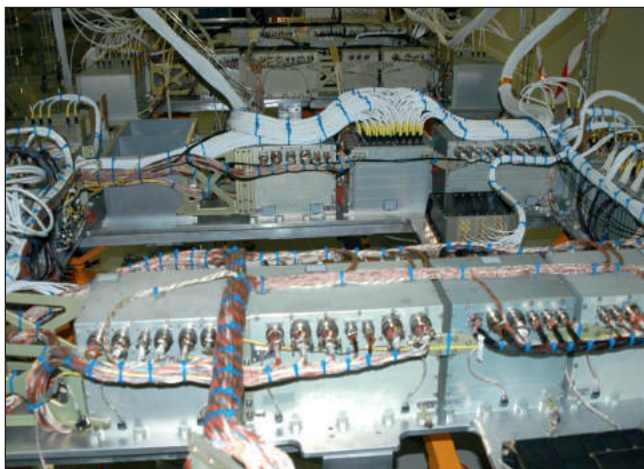


Figura 35. Electrónica de AMS-02

minutos de la órbita de la ISS, un dispositivo (*Star Tracker*) que determina la orientación tomando una imagen del fondo estelar cada 10 segundos y un complejo sistema de radiadores que disipan al espacio exterior el calor generado por los distintos subsistemas. La mayoría de los envases de la electrónica (*crates*) están mecánicamente anclados en los radiadores.

La electrónica asociada al experimento ha sido diseñada para operar en vacío, en ausencia de gravedad, y tolerar las vibraciones, los gradientes térmicos y las elevadas dosis de radiación, **Figura 35**. Está distribuida sobre 650 microprocesadores, con un factor de redundancia que alcanza el valor 6 para los elementos más críticos, que realizan tareas específicas: distribuir la tensión que llega al espectrómetro procedente de los paneles fotovoltaicos de la ISS entre los componentes electrónicos de los diferentes subsistemas, alimentar los dispositivos auxiliares (calefactores, bombas de vacío,...) y recoger y digitalizar aproximadamente dos mil veces por segundo la información que proporcionan los 300.000 canales de los detectores. El número de “raw bits” por suceso es del orden de 3700, lo que hace un total de aproximadamente 7.6 Gbit/s que debe comprimirse hasta un máximo de los 8 Mbit/s asignados a AMS-02 para la transmisión de datos a tierra desde la Estación Espacial Internacional.

FÍSICA FUNDAMENTAL CON AMS-02

La radiación cósmica primaria está compuesta por partículas subatómicas y núcleos atómicos que llegan a la Tierra procedentes del espacio exterior con un rango de energías muy superior a los que se obtienen en los laboratorios terrestres. El objetivo del experimento AMS-02 es realizar un estudio preciso de la composición, los flujos, la variación temporal, la propagación en el medio interestelar y los orígenes de sus diferentes componentes, desde protones y electrones hasta núcleos de hierro, acumulando estadística durante un largo periodo de tiempo. El análisis de los datos obtenidos permitirá abordar cuestiones de gran relevancia en la física de partículas y la cosmología como son la búsqueda de la antimateria primaria, la materia oscura y nuevas formas de materia, como los “*strangelets*”, no observadas en la tierra.

Antimateria

En 1928, el físico británico Paul Dirac, Premio Nobel de Física en 1933, formuló una teoría cuántica para describir el movimiento de los electrones en un campo electromagnético incluyendo la Relatividad Especial. Esta teoría describe en general el comportamiento libre de las partículas elementales de espín 1/2 (leptones y quarks) y predice la existencia de partículas de igual masa y espín que las de materia pero de cargas eléctricas opuestas: las partículas de antimateria. En 1932, C. D. Anderson, Premio Nobel de Física en 1935, descubrió en la radiación cósmica la primera antipartícula: el positrón, antipartícula del electrón.

Las antipartículas se producen en gran abundancia en los aceleradores de partículas y, en general, en todas partes del Universo en las que ocurran colisiones de alta energía. Por ejemplo, en las colisiones de los rayos cósmicos que inciden sobre la atmósfera terrestre o en las interacciones de partículas con el medio interestelar. En los primeros instantes del Universo, cuando éste se encontraba aún caliente, las partículas y antipartículas estaban en equilibrio termodinámico produciéndose y aniquilándose a pares. A medida que el Universo se expandía se fue enfriando hasta que, aproximadamente 10^{-6} segundos después del Big Bang, la energía de las colisiones no era suficiente para producir pares partícula-antipartícula. Si las cantidades de materia y antimateria hubiesen sido iguales, se habrían aniquilado y el Universo contendría sólo radiación electromagnética. Obviamente este no es el caso y, de hecho, el Universo que observamos desde la tierra está constituido esencialmente por partículas de materia (protones, neutrones y electrones) en lugar de antipartículas.

Para explicar el Universo que observamos, es necesario admitir que cuando estaba aún caliente, hubiese un pequeño exceso de materia sobre antimateria. En concreto, aproximadamente una mil millonésima de segundo después del Big Bang debería haber una partícula de materia adicional por cada mil millones de pares partícula-antipartícula que finalmente diese lugar a la formación de estrellas, planetas y galaxias. Desconocemos cuál es el origen de esta asimetría entre materia y antimateria. Es cierto que las interacciones entre partículas observadas en los laboratorios terres-

tres, en concreto las interacciones débiles responsables, entre otros fenómenos, de las desintegraciones nucleares, presentan una pequeña asimetría (denominada violación de CP) pero no es suficiente para dar cuenta del exceso de materia observado. Por otra parte, aunque el Universo observado esté formado por partículas de materia, podrían existir regiones del Universo con galaxias formadas por antimateria.

Entre 10^{-36} y 10^{-32} segundos después del Big Bang, el Universo experimentó un proceso de crecimiento exponencial (periodo de inflación cósmica) aumentando su volumen en un factor 10^{78} y es posible que regiones que, por fluctuaciones estadísticas, tuviesen un exceso de antimateria, se hubiesen expandido sin conexión causal con las regiones con exceso de materia originando la existencia de dominios de materia y dominios de antimateria en el Universo. Las galaxias de antimateria, tendrían las mismas propiedades químicas y la misma espectrometría que las galaxias de materia de modo que, desde el punto de vista observacional, serían idénticas a las de materia. En las regiones frontera entre estos dominios, la materia y la antimateria estarían en contacto de modo que se aniquilarían produciendo rayos gamma y zonas vacías entre los dominios que deberían observarse como anisotropías de la radiación de fondo de microondas. Las observaciones de rayos gamma y de la radiación de fondo indican que, de ser el caso, estos dominios deben de ser de un tamaño superior al Gpc ($\sim 3 \times 10^9$ años luz).

Los positrones y los antiprotones, partículas de antimateria, se pueden producir en las interacciones de los rayos cósmicos primarios con el medio interestelar y están presentes en la radiación cósmica aunque mucho menos abundantes que las correspondientes partículas de materia. Sin embargo, en estas colisiones no se producen antinúcleos de modo que la observación o no de núcleos de antimateria en el Universo es de gran relevancia para la cosmología y la física de partículas y la detección de sólo un núcleo de antihelio podría indicar la existencia de grandes cantidades de antimateria en algún lugar del Universo. En 1998, AMS-01 estableció que, si existe antihelio en el Universo, su abundancia es inferior a una millonésima de la de los núcleos de helio. El experimento AMS-02 alcanzará una sensibilidad mil veces superior a la de AMS-01 y extenderá significativamente el volumen

del Universo en que podemos estudiar la búsqueda de la antimateria primigenia.

Materia Oscura

La Materia Oscura consiste en partículas o cuerpos en el Universo que no emiten ni reflejan suficiente radiación electromagnética para poder ser observados directamente pero sí tienen efectos gravitatorios sobre cuerpos observados. La primera evidencia de la existencia de gran cantidad de materia oscura procede de los años 30 cuando, al aplicar el Teorema del Virial a las agrupaciones de galaxias (en particular al movimiento de las galaxias más periféricas), se observó que la masa contenida en los cúmulos galácticos debería ser unas 400 veces superior a la de la materia luminosa.

La evidencia más clara de la existencia de materia oscura llegó a finales de los 60 al estudiar, mediante el efecto Doppler, la velocidad de rotación de las estrellas periféricas en las galaxias elípticas (si bien posteriormente se comprobó el fenómeno en otros tipos de galaxias). Análisis más recientes que corroboran este hecho son los efectos de lente gravitatoria que se observa en las agrupaciones de galaxias. Según la Relatividad General, la trayectoria de los rayos luminosos procedentes de una galaxia lejana se curva al pasar cerca de una distribución de masa (como una agrupación de galaxias) formando múltiples imágenes o arcos del objeto emisor y, midiendo las distorsiones geométricas, se puede determinar la masa del cúmulo. Las distorsiones observadas indican la existencia de mucha más masa en los cúmulos que la puramente luminosa.

Todas estas observaciones indican que el 85% de la materia del Universo no experimenta interacciones electromagnéticas al menos de un modo apreciable y por tanto sea muy difícil su detección en laboratorios terrestres. Se han postulado diversos candidatos a Materia Oscura que esencialmente se pueden clasificar en tres grupos: Materia Oscura Bariónica, Materia Oscura Caliente y Materia Oscura Fría.

La Materia Oscura Bariónica comprende objetos de materia conocida no visibles (enanas marrones, planetas masivos,...) y la Materia Oscura Caliente con-

siste en partículas no bariónicas relativistas (como los neutrinos). Pero las observaciones indican que sólo contribuyen a la materia oscura en un porcentaje pequeño. Los candidatos más interesantes corresponden a la Materia Oscura Fría; esto es objetos no bariónicos con velocidades no relativistas, esencialmente porque las partículas con velocidades relativistas no se pudieron agrupar cuando la escala del Universo era pequeña y, de hecho, colisionan y rompen las agrupaciones de otros tipos de materia.

Las extensiones del Modelo Estándar que describe las interacciones entre partículas elementales estudiadas en los laboratorios terrestres proporcionan varios candidatos para Materia Oscura (axiones, neutralinos, bosones de Kaluza-Klein,...). De existir estas partículas, colisionarían entre ellas produciendo un exceso de partículas neutras o cargadas que se manifestaría como una estructura anómala en sus distribuciones de energía.

AMS-02 medirá con gran precisión los flujos de partículas y núcleos cósmicos y en particular los flujos de antiprotones, positrones y fotones. La presencia de distorsiones en alguna de estas distribuciones podría indicar la existencia de candidatos para explicar la materia oscura.

Partículas exóticas

Durante el largo periodo de toma de datos, el experimento AMS-02 realizará una búsqueda sistemática de posibles partículas aún no observadas (partículas exóticas). Un ejemplo son los denominados "*strangelets*". Experimentalmente se han identificado y estudiado con detalle 6 tipos de quarks (*up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* y *top*) pero toda la materia en la tierra está formada a partir de sólo dos tipos: *up* y *down* confinados en los protones y neutrones de los núcleos atómicos. Esto se debe a que los demás quarks son más pesados y se desintegran en estos mediante interacciones débiles. Sin embargo, los quarks del tipo *strange* pueden ser estables si, junto con los quarks *up* y *down*, se encuentran formando un agregado de muchos quarks con cantidades similares de cada tipo. Teóricamente estos estados de materia ("*strangelet*") serían aún más estables que los núcleos atómicos y se caracterizarían por tener una masa muy elevada y una fracción de carga sobre masa (Z/A) muy pequeña.

Los datos de AMS-01 pusieron de manifiesto la existencia de un candidato de *"strangelet"*, con un valor para Z/A cercano a 0.11. La probabilidad de que este rayo cósmico sea ruido instrumental se ha estimado en 0.1%. El extenso periodo de exposición de AMS-02, unido a su notable aceptación geométrica, permitirán coleccionar muestras estadísticas de sucesos de este tipo y producir evidencia significativa de los *"strangelets"*, en caso de que existan.

Composición y Flujo de los Rayos Cósmicos

El espectrómetro AMS-02 estará operativo en la ISS por un periodo superior a 10 años y recogerá un gran volumen de datos que permitirá determinar con precisión su composición, desde protones hasta núcleos de hierro, en un rango muy amplio de energías y estudiar las variaciones temporales de los flujos respectivos. Estos datos mejorarán nuestro conocimiento sobre el origen y los mecanismos de propagación de los rayos cósmicos. En particular la medida del cociente de los flujos de determinados isótopos, por ejemplo $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, permitirá realizar una determinación precisa del tiempo de confinamiento de los rayos cósmicos en la galaxia, así como de la densidad media del material interestelar atravesado por los rayos cósmicos.

Por otra parte, AMS-02 proporcionará un conocimiento detallado de la radiación cósmica que será de gran relevancia para la planificación de futuros vuelos espaciales tripulados.



Figura 36. Delegación del MICINN en el KSC, 28 de abril de 2011

Rayos Gamma

La medida precisa de los flujos difusos de rayos gamma podría también revelar el origen de la materia oscura, mientras que los estudios de rayos gamma procedentes de distintas fuentes, núcleos galácticos activos y estallidos de rayos gamma, podrían suministrar información acerca de posibles efectos debido a la gravedad cuántica.

PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN EL PROYECTO AMS

La participación española, coordinada por el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ministerio de Ciencia e Innovación) y en la que también han participado el IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias, Ministerio de Ciencia e Innovación), empresas punteras del sector aeroespacial (EADS-CRISA, IberEspacio) y recursos del CEDEX (Ministerio de Fomento) e INTA (Ministerio de Defensa), ha sido muy relevante y está financiada por el propio CIEMAT, el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial, Ministerio de Ciencia e Innovación) y por subvenciones a proyectos de investigación con cargo a distintos Programas Nacionales (Espacio, Física de Partículas) del Plan Nacional de Ciencia y Tecnología, **Figura 36**.

La contribución española se ha focalizado en tres áreas relevantes:

1. El diseño, construcción y validación del Contador de Radiación Cherenkov (RICH), **Figura 37**, para la medida precisa de la velocidad y carga eléctrica de las partículas y núcleos atómicos cósmicos. El CIEMAT realizó los estudios físicos necesarios para el diseño técnico detallado, participó en la construcción de numerosos componentes mecánicos, tarea a la que también contribuyó el IAC, eléctricos y electrónicos, asumió la responsabilidad de la integración del sistema completo en una sala limpia construida para este fin en sus instalaciones y de todas las pruebas de caracterización espacial realizadas en el INTA. También lideró las actividades de integración con el resto del instrumento y las pruebas de funcionalidad y verificación de pres-

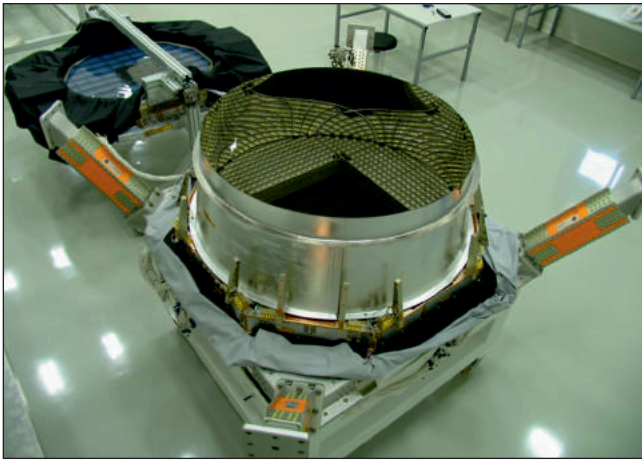


Figura 37. El Contador de Radiación Cherenkov (RICH) en el CERN

taciones con rayos cósmicos, con haces de partículas en el CERN, en la cámara Maxwell de Compatibilidad Electromagnética y en el Simulador Espacial Térmico del centro ESTEC de la Agencia Europea del Espacio (ESA) en Noordwijk (Holanda). Finalmente, el CIEMAT se ha responsabilizado de coordinar las pruebas definitivas del RICH realizadas en el KSC y el JSC desde finales de agosto de 2010. RICH permitirá medir con precisión los flujos de rayos cósmicos en un amplio intervalo de energías, información relevante para la validación y desarrollo de modelos de transporte y confinamiento en la galaxia de la radiación cósmica y para la puesta de manifiesto de nuevos fenómenos (por ejemplo, materia extraña).

2. El diseño, construcción y validación del sistema electrónico de control del imán superconductor CAB (*Cryomagnet Avionics Box*), **Figura 38**, que tiene como misión cargar eléctricamente el imán, realizar la telemetría con los cerca de 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*). La opción del imán superconductor era la originalmente contemplada cuando se firmó en 1995 el acuerdo entre el DOE y la NASA para la realización del proyecto AMS, que fijaba en tres años el tiempo de permanencia del instrumento AMS en la ISS. La ampliación de la vida útil de la ISS hasta 2028 y del periodo de operación de

AMS-02 a bordo de la ISS y la decisión de poner término a los vuelos de los trasbordadores en 2011 (que descarta la posibilidad de recargar con helio líquido el imán superconductor) están en el origen de la decisión, adoptada en abril de 2010, de reconfigurar AMS con el imán permanente utilizado en AMS-01 y robustecer el espectrómetro con planos adicionales de detectores de silicio. En este proyecto, el CIEMAT actuó como soporte interlocutor de EADS-CRISA con AMS y también contribuyó a la financiación de diversas tareas en la empresa británica SCL encargada del diseño y construcción del imán superconductor. La experiencia acumulada en criogenia y superconductividad para entornos espaciales será de gran utilidad para el desarrollo de misiones espaciales tripuladas de larga duración.

3. 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 en el CERN de este complejísimo instrumento, cuyos componentes han sido diseñados y fabricados en distintas partes del mundo. Así mismo, fue responsabilidad del CIEMAT la redacción de otro 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. Como resulta-



Figura 38. La caja aviónica CAB del imán superconductor

do de estos acuerdos se construyó una sala limpia en el CERN de 700 m², se ha construido en dicho laboratorio un nuevo edificio para albergar el Centro de Operaciones y Control de AMS (POCC) y se ha equipado el Centro de Operaciones Científicas (SOC) en una zona del Centro de Cálculo Científico del CERN.

EPÍLOGO

AMS-02 es un instrumento científico extraordinario que permitirá investigar en condiciones experimentales óptimas cuestiones científicas de máxima relevancia (trazas de antimateria cósmica primaria, señales de materia oscura, propagación y confinamiento de la radiación cósmica) y tal vez poner de manifiesto fenómenos nuevos (p. ej. materia extraña)

que sólo esta novedosa, potente 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 equipo AMS-CIEMAT agradece a todas las instituciones que han apoyado la realización de este proyecto y muy especialmente al CIEMAT, CDTI y MICINN. También quiere agradecer a la NASA, al CERN y al INFN la autorización para utilizar en este trabajo algunas imágenes.