

# ANTIMATERIA, SUPERCONDUCTIVIDAD, BIG BANG, LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL Y LOS VUELOS INTERPLANETARIOS

MANUEL AGUILAR BENÍTEZ DE LUGO \*

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

## RESUMEN

La aparente ausencia de antimateria en nuestra galaxia es una observación de extraordinario interés en Astrofísica de Partículas, una disciplina científica fronteriza entre la Física de Partículas Elementales, la Astrofísica de Altas Energías y la Cosmología. La hipótesis del *Big Bang* para el origen del Universo predice que, inmediatamente después de la gran explosión inicial, el Universo era simétrico en materia y antimateria. Las medidas realizadas hasta la fecha, de insatisfactoria precisión, no han detectado cantidades significativas de antimateria. La explicación de cómo el Universo ha evolucionado desde una configuración inicial simétrica (igual cantidad de materia y antimateria) a la situación actual (abrumadora preponderancia de materia en detrimento de antimateria) es un problema ciertamente fascinante y de gran actualidad.

La teoría de la antimateria fue propuesta en 1931 por el físico británico P.A.M. Dirac, Premio Nobel de Física en 1933, y hoy existe incontestable evidencia de que para cada partícula elemental existe su correspondiente antipartícula, de la que sólo se diferencia en el signo opuesto de algunas de sus propiedades estáticas como, por ejemplo, la carga eléctrica. Esta constatación es igualmente válida para los núcleos atómicos y los propios átomos. Desde hace décadas la antimateria es utilizada de manera rutinaria en los laboratorios de Física de Altas Energías como, por ejemplo, el CERN. Más recientemente la antimateria ha tenido aplicaciones prácticas en el terreno del diagnóstico médico y hay iniciativas para extender su utilización en determinadas terapias tumorales.

La superconductividad es un fenómeno macroscópico de origen cuántico descubierto en 1911 por H. Kamerlingh Onnes, Premio Nobel de Física en 1913. Algunos materiales, como por ejemplo aleaciones de niobio-titanio, no ofrecen resistencia al paso de la corriente eléctrica cuando son enfriados a temperaturas próximas al cero absoluto. Este fenómeno tiene una creciente utilización en laboratorios de Física de Altas Energías (imanes superconductores, cavidades de radiofrecuencia) y numerosas aplicaciones en el área del transporte (trenes levitados), energía (sistemas de almacenamiento y transporte de energía) y medicina (resonancia magnética nuclear).

Desde hace unos años, una colaboración científica internacional dirigida por S.C.C. Ting, Premio Nobel de Física en 1976, en la que participan grupos de investigación y empresas españolas, coordinados por el CIEMAT, está desarrollando un proyecto para la construcción de un instrumento (el espectrómetro magnético AMS-ALPHA Magnetic Spectrometer), con tecnología superconductora, para estudiar con precisión la radiación cósmica cargada y, en particular, cuantificar la posible existencia de antimateria hasta el confín observable del Universo. Está previsto que el detector AMS se instale en la Estación Espacial Internacional (ISS-International Space Station) en el año 2010.

En este trabajo se describirán algunos aspectos de este proyecto (antimateria, evolución del Universo, superconductores, experimentación en el trasbordador espacial Discovery y en la Estación Espacial Internacional) y las posibles aplicaciones relacionadas con los futuros vuelos interplanetarios tripulados, especial-



**Figura 1.** Paul A. M. Dirac (1902-1984), Premio Nobel de Física en 1933

mente el problema de la protección radiológica en misiones de larga duración.

## ANTIMATERIA

En 1928 el físico británico Paul A.M. Dirac (1902-1984), **Figura 1**, publicó dos célebres artículos titulados "*The Quantum Theory of the Electron*" en los que formulaba la ecuación relativista del electrón, predecía su momento magnético y explicaba el efecto Zeeman. Posteriormente, en 1931, publicaría otros dos artículos de excepcional importancia, "*A Theory of Electrons and Protons*" y "*Quantized Singularities in the Electromagnetic Field*", en el primero de los cuales se introducía la energía negativa de los electrones (huecos) y se intentaba identificar estos huecos con protones. En el segundo artículo se predecía la existencia del anti-electrón y del antiprotón y se indicaba la posible existencia de monopolos magnéticos.

En 1933 Paul A.M. Dirac recibió el Premio Nobel de Física, compartido con otro de los grandes creadores de la física atómica moderna, Edwin Schrödinger (1887-1961).

En su discurso de recepción del galardón, el 12 de Diciembre de 1933, Dirac explicaba que, de acuerdo con su teoría, el positrón o anti-electrón, es simplemente una imagen especular del electrón con exactamente la misma masa y carga eléctrica opuesta al tiempo que señalaba que esta nueva partícula debería

tener idénticas propiedades espinoriales. También anticipaba los mecanismos de aniquilación electrón-positrón liberando energía en forma de radiación electromagnética. En su discurso, Dirac mencionaba que sería deseable disponer de una teoría igualmente satisfactoria para el caso de protones y señalaba que esto exigiría la existencia de una partícula con la misma masa que el protón y carga eléctrica negativa, el antiprotón.

Dirac especulaba que, si se aceptaba la idea de una simetría completa entre partículas con cargas eléctricas positivas y negativas, debería considerarse que la observada preponderancia de electrones negativos y protones positivos en la Tierra, y posiblemente en todo el sistema solar, era un mero accidente y apuntaba la posibilidad de que para otras estrellas ocurriese exactamente lo contrario, esto es, que estuviesen formadas por electrones positivos (positrones) y protones negativos (antiprotones). Dirac sentenciaba que las dos clases de estrellas exhibirían exactamente el mismo tipo de espectros y que, con las técnicas astronómicas de la época, no sería posible distinguirlos.

En 1932 el físico norteamericano Carl D. Anderson (1905-1991), **Figura 2**, obtuvo la primera evidencia experimental acerca de la existencia de positrones estudiando la radiación cósmica cargada con cámaras de niebla. Este descubrimiento confirmaría la teoría de la antimateria de Dirac y sería galardonado con el Premio Nobel de Física en 1936. Anderson, que en 1937 descubriría junto con Seth Henry Neddermeyer



**Figura 2.** Carl D. Anderson (1905-1991), Premio Nobel de Física en 1936



**Figura 3.** Víctor F. Hess Dirac (1883 -1964), Premio Nobel de Física en 1936

el muón, compartiría este galardón con el físico austriaco Victor F. Hess (1883-1964), **Figura 3**, que, en 1912, había descubierto los rayos cósmicos.

En 1955 un grupo de investigadores trabajando en el Betatrón del Lawrence Berkeley Laboratory obtuvo la primera evidencia experimental acerca de la existencia del antiprotón. El Betatrón permitía producir protones con momentos en el intervalo 4,2- 6,2 GeV/c que se hacían colisionar con blancos de Cu. El dispositivo experimental consistía en cámaras ópticas de chispas y contadores electrónicos. Los investigadores Owen Chamberlain y Emilio Segrè recibieron por este descubrimiento el Premio Nobel de Física en 1959.

El descubrimiento del antiprotón en un experimento que utilizaba haces de partículas producidas en un acelerador marca el final de una época dominada por el estudio de la radiación cósmica como técnica para descubrir nuevas partículas elementales. Los rayos cósmicos permitieron descubrir el positrón, el muón, el pión y las partículas extrañas. A partir de mediados de los años 50 los aceleradores, las cámaras de burbujas y los dispositivos electrónicos pasarían a ser los grandes protagonistas en la búsqueda de nuevas partículas y nuevos fenómenos. Los sucesivos programas experimentales permitirían poner de manifiesto una rica espectroscopía que sería sistematizada por el esquema de simetrías SU(3), introducido por Murray Gell-Mann (Premio Nobel de Física en 1969) en 1962, y el modelo de *quarks*, introducido por el propio Gell-Mann y Zweig en 1964. El descubrimiento

del barión  $\Omega^-$  en el Laboratorio Nacional de Brookhaven en 1964, por Nicholas P. Samios y colaboradores, daría el espaldarazo definitivo a estas nuevas ideas teóricas.

Estos programas experimentales confirmaron la teoría de la antimateria de Dirac. Para cada partícula existe su correspondiente antipartícula que tiene iguales propiedades estáticas (masa, vida media, modos y relaciones de desintegración) y números cuánticos (en particular la carga eléctrica) cambiados de signo. Sin embargo, desde 1964, gracias a los trabajos de James W. Cronin y Val L. Fitch (Premios Nobel de Física en 1988) sobre las desintegraciones de los mesones extraños  $K^0$  sabemos que existen pequeñas diferencias (del orden del 1 por mil) en las propiedades del  $K^0$  y  $\text{anti-}K^0$ . Este fenómeno conocido como violación de la simetría CP no es exclusivo de los mesones  $K^0$ . Desde hace unos años el estudio detallado de las propiedades de los mesones que contienen en su composición un *quark b*, realizado en las instalaciones BaBar (SLAC, Estados Unidos) y BELLE (KEK, Japón), ha puesto de manifiesto la violación de esta simetría en las desintegraciones de los mesones  $B^0$ .

Habría que esperar hasta 1998 para que el estudio de la radiación cósmica, como técnica competitiva en física de partículas elementales, recobrase actualidad. En 1998, el estudio con el gigantesco detector SuperKamiokande (un volumen de 50.000 toneladas de agua ultra pura instrumentado con 11.146 fotomultiplicadores de 20" de diámetro), ubicado en el laboratorio subterráneo excavado a 700 m de profundidad en el Monte Ikeno (Japón), de los neutrinos muónicos producidos en la fase final del proceso inducido por las interacciones de rayos cósmicos, esencialmente protones, con la atmósfera, pondría de manifiesto que estos neutrinos cambian de identidad cuando viajan. Este fenómeno, conocido como oscilaciones de neutrinos, está relacionado con la aparente anomalía observada en el flujo de neutrinos solares y constituye un tema de máxima actualidad. El hecho de que los neutrinos tengan masas distintas de cero, consecuencia del observado fenómeno de oscilaciones, representa la primera evidencia experimental que contradice uno de las hipótesis del Modelo Estándar de Partículas Elementales e Interacciones. Ray Davis y Masatoshi Koshiba recibieron en 2001 el Premio Nobel de Física

por el desarrollo de las técnicas experimentales que hicieron posible estos descubrimientos.

Cuando Dirac formuló a principios de los años 30 su teoría de la antimateria, la comunidad científica consideró que se trataba de un interesante ejercicio intelectual con poca o nula relevancia práctica. Como suele suceder con frecuencia en el campo de la investigación básica, los hechos han venido a demostrar lo contrario. Por un lado, desde hace más de cuatro décadas es posible crear artificialmente en los laboratorios haces de antimateria, especialmente de positrones y antiprotones. Los haces de positrones han permitido estudiar el proceso de aniquilación electrón-positrón en un amplio intervalo de energías y poner de manifiesto la existencia de nuevas partículas (por ejemplo, el *quark c* y el leptón *tau*,  $\tau$ ). Los haces de antiprotones han permitido estudiar las colisiones protón-antiprotón y descubrir nuevas partículas (los *quarks b* y *t*, los bosones vectoriales  $Z^0$  y  $W^\pm$ ). Pero no sólo en el proceso de acopio de conocimiento el uso de la antimateria ha demostrado ser una herramienta fundamental. También en el terreno de la medicina la antimateria juega un papel relevante. Los tomógrafos por emisión de positrones utilizan la producción de radiación electromagnética en el proceso de aniquilación electrón-positrón para la detección de tumores. Más recientemente, en el CERN se están investigando los efectos de la irradiación de tejidos con haces de antiprotones con fines terapéuticos.

## SUPERCONDUCTIVIDAD

El descubrimiento de la superconductividad en 1911 por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), **Figura 4**, es un ejemplo paradigmático de una de las características más fascinantes de la investigación científica. La Ciencia tiene una forma de producir resultados que, con gran frecuencia, desafía la intuición humana.

En el último tercio del siglo XIX y principios del XX el estudio del comportamiento de los gases a distintas presiones y temperaturas era un tema de gran actualidad. En particular, la relación entre la presión, el volumen y la temperatura era tema central en el campo de la termodinámica y había merecido la atención, entre otros, del también físico holandés Van der Waals



**Figura 4.** Heike Kamerlingh Onnes (1853 -1926), Premio Nobel de Física en 1913

que, entre 1873 y 1880, formuló sus famosas leyes termodinámicas. La observación de que determinadas propiedades de los gases cambian con la temperatura en desacuerdo con las leyes de Van der Waals propiciaron una importante actividad experimental en el laboratorio que Kamerlingh Onnes creó en 1880 en Leyden y que fue pionero en lo que hoy se conoce como física de bajas temperaturas.

En el laboratorio de Leyden se consiguió por primera vez condensar helio a la temperatura de 4,3 K, el único gas conocido que quedaba por licuar. Las técnicas experimentales desarrolladas con este fin permitieron a su vez estudiar las propiedades de diversos materiales a temperaturas no alcanzadas hasta la fecha. Los resultados de estas medidas pusieron de manifiesto que las leyes que rigen el comportamiento de materiales a muy bajas temperaturas son diferentes de las que explican estos comportamientos a temperatura ambiente o por encima de ella. En particular, se observó que la resistencia a la conducción eléctrica en el caso de metales puros, como el mercurio, estaño y plomo, disminuye drásticamente con la temperatura originando las llamadas corrientes persistentes. Así, por ejemplo, una corriente de varios centenares de amperios puede circular por una bobina de plomo, enfriada a la temperatura adecuada durante 30 meses, sin que se observen cambios apreciables en su intensidad.

Por estos trabajos, Kamerlingh Onnes recibió en 1913 el Premio Nobel de Física.

En las décadas siguientes se descubrieron numerosas propiedades de los materiales superconductores conocidos (posteriormente denominados de tipo I), una de ellas es la no penetración de un campo magnético externo en un superconductor (efecto Meissner), pero hasta 1957 no se formuló una teoría completa de la superconductividad. John Bardeen, Leon N. Cooper y John R. Schrieffer descubrieron que el mecanismo responsable de la superconductividad está relacionado con el acoplamiento de electrones a las vibraciones de los átomos de un retículo cristalino. En definitiva, la superconductividad es un espectacular fenómeno macroscópico de origen cuántico. La teoría desarrollada por Bardeen, Cooper y Schrieffer explica con detalle las propiedades de los materiales superconductores y predice nuevos efectos que han abierto novedosas líneas de investigación. En 1972 los tres investigadores recibieron el Premio Nobel de Física.

El hecho de que la transición de un metal desde el estado resistivo al superconductor tuviese lugar a temperaturas próximas al cero absoluto limitó en un principio las aplicaciones prácticas, circunstancia que ha ido evolucionando. Hoy en día los materiales superconductores se utilizan para la construcción de imanes para aceleradores de partículas (los 1232 dipolos superconductores del colisionador LHC (Large Hadron Collider) del CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear) han utilizado 7000 km de cable de niobio-titanio), para dispositivos de diagnóstico (resonancia magnética) y terapia (ciclotrones para producción de radio-isótopos) en medicina avanzada, en sistemas de transporte (trenes levitados) y dispositivos de almacenamiento y transporte de energía. Excelentes perspectivas parecen surgir en el campo de la fabricación de ordenadores y en diversos sectores de la ingeniería pesada.

Desde el descubrimiento de Kamerlingh Onnes en 1911 numerosos grupos de investigación han tratado de identificar nuevos compuestos que exhibieran propiedades superconductoras a temperaturas superiores a la temperatura de ebullición del helio ( $-269$  °C). En 1973 se desarrolló una aleación que tenía estas propiedades a  $-250$  °C y, en 1986, Georg Bednorz y Alex Müller consiguieron fabricar un material cerámico (óxido metálico) que tenía comportamiento superconductor a  $35$  °C por encima del cero absoluto. El descubrimiento de Bednorz y Müller, galardonados

con el Premio Nobel de Física en 1987, generó una frenética actividad en numerosos laboratorios, obteniéndose en un corto espacio de tiempo nuevos materiales que mostraban comportamiento superconductor por encima de  $90$  K. Estos nuevos materiales superconductores de “alta temperatura” pueden enfriarse con nitrógeno líquido y abaratar los costes de sus posibles aplicaciones. En cualquier caso, a pesar de los avances significativos de esta disciplina en los últimos 20 años, aún no se conoce el mecanismo responsable de este fenómeno en este tipo de materiales. No es obvio que la teoría de Bardeen, Cooper y Schrieffer sea capaz de explicar los efectos observados y probablemente sea necesario reconsiderar ciertos aspectos del movimiento e interacción de electrones en sustancias sólidas.

En 1937 el físico ruso Pyotr Leonidovich Kapitsa (1894-1984) culminó una serie de experimentos destinados al estudio de las propiedades del helio líquido con el descubrimiento de la superfluidez en el isótopo helio-4 ( $^4\text{He}$ ), un líquido con las propiedades de la estadística de Bose-Einstein. Este fenómeno consiste en la desaparición de la fricción interna del fluido (viscosidad) por debajo de  $2.2$  K (el denominado punto lambda del helio). Por éste y otros importantes inventos (en particular, en relación con la producción de campos magnéticos intensos) y descubrimientos en el área de la física de bajas temperaturas, Kapitsa recibió en 1978 el Premio Nobel de Física. Curiosamente, Kapitsa compartiría este galardón con Arno Allan Penzias y Robert Woodrow Wilson que, a principios de la década de los 60, descubrieron la radiación cósmica de microondas utilizando receptores muy sensibles en las instalaciones de los Laboratorios Bell Telephone en Holmdel, New Jersey. Esta radiación de fondo resultó ser igual en todas direcciones e independiente del tiempo. Su intensidad correspondía a una temperatura en antena de  $3$  K. El descubrimiento de esta radiación, “la luz fría”, es uno de los más extraordinarios hallazgos científicos del pasado siglo. Su estudio detallado ha sido uno de los ingredientes esenciales para cuantificar y entender de qué esta hecho el Universo y cómo su composición ha ido cambiando con el curso del tiempo. La experimentación en este campo (en particular con los satélites COBE y WMAP) ha exigido técnicas criogénicas basadas en las propiedades del helio superfluido.

El estudio de las propiedades del helio a bajas temperaturas ha permitido seguir haciendo importantes descubrimientos. En 1972, David Lee, Douglas Osheroff y Robert Richardson descubrieron la superfluidez en el isótopo helio-3 ( $^3\text{He}$ ), un líquido que obedece a la estadística de Fermi-Dirac y por el que recibieron en 1996 el Premio Nobel de Física. En 2003, Alexei Abrikosov, Vitaly Ginzburg y Anthony Leggett recibieron el Premio Nobel de Física por sus contribuciones pioneras a la teoría de superconductores y superfluidos, fenómenos cuánticos que, con bastante probabilidad, seguirán deparándonos sorpresas.

## LOS RAYOS CÓSMICOS Y LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

No es aventurado afirmar que todo lo que conocemos acerca del Universo se debe al estudio de la radiación cósmica, fundamentalmente de su componente neutra y más precisamente de la radiación electromagnética. Los últimos 50 años han sido testigos de una intensa actividad experimental que ha producido importantes descubrimientos, varios de ellos galardonados con el Premio Nobel de Física (PNF). Es el caso del descubrimiento de la radiación de fondo de microondas que ya hemos mencionado (Penzias & Wilson, 1978), del descubrimiento de los púlsares (Ryle & Hewish, PNF 1974) y de los púlsares binarios (Hulse & Taylor, PNF 1993), del descubrimiento de fuentes emisoras de rayos X (Giacconi, PNF 2002) y del descubrimiento de la anisotropía del fondo de la radiación cósmica de microondas (Smoot & Mather, PNF 2005). El estudio de la otra componente de la radiación cósmica neutra, los neutrinos, también ha sido galardonado con el Premio Nobel (Davis & Koshiba, PNF 2002).

El estudio de la radiación cósmica cargada, la más dominante, ha permitido realizar descubrimientos importantes, como los ya mencionados del positrón en 1933 y del muón en 1937, así como del pión en 1947 (Powell, PNF 1950) y de las partículas extrañas en 1947, sin olvidar los trabajos pioneros de P.M.S. Blackett en la década de los 30 sobre cámaras de niebla que permitieron confirmar la presencia de partículas cargadas penetrantes en la radiación cósmica (Blackett, PNF 1948).

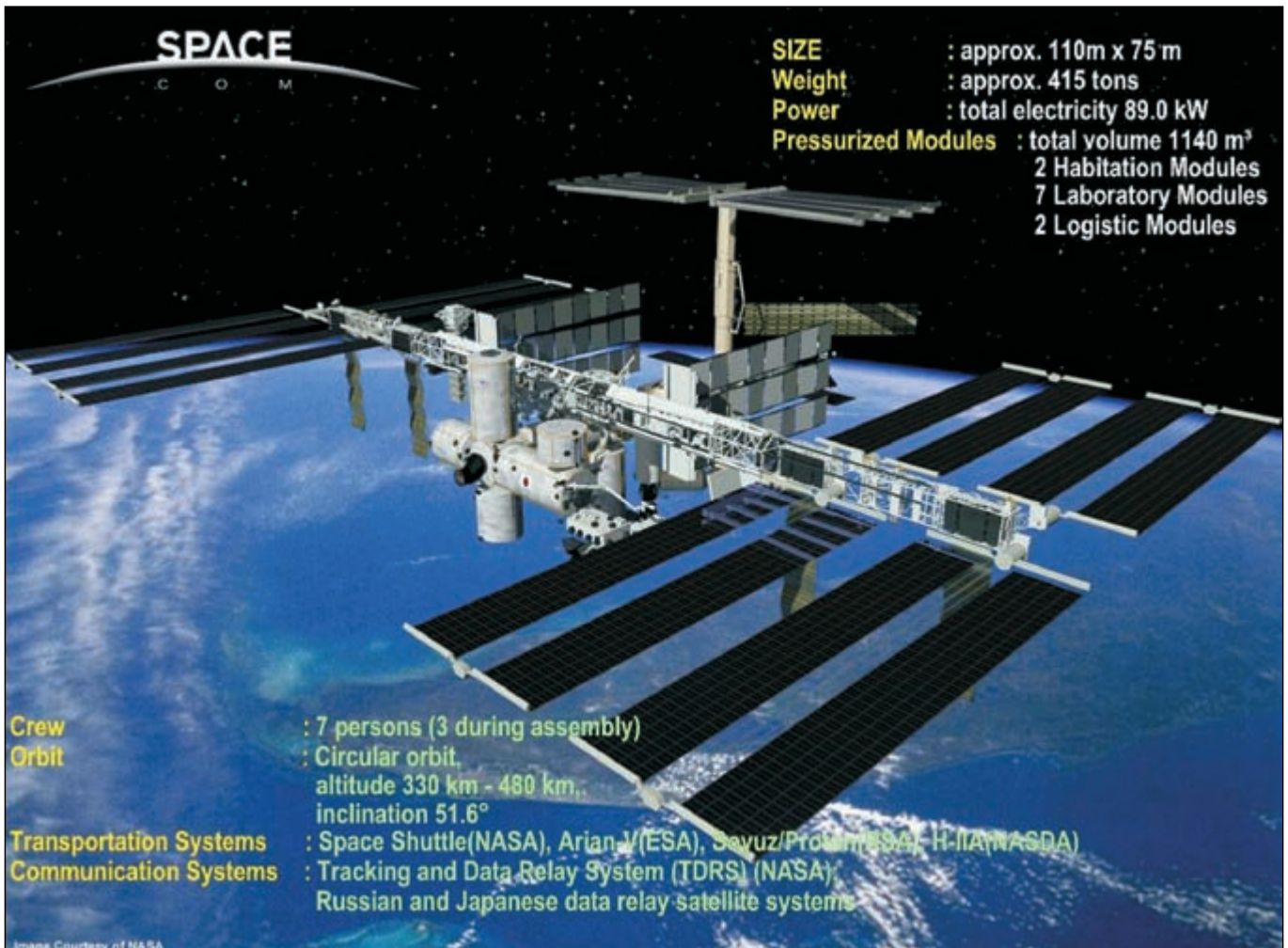
El estudio preciso de las propiedades de los rayos cósmicos (en particular de su energía, masa y carga eléctrica) no está exento de dificultades y diversas técnicas experimentales han sido utilizadas desde su descubrimiento hace casi un siglo por V. F. Hess. La utilización de dispositivos instrumentales localizados en la superficie terrestre viene limitada por el hecho de que la radiación cósmica atraviesa la atmósfera (de unos 100 km de espesor) antes de llegar a los sistemas de detección. Esto implica que lo que realmente registran los detectores es el resultado de la degradación de la radiación cósmica primaria al atravesar el equivalente de 10 m de agua y es preciso reconstruir sus propiedades a partir de las cascadas de interacciones que se van produciendo en su recorrido a través de la atmósfera. Para rayos cósmicos primarios de muy alta energía estas cascadas pueden dar lugar a decenas de miles de partículas secundarias.

La reconstrucción de la energía del rayo cósmico primario exige la utilización de algoritmos complicados, en buena medida similares a los que se utilizan en determinados detectores (calorímetros hadrónicos) en física de partículas para la medida de la energía de hadrones. Desgraciadamente, en el caso de los rayos cósmicos no es posible utilizar los procedimientos experimentales de calibración basados en la utilización de haces de partículas producidos en aceleradores. La "calorimetría atmosférica" lleva asociada errores sistemáticos importantes y de ahí las discrepancias observadas en la medida del espectro de energías en distintos experimentos (por ejemplo, AGASA y HiRes).

Sí bien es cierto que la medida de la energía, especialmente para valores altos, es tarea difícil aunque abordable, la medida de la carga eléctrica no es factible con los dispositivos experimentales en superficie. En el caso de los rayos cósmicos primarios con carga eléctrica negativa la situación es aún más complicada debido a los procesos de aniquilación que tienen lugar con la materia atmosférica.

La utilización de sistemas de detección localizados a bordo de globos sonda, satélites y otras plataformas espaciales puede, en principio, limitar los efectos debidos a la presencia de la atmósfera si se sitúan en órbitas suficientemente lejanas, aunque no es de fácil implementación las técnicas habitualmente utilizadas en experimentos de física de partículas para la medida





**Figura 5.** Vista artística de la Estación Espacial Internacional

de la energía y la carga eléctrica. Estas técnicas se basan en la curvatura de las trayectorias de partículas cargadas en presencia de campos magnéticos. El sentido de la curvatura proporciona el signo de la carga y la sagita de la curvatura la medida del momento cinético. La determinación del valor absoluto de la carga eléctrica y de la masa necesita de detectores basados en otros efectos físicos (radiación de transición, radiación Cerenkov, tiempos de vuelo, etc).

La operación de imanes en dispositivos que operan en el espacio entraña una dificultad fundamental: la necesidad de un suministro de potencia eléctrica, algo no fácil de conseguir en este entorno debido entre otras razones a las restricciones de peso impuestas a la instrumentación espacial. Estas condiciones de contorno (limitación de peso y de disponibilidad de suministro eléctrico) han sido las razones principales que

han hecho fracasar los diversos intentos de enviar al espacio espectrómetros magnéticos de altas prestaciones.

Conceptualmente, la solución a estos problemas es construir un espectrómetro magnético basado en tecnología superconductor y ubicarlo en una base espacial. Esta es la estrategia seguida por la colaboración AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) que ha elegido como plataforma la International Space Station (ISS) y que describimos brevemente a continuación.

La Estación Espacial Internacional, **Figura 5** y **Figura 6**, 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 colabo-



**Figura 6.** Vista de la Estación Espacial Internacional tomada en Agosto de 2008

ración 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. En la actualidad la plataforma está construida al 70% y su terminación está prevista para 2010. En principio se ha programado que la ISS esté en servicio hasta el año 2016, aunque esta fecha podría ser reconsiderada ampliándose el periodo de operación de la plataforma.

El elemento esencial en el proceso de ensamblaje en órbita de la ISS son los trasbordadores espaciales de la NASA (Discovery, Endeavor, Atlantis) que transportan los distintos componentes de la instalación. 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 trasbordador 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 Marzo de 2008 la propia Agencia Europea del Espacio lanzó el vehículo no tripulado Jules Verne que también contribuirá al mantenimiento y operación de la estación.

La ISS es el instrumento de coste más elevado construido 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, que el CERN va a poner en funcionamiento en la segunda mitad del año 2009, o que el reactor experimental de fusión termonuclear por confinamiento magnético ITER cuya construcción está prevista que finalice dentro de 15-20 años.

Un vez completada, la ISS tendrá unas dimensiones de 58,20×73,15×27,40 metros (longitud×anchura×altura) y pesará 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 cuando la ISS esté en pleno funcionamiento 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). 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 10<sup>7</sup> moléculas/cm<sup>3</sup>, 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 modulo 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 programas experimentales que requerirían o se benefi-



ciarían 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 en el año 2010 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 y el peso de la instrumentación, 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 PROYECTO AMS (ALPHA MAGNETIC SPECTROMETER) MOTIVACIÓN CIENTÍFICA

El Modelo del *Big Bang*, formulado originalmente por George Gamow y Ralph Alpher en los años cuarenta, es en la actualidad una teoría ampliamente aceptada sobre el origen y evolución del Universo. Postula que hace aproximadamente 14 mil millones de años la porción del Universo observable hoy en día tenía sólo unos milímetros de tamaño. Desde entonces se ha dilatado a partir de un estado denso y caliente hasta el vasto y mucho más frío cosmos que habitamos. Los pilares teóricos básicos del Modelo del *Big Bang* son la Relatividad General y el Principio Cosmológico. La Relatividad General, formulada por Albert Einstein en 1916, es una nueva teoría de la gravedad que generaliza la teoría original formulada por Isaac Newton hacia 1680, que sigue siendo válida para explicar el movimiento de objetos a velocidades muy pequeñas comparadas con la velocidad de la luz. Una idea esencial y revolucionaria en la teoría de Einstein es que la gravedad es una distorsión del

espacio-tiempo. El Principio Cosmológico establece que la distribución de materia en el Universo es homogénea e isotrópica cuando se promedia sobre grandes escalas.

El Modelo del *Big Bang* proporciona una descripción correcta de numerosas observaciones astronómicas, astrofísicas y cosmológicas. En particular, la evolución del Universo a partir de un origen extremadamente denso y caliente, que se ha ido expandiendo y enfriando hasta su estado actual, permite explicar la abundancia relativa (con respecto al H) de los elementos ligeros D,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  (nucleosíntesis primordial), predice la expansión del Universo (ley de Hubble), la existencia del fondo de radiación cósmica de microondas (que obedece la fórmula de Planck para la radiación del cuerpo negro), y de pequeñas anisotropías (1 parte en  $10^5$ ) en su intensidad entre diferentes direcciones del cielo.

El Modelo del *Big Bang* distingue dos etapas diferenciadas en la evolución del Universo. Una primera que abarca los primeros 50.000 años (la era de la radiación) y una segunda que se prolonga hasta nuestros días (la era de la materia). La era de la radiación incluye diversas fases (era de Planck o de gravedad cuántica, era de la gran unificación o de ruptura electrodébil, desacople de neutrinos y nucleosíntesis primordial) que son posibles fuentes de efectos observables (ondas gravitacionales, monopolos magnéticos, cuerdas, partículas supersimétricas, bariogénesis, fondo cósmico de neutrinos, abundancia de núcleos ligeros, etc). La era de la materia incluye la fase de recombinación que da lugar al fondo cósmico de microondas y posteriormente la formación de cuerpos celestes.

La fase de ruptura electrodébil, que tuvo lugar  $\sim 10^{-10}$  segundos después de la explosión inicial, es la que se ha estudiado exhaustivamente en los laboratorios de Física de Partículas. En particular, en el curso del programa experimental del acelerador LEP del CERN (1989-2000). Estos estudios validaron el Modelo Estándar de Física de Partículas e Interacciones que proporciona una descripción correcta y muy precisa de los fenómenos que tienen lugar a la energía ( $\sim 100$  GeV) o temperatura ( $\sim 10^{15}$  K) del Universo en ese instante de su evolución, cuando su tamaño era del orden de  $\sim 10^{-18}$  metros. El programa

del acelerador LHC del CERN que se iniciará en la segunda mitad del año 2009 seguramente proporcionará valiosa información acerca de la era de la gran unificación.

En algún momento de la era de la radiación, tal vez durante la fase inflacionaria o de expansión exponencial (entre  $10^{-35}$  y  $10^{-33}$  segundos), debió producirse el proceso de bariogénesis que dio lugar a la desaparición parcial o total de la antimateria. Aunque no hay una explicación validada experimentalmente de este fenómeno existen diversas propuestas. Una de ellas, debida al físico ruso Andrei Sakharov (Premio Nobel de la Paz en 1975), argumenta en favor de una explicación basada en las leyes de la microfísica y requiere tres ingredientes: (1) Violación del número bariónico en las leyes fundamentales, (2) Violación de la simetría CP y (3) Desviación del estado de equilibrio térmico. Desgraciadamente, en la actualidad no hay evidencia experimental acerca de la inestabilidad del protón (los límites obtenidos para los modos de desintegración favorecidos en la teorías de Gran Unificación son superiores a  $10^{32}$  años). Tampoco la magnitud de los efectos de violación de la simetría CP en las desintegraciones de  $K^0$ s y  $B^0$ s podría explicar el déficit de antimateria. Finalmente sabemos, gracias a la forma del espectro de la radiación de fondo de microondas, que el Universo se encontraba en equilibrio térmico al menos a partir de  $10^5$  años después del *Big Bang* y la nucleosíntesis primordial sugiere que esa situación existía ya  $\sim 200$  segundos después de la explosión inicial.

En ausencia de una satisfactoria explicación teórica del fenómeno de bariogénesis, parece primordial proceder a una cuantificación precisa del remanente de antimateria, en caso de haberlo, en la totalidad del Universo visible ( $\sim 10^{24}$  km). Este es uno de los objetivos prioritarios del programa del experimento AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) que describiremos más adelante.

La existencia de materia oscura, una variedad de materia que aparentemente no emite ni absorbe radiación electromagnética, está bien establecida. La inicial y más convincente evidencia en favor de su existencia procede de la observación de que diversos objetos luminosos celestes (estrellas, nubes gaseosas, cúmulos globulares, o galaxias completas) se mueven

con más rapidez de lo esperable en el caso de que sólo sintieran la atracción gravitatoria de otros objetos visibles. El ejemplo paradigmático son las curvas de rotación de numerosas galaxias.

Medidas cosmológicas de creciente precisión (las anisotropías en la radiación del fondo de microondas, la variación de la luminosidad de supernovas del tipo SIa con el parámetro  $z$  [*red-shift*], para altos valores del mismo, y la evolución de la distribución espacial de los cúmulos galácticos) han permitido determinar, en el contexto del Modelo Cosmológico Estándar, las densidades relativas  $\Omega_i \equiv \rho_i/\rho_c$ , siendo  $\rho_c$  la densidad crítica ( $\rho_c \approx 10$  protones/m<sup>3</sup>), para las distintas formas ( $i$ ) de masa y energía, con densidades  $\rho_i$  y presiones  $p_i \equiv w_i\rho_i$ , que existen en el Universo. Las medidas más precisas indican que, en la actualidad, el Universo está compuesto de aproximadamente 30% de materia y 70% de energía. La mayor parte de la materia ( $\sim 80\%$ ) es materia oscura. La componente de energía en el Universo tiene naturaleza misteriosa y se postula como responsable de la observada expansión acelerada del Universo. Se denomina energía oscura.

La comprensión de la naturaleza de la materia oscura y de la energía oscura son temas centrales en Astrofísica de Partículas. Estas cuestiones han dado lugar a un muy ambicioso y diversificado programa experimental, con instrumentación en laboratorios subterráneos, astronómicos y espaciales. La detección de materia oscura en la radiación cósmica es otro de los temas prioritarios del proyecto AMS.

Aunque la búsqueda de candidatos (partículas elementales) de materia oscura es objetivo prioritario de los experimentos con aceleradores de partículas y muy especialmente del LHC, es obvio que la asociación no ambigua de este nuevo tipo de hipotéticas partículas producidas artificialmente, por ejemplo partículas supersimétricas, con la materia oscura cósmica requiere detectar su presencia en la radiación cósmica y verificar que tienen las mismas propiedades. De ahí el interés científico del proyecto AMS.

Aunque la búsqueda de antimateria cósmica y de señales de materia oscura son objetivos prioritarios del proyecto AMS, existen otras cuestiones científicas que este instrumento ayudará a dilucidar. La propagación de la radiación cósmica en el espacio podrá estudiarse



**Figura 7.** Samuel C. C. Ting, Premio Nobel de Física en 1976

con técnicas de datación novedosa utilizando medidas relativas de flujos de determinados isótopos de núcleos con diferentes vidas medias, por ejemplo  $^9\text{Be}$  y  $^{10}\text{Be}$ . AMS también contribuirá a esclarecer la existencia o no de una hipotética nueva forma de materia formada por partículas extrañas (que en su contenido tiene el *quark s*). Estos agregados, denominadas “*strangelets*” han sido buscados sin éxito en los últimos años en experimentos en aceleradores de partículas y, según algunas propuestas teóricas, podrían formar parte de las denominadas estrellas de neutrones en una ulterior fase de su evolución.

La idea de desarrollar un instrumento capaz de medir con alta precisión estadística y sistemática las propiedades de la radiación cósmica primaria se remonta a 1994 cuando el Profesor S. S. C. Ting, **Figura 7**, del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), Premio Nobel de Física en 1976, propuso al Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos la construcción de un detector de altas prestaciones para ser desplegado a bordo de la Estación Espacial Internacional. Conceptualmente, la idea era fabricar un instrumento siguiendo técnicas y procedimientos comúnmente utilizados en experimentos de Física de Partículas aunque adaptadas a las exigentes condiciones medioambientales de la investigación espacial. En particular el peso del detector y su consumo eléctrico debían respetar las limitaciones impuestas por la NASA (6700 kg y 2 kilovatios de potencia) y toda la instrumentación debería cumplir las

draconianas condiciones de seguridad que afectan a todos los vuelos tripulados (ausencia total de interferencias con los instrumentos de navegación de los trasbordadores y de la Estación Espacial Internacional).

Al margen de cuestiones de seguridad, el éxito científico de una misión espacial depende del correcto funcionamiento de todos los sistemas que componen el instrumento en las condiciones hostiles espaciales: aceleración 3 g en el despegue, deceleración 6,5 g en el aterrizaje, vibraciones (150 db), gradientes de temperatura del orden de  $100\text{ }^\circ\text{C}$  ( $-65\text{ }^\circ\text{C}/+40\text{ }^\circ\text{C}$ ), radiación ambiental, alto vacío, microgravedad, impacto de micro-meteoritos, etc. Habida cuenta de la imposibilidad práctica de reparar fallos funcionales del detector en órbita la instrumentación espacial exige un alto grado de redundancia.

En 1995 se firmó el protocolo de colaboración entre la NASA y el DOE, correspondiendo al DOE el liderazgo científico de la misión y la organización de la colaboración internacional que construiría el instrumento y a la NASA el suministro de tres vuelos de trasbordadores, el desarrollo de las interconexiones mecánicas y eléctricas entre el instrumento, los trasbordadores y la ISS, la puesta a disposición de la colaboración de los sistemas de transmisión de datos, la elaboración y ejecución de los protocolos de seguridad, etc.

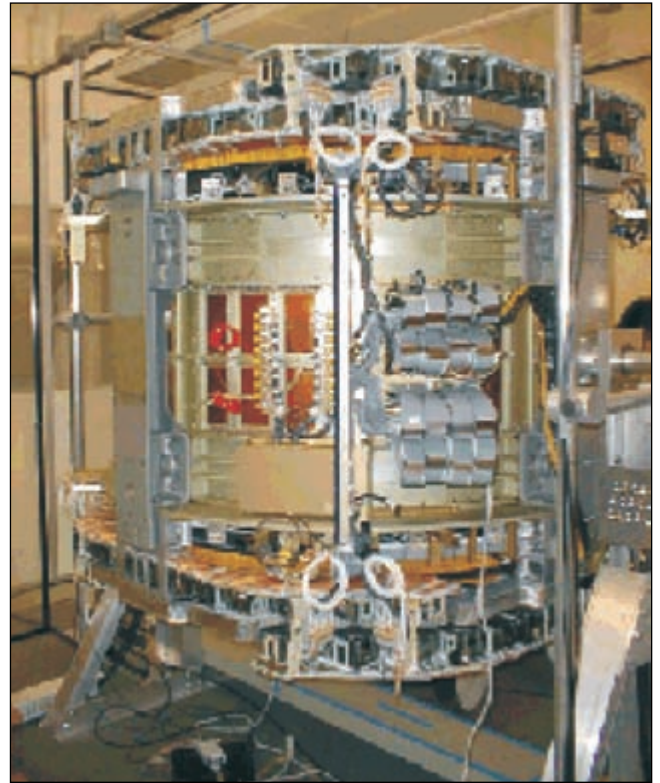
Las diversas incidencias acaecidas al telescopio Hubble en su fase inicial de operación, que generó operaciones de reparación en la órbita espacial muy costosas y delicadas, explica la estrategia impuesta por la NASA a la Colaboración AMS y que establecía la realización del proyecto en dos etapas. En una primera etapa la colaboración construiría un instrumento prototipo (AMS-01) que validaría el concepto experimental en un vuelo precursor de uno de los trasbordadores a la estación espacial rusa MIR. En una segunda etapa se construiría un instrumento (AMS-02), con los últimos avances tecnológicos, que sería transportado a la ISS en donde permanecería instalado por un periodo no inferior a 3 años. La diferencia esencial entre AMS-01 y AMS-02 radica en el sistema magnético. En el primer caso se ha utilizado un imán permanente, construido en un instituto de la Academia de Ciencias China en Pekín, que genera un campo magnético de 0,15 Teslas (1500 G) y en el segundo

caso se utilizará un imán superconductor, construido en la empresa Space Cryomagnetics Ltd. en Oxford, que opera a la temperatura de 1,9 K y que produce un campo magnético de 0,86 Teslas (8600 G).

## EL INSTRUMENTO AMS-01

El diseño y la construcción de AMS-01 se hicieron siguiendo la filosofía y los criterios de los experimentos de física de partículas. Los objetivos del experimento exigían medir la carga eléctrica de la radiación cósmica (para distinguir partículas y antipartículas, que tienen cargas de signo opuesto), lo que implicaba la existencia de un campo magnético que curvase en direcciones opuestas las partículas cargadas positiva o negativamente y un detector que midiese con precisión coordenadas a lo largo de las trayectorias de la radiación cósmica. Como se ha mencionado en el párrafo anterior, el campo magnético es producido por un imán permanente construido por sectores, cada uno de ellos compuesto de 100 bloques de una aleación de gran pureza de Nd-Fe-B de dimensiones  $2'' \times 2'' \times 1''$ . El imán tiene forma cilíndrica, de 800 mm de longitud, diámetro interno 1115 mm y diámetro externo 1298 mm. La cobertura geométrica es de  $0,82 \text{ m}^2 \text{ sr}$ . El peso del imán, incluyendo los elementos de soporte, es de 2,2 toneladas. El momento dipolar generado por esta configuración es despreciable en comparación con el campo magnético terrestre (0.5 G). Esto evita acoplamiento magnéticos que producirían peligrosos efectos de torsión en los vehículos espaciales. El campo de fuga es inferior a 3 G a 2 m de distancia del centro del imán, muy por debajo del límite de 60 G requerido por la NASA para evitar interferencias con los sistemas vitales que equipan a los astronautas.

El detector que mide coordenadas de trayectorias de partículas cargadas utiliza la tecnología del silicio, que proporciona la mejor resolución espacial. Aunque los detectores de silicio se han utilizado ampliamente en los últimos veinte años en experimentos en laboratorios convencionales, nunca se ha construido una aplicación a gran escala de esta tecnología para investigación espacial. El detector desarrollado para AMS-01 está formado por 6 planos de sensores de silicio que proporcionan una precisión de  $10 \mu\text{m}$  ( $30 \text{ mm}$ ) en la resolución de la posición en el plano de curvatura (no-curvatura) del campo magnético de 0,15 T. El detector



**Figura 8.** El instrumento AMS-01

de silicio mide la posición y la pérdida de energía de las partículas. Las medidas de pérdida de energía en este detector, combinadas con las medidas de pérdida de energía y velocidad que proporcionan los contadores de centelleo, permiten determinar la carga eléctrica de las partículas. Una vez determinada la carga, el momento se determina a partir de las coordenadas espaciales medidas en los sensores de silicio que se utilizan para reconstruir las trayectorias en el campo magnético. El número de canales electrónicos asciende a 70.000.

El instrumento AMS-01 incluye un sistema de cuatro capas de hodoscopios para la medida de tiempos de vuelo que proporcionan una resolución temporal de  $\sim 100 \text{ ps}$ . También incluye un contador Cerenkov de tipo umbral que utiliza como radiador una variedad de aerogel de silicio con índice de refracción  $n=1,035 \pm 0,001$  y que permite extender el límite para identificación de partículas que proporcionan las medidas de tiempo de vuelo.

Debido a los estrictos requisitos impuestos por la NASA, relativos al peso y consumo eléctrico del



**Figura 9.** El instrumento AMS-01 a bordo del trasbordador Discovery

instrumento, toda la electrónica fue específicamente diseñada, fabricada y calificada espacialmente para este proyecto por los institutos de la Colaboración AMS y por industrias aeroespaciales en Europa y Asia. La calificación espacial implica la realización de pruebas exhaustivas (vibración, temperatura, vacío térmico, radiación y compatibilidad electromagnética). El sistema de selección de trayectorias (*trigger*) basado en los hodoscopios de tiempo de vuelo reduce la aceptación geométrica a  $0,42 \text{ m}^2 \text{ sr}$ . La tasa de selección oscila entre los 100 Hz y los 1600 Hz dependiendo de la posición del instrumento en relación con los polos magnéticos terrestres. El tiempo muerto de lectura es 85 ms lo que implica pérdidas máximas en el registro de datos del orden del 13%.

El instrumento AMS-01, **Figura 8**, fue enviado al espacio el 2 de Junio de 1998 a bordo del trasbordador Discovery, **Figura 9**, en misión de servicio a la estación espacial MIR, **Figura 10**. La inclinación de la órbita fue  $51,7^\circ$  y la altitud geodésica osciló entre los 320 y los 390 km. Durante su permanencia en el espacio se tomaron datos en tres periodos diferentes y con distintas orientaciones del eje del instrumento. Durante 4 días AMS-01 permaneció anclado a la MIR y en la fase final de la misión el trasbordador volteó su posición en  $180^\circ$ . El aterrizaje se produjo el 12 de

Junio. Al concluir la misión AMS-01 había coleccionado datos correspondientes a  $\sim 100$  millones de rayos cósmicos.

A pesar de que el objetivo prioritario de la misión era de tipo fundamentalmente técnico, los datos acumulados permitieron realizar algunas medidas de interés. El análisis de los datos se focalizó en la búsqueda de núcleos de antihelio y la medida de los espectros diferenciales de rayos cósmicos (espectros primario y secundario de protones, cociente de carga leptónica, espectro secundario de Helio, espectros secundarios de antiprotones y deuterones). A continuación resumimos brevemente los resultados más notables:

- Búsqueda de antihelio en rayos cósmicos

Se han registrado y medido un total de  $2,86 \times 10^6$  núcleos de helio con valores de la rigidez (cociente del momento sobre la carga eléctrica) inferiores a 140 GV. No se ha detectado ningún núcleo de antihelio en este intervalo de rigidez. Se ha derivado el límite superior más preciso para el cociente del flujo de antihelio con respecto al flujo de helio:  $1,1 \times 10^{-6}$ , **Figura 11**.

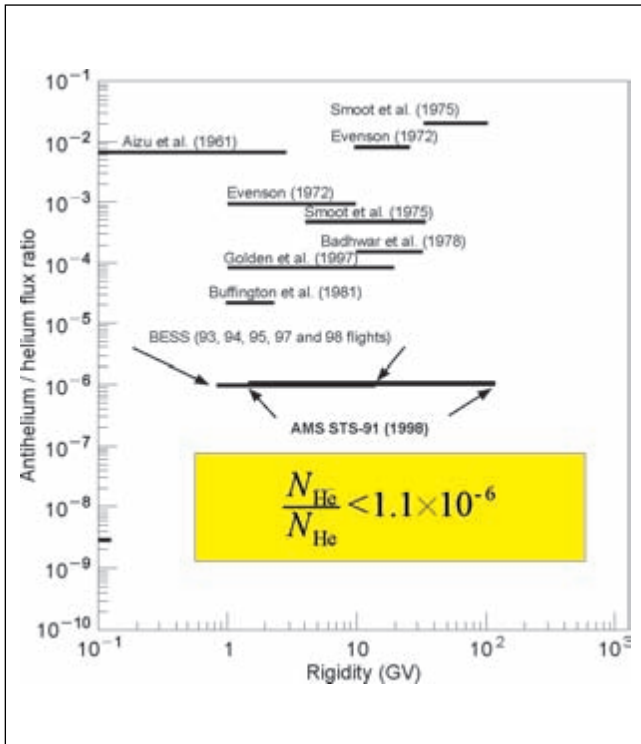
- Espectro de protones

Se ha medido el espectro de protones en el intervalo de energía cinética 0,1-200 GeV. Por encima del corte geomagnético, el espectro observado se parametriza con una ley de potencias. Por debajo de este corte se observa un considerable



**Figura 10.** El trasbordador Discovery anclado a la estación espacial MIR





**Figura 11.** Medida de la dependencia con la rigidez del cociente de flujos de antihelio y helio

espectro secundario. La mayoría de los protones en este espectro secundario siguen una trayectoria complicada y se originan en una restringida región geográfica.

- Espectro de leptones

Se han medido los espectros de leptones en los intervalos de energía cinética 0,2-40 GeV para  $e^-$  y 0,2-3 GeV para  $e^+$ . Se han observado dos espectros bien diferenciados: un espectro a más alta energía y un considerable espectro secundario con mayor abundancia de positrones sobre electrones. Del estudio de la trayectoria de los leptones del segundo espectro se concluye que la mayoría de estos leptones viajan durante un largo periodo de tiempo en el campo geomagnético de la Tierra y que los  $e^+$  y  $e^-$  proceden de dos regiones geográficas complementarias.

- Protones cósmicos

Se ha medido con precisión el espectro primario de protones en el intervalo de energía cinética 0.2-200 GeV. Esta medida es muy relevante para las estimaciones del flujo de neutrinos atmosféricos.

- Espectro de helio

Se ha medido el espectro de helio en el intervalo 0,1-100 GeV/nucleón. Por encima del corte geomagnético, el espectro se parametriza con una ley de potencias. Por debajo de este corte se observa un espectro secundario. En el segundo espectro, en el intervalo 0,1-1.2 GeV/nucleón, en la latitud geomagnética  $(-0,4)-(+0,4)$  radianes, se ha medido el flujo  $(6,3 \pm 0,9) \times 10^{-3} / (\text{m}^2 \text{ sec sr})$ , determinándose, contra todo lo esperado, que más del 90% del helio era  $^3\text{He}$ .

- Deuterones

Se han detectado  $10^4$  núcleos de deuterio en el intervalo 0,1-1,0 GeV/nucleón. Su estudio ha permitido realizar por primera vez un test preciso de modelos de confinamiento galáctico.

- Búsqueda de antideuterio en rayos cósmicos

En el intervalo de momentos 1-3 GeV/c, en el que se han observado  $10^4$  núcleos de deuterio, no se ha encontrado ningún núcleo de antideuterio.

- Captura de rayos cósmicos

El análisis detallado de partículas por debajo del corte geomagnético ha puesto de manifiesto la existencia de protones, positrones y electrones permanentemente atrapados con trayectorias cruzando la denominada Anomalía del Atlántico Sur.

- Fracción de positrones sobre electrones

Se ha determinado el cociente de flujos de positrones sobre electrones en el rango de energías de 1-4 GeV. El resultado es compatible con medidas realizadas en otros experimentos y muestra una potencial desviación con respecto a los modelos convencionales de propagación de rayos cósmicos.

La experiencia del vuelo precursor fue muy positiva permitiendo validar las ideas básicas para la construcción y operación de un detector de física de partículas para la investigación espacial. También resultó extremadamente útil para entender el entorno de radiación y las características de los fondos (radiación cósmica secundaria) cuyo control será esencial para la segunda fase del programa que se desarrollará en la Estación Espacial Internacional.

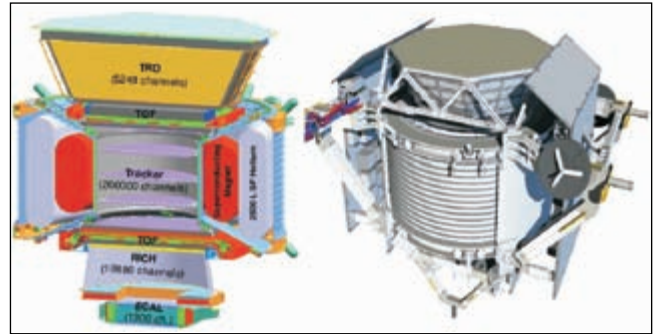
En definitiva, la misión con AMS-01 ha demostrado que es posible realizar medidas precisas, con alta estadística y larga duración, de rayos cósmicos de alta energía en condiciones espaciales.

## EL INSTRUMENTO AMS-02

El éxito científico-técnico de la misión AMS-01 ha confirmado que es posible realizar medidas de alta precisión de espectros de partículas cargadas de alta energía en el espacio. Puesto que alguno de los objetivos científicos requiere la extracción de señales débiles en presencia de fondos intensos, es preciso adoptar los principios básicos utilizados en experimentos de física de altas energías con metas similares (reducción de procesos contaminantes en un factor  $\sim 10^{10}$ ). En particular, es necesario minimizar la cantidad de material en el camino de la trayectoria de las partículas que atraviesan el instrumento de forma que este material no sea la fuente de procesos contaminantes o den lugar a dispersiones nucleares a gran ángulo. Análogamente, es preciso realizar repetidas medidas del momento y velocidad de las partículas incidentes para minimizar la presencia de trazas contaminantes.

En base a estas consideraciones, el instrumento AMS-02, **Figura 12**, se ha construido con los siguientes componentes principales:

1. Un detector (TRD) basado en el efecto de radiación de transición que identifica electrones y positrones con un factor de rechazo de hadrones de  $10^3$ - $10^2$  para momentos en el intervalo 1,5 GeV/c-300 GeV/c.
2. Un detector para la medida tiempos de vuelo (TOF) formado por cuatro capas de hodoscopios que proporcionan una precisión temporal de  $\sim 150$  ps y medidas  $dE/dx$  de pérdida de energía.
3. Un imán superconductor que proporciona una potencia de curvatura  $BL^2=0,86 \text{ Tm}^2$ .
4. Un detector de trazas formado por ocho capas ( $6,45 \text{ m}^2$ ) de detectores de silicio que proporciona una resolución en la medida de la rigidez del protón del 20% a 0.5 TV y una resolución para el helio del 20% a 1 TV. También proporciona



**Figura 12.** Esquema y vista artística del instrumento AMS-02

información relevante para la medida de la carga eléctrica de los núcleos hasta hierro ( $Z=26$ ).

5. Contadores de anti-coincidencia o veto (ACC) que aseguran que sólo las partículas que pasan a través de la apertura del imán serán aceptadas.
6. Un detector (RICH) basado en el efecto Cerenkov que mide la velocidad (con una precisión del 0,1%) y la carga eléctrica de partículas y núcleos. Esta información, combinada con las medidas del momento realizadas por el detector de trazas de silicio, permite determinar sin ambigüedad la masa de las partículas y núcleos.
7. Un calorímetro de muestreo 3-D (ECAL) formado por  $16,7 X_0$  (longitudes de radiación) de plomo y fibras de centelleo que mide la energía de los rayos gamma, electrones y positrones y permite distinguir electrones y positrones de hadrones con un factor de rechazo de  $10^4$  en el intervalo 1,5 GeV-1 TeV.

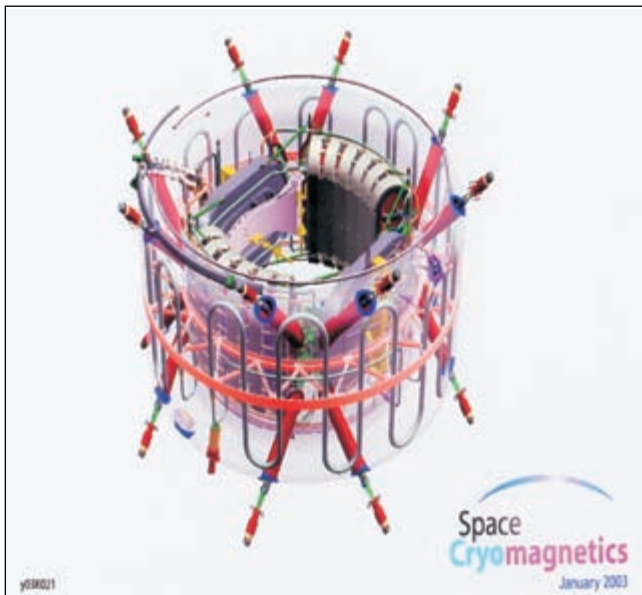
AMS-02 está equipado con un sistema Star Tracker que proporciona una resolución angular de algunos segundos de arco y una unidad GPS que proporciona medidas absolutas de tiempo con una precisión de milisegundos.

En otra sección de este trabajo describiremos la contribución española a este proyecto, que se ha focalizado en el diseño y construcción de los sistemas electrónicos que permiten cargar eléctricamente el imán superconductor, monitorizar y controlar su operación (Cryomagnet Avionics Box, CAB) y en el diseño y construcción del contador Cerenkov (RICH). A continuación describiremos brevemente estos dos importantes componentes de AMS-02.

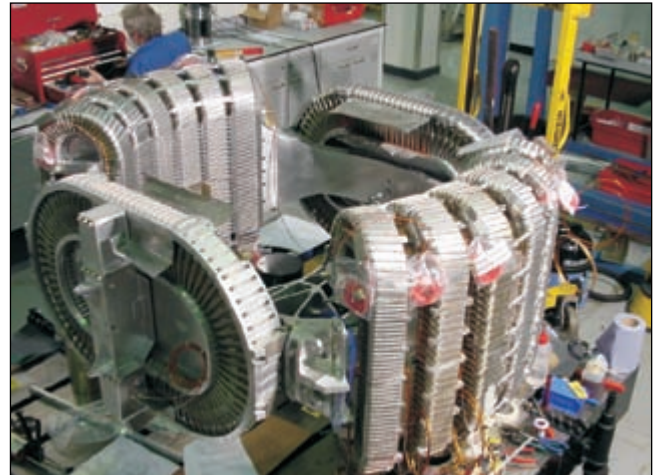
## EL IMÁN SUPERCONDUCTOR DEL INSTRUMENTO AMS-02

El elemento central, más complicado y novedoso de AMS-02, es el imán superconductor, **Figura 13**. El sistema magnético de bobinas consiste en 14 bobinas superconductoras dispuestas alrededor del cilindro interno de la cámara de vacío, **Figura 14**. Las dos bobinas principales, de mayor tamaño, son del tipo Helmholtz y sus dimensiones son 1081 mm×681 mm, las 12 secundarias (de retorno del flujo magnético) tienen dimensiones 826 mm×306 mm. Las respectivas secciones transversales de las bobinas son 88×146 mm<sup>2</sup> y 54×103 mm<sup>2</sup>, respectivamente. El espacio cilíndrico interno libre tiene un diámetro de 1100 mm y una altura de 1550 mm, resultando en un volumen de ~1,5 m<sup>3</sup> para instrumentación. En este volumen se instala el detector de trazas de silicio y los contadores de anticoincidencia.

La forma y disposición geométrica de las bobinas proporciona máximo campo magnético (0,86 T) en la dirección del eje del cilindro y minimiza el campo de fuga. El cable superconductor, 55 km en total, desarrollado específicamente para este proyecto por ETH-Zürich y fabricado por Outokumpu Pricopper Oyj, está formado por 552 filamentos micrométricos (diámetro: 22,4 μm) de niobio-titanio (Nb Ti) que conducen la



**Figura 13.** Vista artística del imán superconductor del instrumento AMS-02



**Figura 14.** Conjunto ensamblado de las 14 bobinas superconductoras del imán de AMS-02

corriente eléctrica sin resistencia, una vez enfriados a una temperatura inferior a 4 K. Para paliar los efectos debidos a la baja conductividad térmica del Nb Ti los filamentos están incrustados en una matriz de cobre de 0,760±0,004 mm de diámetro que a su vez está encajonada en una estructura rectangular de aluminio de gran pureza (99,998 %) de dimensiones (2,00±0,10) mm×(1,55±0,03) mm. El cable resultante tiene máxima estabilidad térmica y mínimo peso. La densidad de corriente es 2300 A/mm<sup>2</sup> o 157 A/mm<sup>2</sup> incluyendo el aluminio. El bobinado de cada una de las dos bobinas principales tiene 3360 vueltas y el de cada una de las 12 secundarias 1457. Las 14 bobinas están conectadas en serie a través de una única juntura conductora. La corriente de operación del imán es 459,5 A. La energía almacenada es 5,15 MJ.

Las características del cable superconductor, el diseño de las 14 bobinas y la configuración del imán minimizan el riesgo de transición al estado resistivo (*quench*) en un factor ~2000 y, en el caso improbable de producirse, limitan sus efectos y facilitan el restablecimiento de su operatividad en régimen superconductor.

El sistema mecánico se ha diseñado y fabricado para controlar las cargas magnéticas e inerciales, estas últimas importantes durante el lanzamiento, retorno y aterrizaje del trasbordador espacial. La masa fría del imán es del orden de 2000 kg, que debe ser sujeta y fijada a la estructura del experimento (en particular la cámara de vacío) que está a temperatura ambiente





**Figura 15.** Depósito de helio del imán de AMS-02

( $\sim 270 \pm 40$  K). El sistema de sujeción debe soportar importantes cargas inerciales sin conducir calor a través del elevado gradiente de temperatura. Está formado por los 16 elementos articulados denominados *non linear straps*.

El sistema criogénico se basa en el enfriamiento de las bobinas magnéticas utilizando helio líquido. Esta tecnología ha sido ampliamente utilizada en los aceleradores y detectores de partículas (por ejemplo, la masa fría del acelerador LHC es de 40.000 toneladas y en la fase final de enfriamiento se utilizan 130 toneladas de helio líquido superfluido a 1,8 K) y en algunas misiones espaciales (por ejemplo, IRAS, COBE, ISO y SHOOT). El sistema criogénico de AMS-02 combina ambas tecnologías y permitirá mantener el imán a la temperatura de 1,8 K para las diversas condiciones operativas de éste y durante la entera duración del experimento.

Por debajo de 2,17 K el helio líquido ( $^4\text{He}$ ) se convierte en superfluido. Su viscosidad es prácticamente 0 y su aparente conductividad térmica se incrementa en varios órdenes de magnitud. El hecho de que el helio superfluido tenga mayor calor específico y densidad que el helio líquido normal incrementa la disponibilidad criogénica y mejora la capacidad de enfriamiento. También evita la presencia de corrientes de convección que, en un entorno de microgravedad, no están toleradas.

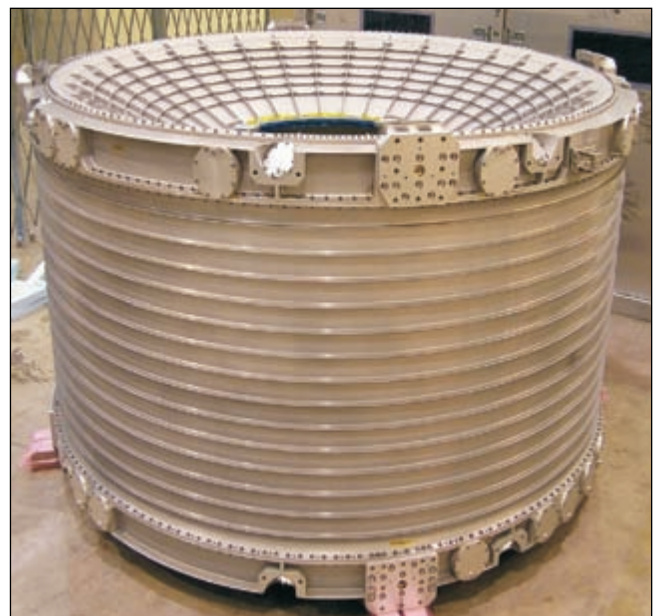
El depósito de helio es un recipiente toroidal, de diámetro interno (externo) 1,92 m (2,58 m), 1,18 m de altura y 2500 litros de volumen, **Figura 15**.

El sistema magnético, formado por las bobinas superconductoras, el depósito de helio superfluido y el sistema criogénico, está encapsulado en la cámara de vacío, **Figura 16**, que tiene forma de toroide con dimensiones: 1,1 m de diámetro interno, 2,7 m de diámetro externo y 0,9 m de longitud en la parte interna que rodea al detector de trazas.

El diseño y la construcción del imán ha tenido que resolver muy complicados y novedosos problemas que han exigido desarrollar nuevas tecnologías (separación pasiva de fases (PPS), mantas térmicas enfriadas por vapor (VCS), refrigeradores criogénicos para extraer calor (hasta 12 W) a alta temperatura (68 K) (Cryocoolers), sondas de nivel de helio en micro-gravedad (*mass gauging*), sistema de enfriamiento por contacto del conjunto de 14 bobinas en serie, suministro de corriente (459,5 A), electrónica de carga, monitorización y control) y la implementación de sofisticados protocolos de seguridad.

La mayor parte de esta electrónica está físicamente integrada en la denominada Caja Aviónica (CAB/ Cryomagnet Avionics Box) cuyos componentes principales son los siguientes:

1. La fuente de corriente (CCS/Cryomagnet Current Source) y el *shunt* de precisión, que se utilizan para cargar el imán,



**Figura 16.** Cámara de vacío del imán de AMS-02

2. El sistema de auto-protección (CSP/Cryomagnet Self Protection), que se utiliza para detectar y proteger el imán en caso de *quench* o de pérdida de potencia eléctrica o de comunicaciones,
3. El sistema de control y acondicionamiento de señales (CCSC/Cryomagnet Controller and Signal Conditioner), que hace acopio de los datos de monitorización y los envía al ordenador principal de adquisición de datos (JMDC).

El resto de la electrónica lo constituyen:

1. Las matrices de diodos de descarga (CDDP, CDDS), que disipan la energía almacenada en el imán durante el proceso de descarga,
2. Las fuentes de potencia ininterrumpida duales redundantes (UPS), que alimentan las funciones de auto-protección,
3. Los módulos de interruptores de potencia, que activan las válvulas y calentadores por instrucción del CCSC,
4. La electrónica de los Cryocoolers (CCEB).

El imán se cargará eléctricamente una vez colocado en su posición definitiva en la estructura de la ISS, aunque durante todo el proceso previo (en la rampa de lanzamiento y a bordo del trasbordador) el sistema CCSC monitorizará de forma continua el estado del imán controlando la lectura de los ~150 sensores, en particular de los 46 lectores CERNOX que miden las temperaturas criogénicas.

La carga del imán la realiza la unidad CCS que utiliza potencia eléctrica (120 VDC) suministrada por la ISS (el límite es 1875 vatios) y que convierte a un máximo de 10 VDC con ayuda de 6 convertidores DC-DC. El proceso de carga a 459,5 A dura algo menos de 2 horas. En caso de activarse el protocolo de descarga (debido a un *quench* o a una disfunción en el suministro de potencia o en las comunicaciones) la disipación de energía (5 MJ) se hace a través de los diodos de descarga y necesita algo menos de 1,5 horas.

Está previsto que el instrumento AMS-02 se enviará al espacio a bordo de un trasbordador (Discovery, Atlantis, Endeavor) con el imán superconductor sin activar pero enfriado a la temperatura nominal criogénica.

## EL DETECTOR CERENKOV DEL INSTRUMENTO AMS-02

El estudio de algunas cuestiones fundamentales en astrofísica de partículas, tales como la existencia de antimateria y las abundancias relativas de los isótopos ligeros y núcleos cargados, requiere determinaciones precisas de las masas de las partículas cargadas. La masa de una partícula,  $m$ , está relacionada con su momento,  $p$ , y velocidad,  $\beta$ , a través de la expresión:

$$m = (p/\beta)(1 - \beta^2)^{1/2}$$

Su determinación se basa en la medida de ambas cantidades. En el instrumento AMS-02, el momento se determina a partir de la información suministrada por el detector de trazas de silicio con una precisión de ~1% en un amplio intervalo de energías. Para mantener este error en la determinación de la masa de la partícula es necesario medir la velocidad con una precisión relativa de ~0,1%. Con esta finalidad se ha diseñado un detector con gran cobertura geométrica y capaz de operar en el espacio (RICH/Ring Imaging Cerenkov Detector).

La determinación de la velocidad de las partículas cargadas se basa en el efecto descubierto en 1934 por Pavel Alekseyevich Cerenkov (Premio Nobel de Física 1958). Cuando una partícula cargada atraviesa un material dieléctrico induce una polarización macroscópica. Si su velocidad es superior a la velocidad de fase del campo electromagnético en el material, la variación de los campos dipolares con el tiempo da lugar a la emisión de radiación electromagnética. Las diferentes ondas monocromáticas forman un cono de radiación Cerenkov a lo largo de la trayectoria de la partícula en el material. Las propiedades de este cono dependen de la velocidad de la partícula y del índice de refracción del material  $n(\omega)$ . Para una partícula con carga  $Z$ , el semi-ángulo del cono viene dado por

$$\cos\theta = 1/\beta n(\omega)$$

y el número de fotones radiados en el intervalo de frecuencias  $d\omega$  para una distancia atravesada en el material  $dx$  es

$$d^2N/d\omega/dx = \alpha Z^2 \sin^2\theta$$

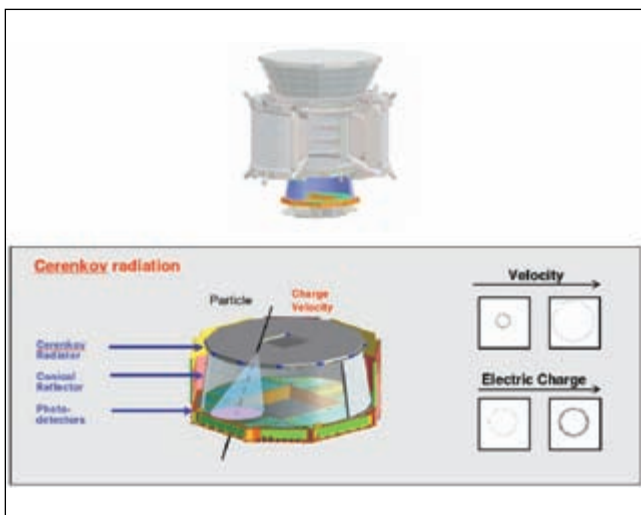
El umbral de velocidad por encima del cual se emite radiación es



$$\beta_{\min} = 1/n(\omega)$$

En consecuencia, la velocidad se determina a partir del ángulo de apertura del cono Cerenkov y el número de fotones detectado proporciona una estimación independiente de la carga de la partícula incidente.

En AMS-02 el contador RICH está situado en la parte inferior del espectrómetro, entre los contadores de tiempo de vuelo y el calorímetro electromagnético. El RICH, **Figura 17**, tiene forma de cono truncado con un radio superior de 60 cm, radio inferior de 67 cm, 47 cm de altura y una placa en la parte superior que sirve de soporte a una capa de 3 cm de espesor de material dieléctrico (radiador). El plano inferior soporta una matriz de 680 fotomultiplicadores y guías de luz, así como las tarjetas con la electrónica frontal. Tiene un orificio central cuadrado de 64×64 cm<sup>2</sup> que permite que algunas partículas lleguen sin ser obstruidas al calorímetro electromagnético y facilitar la reconstrucción y medida de electrones, positrones y fotones. Cuando una partícula atraviesa el radiador se crea un cono Cerenkov. La mayoría de los fotones llegan a los detectores de fotones en el plano inferior. El resto de los fotones se reflejan en la superficie cónica lateral (reflector) y también llegan a los detectores de fotones. A partir de las coordenadas espaciales de los pixels de los fotomultiplicadores y de la dirección de las partículas incidentes se reconstruye el cono Cerenkov y se determina la velocidad de la partícula.



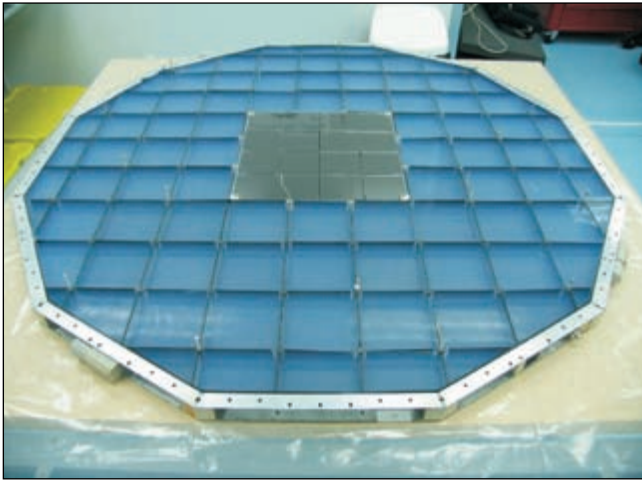
**Figura 17.** Esquema del contador RICH

Diversos materiales se han considerado, analizado y probado como posibles radiadores. Las mejores prestaciones se han obtenido con aerogeles de silicio, una mezcla de SiO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O que tienen estructura porosa con burbujas de pequeño diámetro en comparación con las longitudes de onda ópticas. Con el tratamiento adecuado se consiguen densidades entre 0,1 y 0,3 g cm<sup>-3</sup> y por tanto índices de refracción mayores que la mayoría de los gases y menores que la mayoría de líquidos y sólidos.

Tras una campaña de pruebas con muestras suministradas por el Cytalysis Institute of Novosibirsk (CIN) y por Matsushita Electronic Company (MEC), en las que se han analizado las propiedades mecánicas y ópticas, en particular el índice de refracción, la transmitancia y la dispersión de la luz, y su comportamiento en ciclos térmicos en vacío, se ha optado por losetas del material hidrófilo producido en CIN (índice de refracción 1,05, claridad 0,005 mm<sup>4</sup>/cm). Con objeto de incrementar la eficiencia de detección de fotones para aquellas partículas que atraviesan el orificio cuadrado en el plano de detección, los bloques centrales de radiador están fabricados con NaF, que tiene un mayor índice de refracción ( $n=1,336$ ) y genera un cono Cerenkov más abierto. La configuración final del radiador, **Figura 18**, está formada por 80 bloques rectangulares de aerogel de silicio de dimensiones 11,5×11,5×2,5 cm<sup>3</sup> y 16 bloques centrales de NaF de dimensiones 8,5×8,5×0,5 cm<sup>3</sup>.

El 30% de los fotones Cerenkov producidos en el radiador apuntan fuera de la matriz de detectores de fotones. Con objeto de coleccionar estos fotones en el plano detector se ha construido un reflector cónico truncado con dimensiones 134 cm y 114 cm para los diámetros inferior y superior respectivamente, **Figura 19**. Para mantener la resolución de 0,1 % en la medida de la velocidad de la luz se han impuesto requisitos muy estrictos en las tolerancias de distintos parámetros (conicidad, centrado, reflectividad, rugosidad, etc). El material reflector está formado por una lámina de 100 nm de aluminio y 300 nm de SiO<sub>2</sub>. La estructura soporte está fabricada con un material compuesto (BRYTE EX1515/M55J). La construcción del sistema cónico reflector se ha realizado en la empresa Composite Mirror Applications Inc. (Tucson, Arizona).

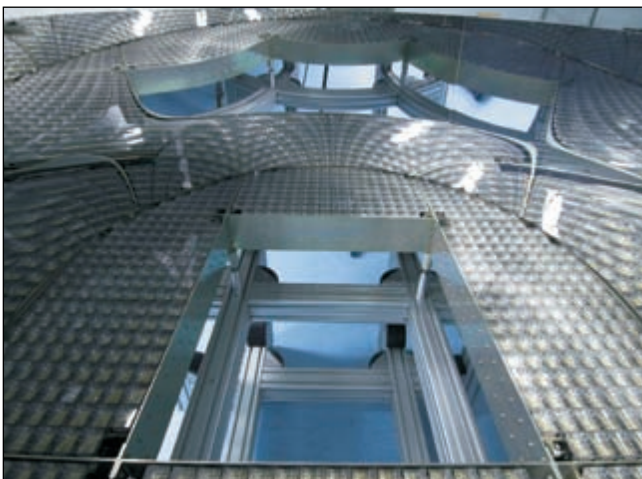
Los fotones Cerenkov se recogen en la matriz de 680 tubos fotomultiplicadores (PMTs), **Figura 20**,



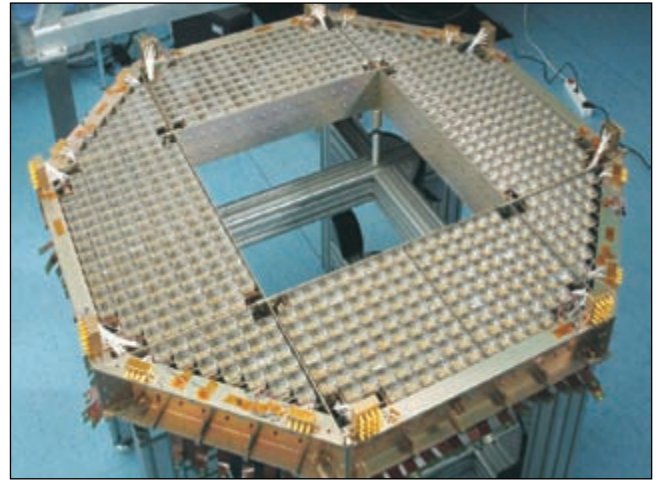
**Figura 18.** Radiador del contador RICH

situada en la parte inferior del detector, que está afectada por un moderado campo magnético de fuga ( $\approx 300$  G). Cada unidad del sistema de detección de fotones está compuesta de un fotomultiplicador (HAMAMATSU R7600-00-M16), una estructura de apantallado magnético basada en el material diamagnético VACO-FLUX 50, una interfaz entre los PMTs y las paredes de la estructura de apantallado y un sistema de guías de luz que dirige los fotones desde la parte superior de la estructura de apantallado a la superficie sensible de los PMTs.

La elección del fotomultiplicador viene en parte determinada por el hecho de que la precisión en la medida de la velocidad depende significativamente del tamaño de los sensores de fotones. Los PMTs selec-



**Figura 19.** Cono reflector del contador RICH



**Figura 20.** Plano de fotomultiplicadores del contador RICH

cionados tienen una estructura anódica de  $4 \times 4$  pixels, cada uno con una zona sensible de  $4 \times 4$  mm<sup>2</sup>. La eficiencia cuántica es  $\approx 20\%$  en el intervalo de longitudes de onda entre 300 y 600 nm, dentro de la región óptica del radiador. Con esta eficiencia, para una partícula ultra-relativista con carga  $Z=1$ , se detectan 8 fotones para un radiador con índice de refracción  $n=1,3$ .

La estructura de guías de luz está formada por 16 elementos de 3,7 cm de longitud, en 4 geometrías distintas, fabricados con DIAKON LG-703 (un plástico con índice de refracción 1.5, elevada transmitancia y sin dopantes para la transmisión en el UV).

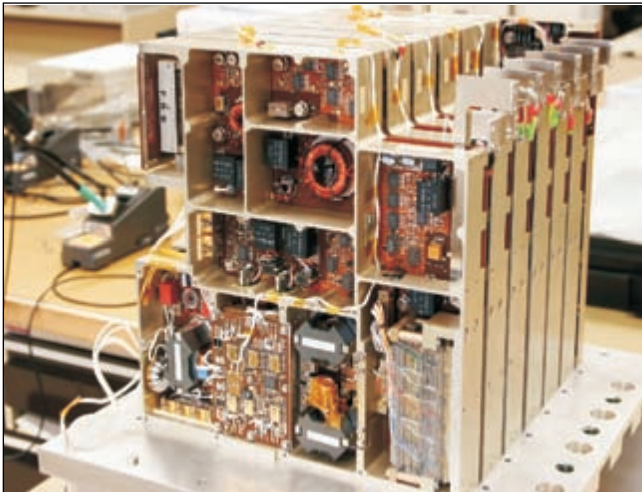
Completan el contador RICH la electrónica asociada (frontal, control y procesamiento de señales, monitorización y fijación de los parámetros de operación y fuentes de potencia).

El diseño del contador RICH ha sido validado a través de la construcción de un prototipo de 99 celdas sensoras que ha sido expuesto a rayos cósmicos y a un haz de iones secundarios producidos por la fragmentación de una haz de iones de plomo en el acelerador SPS del CERN. Todos los componentes mecánicos, ópticos y electrónicos han sido sometidos a pruebas de calificación espacial.

## CONTRIBUCIÓN DE ESPAÑA AL PROYECTO AMS

La participación de España en el proyecto AMS ha tenido dos fases bien diferenciadas. Una primera rela-





**Figura 21.** Fuente de corriente (CCS) de la Caja Aviónica (CAB)

cionada con AMS-01, iniciada en 1997, que incluía las actividades realizadas en el ETH-Zürich en donde se hizo el ensamblaje del instrumento (pruebas de verificación de subdetectores y modelización del campo magnético generado por el imán permanente), las tareas de integración del instrumento con el trasbordador Discovery en el Kennedy Space Center (KSC), la monitorización del detector durante la duración de la misión espacial en el Johnson Space Center (JSC) en Junio de 2008 y la contribución al análisis de los datos adquiridos, en particular las distribuciones de los núcleos de helio. En esta primera fase sólo participó un grupo de investigadores del CIEMAT y estuvo financiada por este organismo y por el Programa Nacional de Física de Partículas. La segunda fase, iniciada en el año 2000, ha sido significativamente más ambiciosa y se ha beneficiado de una importante financiación procedente del CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) y de diversos Programas Nacionales de Espacio, así como del CIEMAT.



**Figura 22.** Caja Aviónica (CAB)



**Figura 23.** Integración de la electrónica de lectura del contador RICH en el CIEMAT

La participación se ha organizado a través del CIEMAT e integra contribuciones del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y del Centro de Estudios y Experimentación (CEDEX). Este último ha aportado su experiencia en superconductividad y en tecnologías relacionadas con el diseño y fabricación de imanes. Las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) se han utilizado con regularidad para la realización de las exhaustivas pruebas de verificación y calificación espacial. Diversas empresas del sector aeronáutico han participado en este proyecto, destacando CRISA-EADS, compañía líder en Europa en el sector de la electrónica espacial.

La contribución de España a este proyecto se ha centrado, como ya se ha comentado, en la construcción del imán superconductor y del contador Cerenkov.

En relación con el imán superconductor se ha contribuido, a través de un acuerdo CIEMAT-Laboratory for Nuclear Science del Massachusetts Institute of Technology (LNS MIT), a la financiación de la fabricación del imán por la firma Space Cryomagnetics Ltd. (Culham, Oxford, Reino Unido) y se ha asumido la responsabilidad del diseño y fabricación de la electrónica que carga, monitoriza y controla el funcionamiento del imán (Cryomagnet Avionics). Toda esta parte de la electrónica ha sido diseñada y fabricada por CRISA-EADS, **Figura 21** y **Figura 22**.

En relación con el contador Cerenkov, la contribución española ha sido determinante y ha abarcado



**Figura 24.** Integración mecánica del contador RICH en el CIEMAT

la práctica totalidad del proyecto. En particular se ha trabajado en el diseño, selección y caracterización de componentes, ensamblaje del plano radiador y del plano de fotosensores, diseño y construcción de la electrónica (toma de datos, fuentes de alimentación y cableado asociado), diseño y construcción del sistema de protección contra micro-meteoritos, integración completa del contador en una sala limpia especialmente construida en el CIEMAT con esta finalidad, **Figura 23** y **Figura 24**, e integración final en el detector AMS. En el INTA se han realizado las pruebas de calificación de la electrónica y se han realizado diferentes ensayos para validar el procedimiento de montaje del plano de detección, así como las pruebas



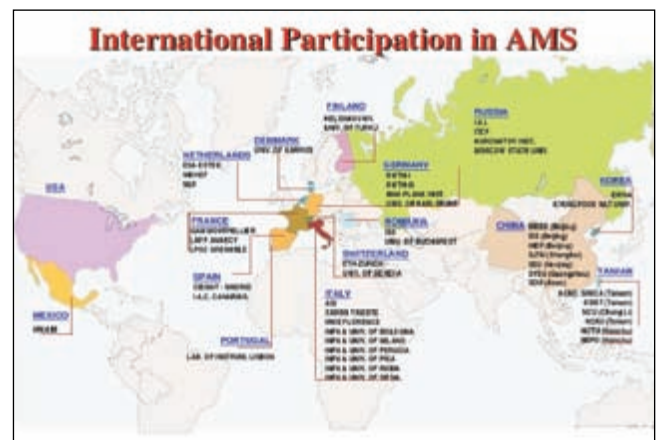
**Figura 25.** AMS-02 en la sala limpia del CERN durante la toma de datos con rayos cósmicos (2008)

de vibración del contador completo. Se han desarrollado los algoritmos para reconstrucción de los conos Cerenkov y el software *on-line* y *off-line*. Se ha participado en todas las campañas de calificación espacial y se ha liderado el análisis de los datos obtenidos con rayos cósmicos durante la campaña realizada en el CERN en la primavera de 2008, **Figura 25**.

## SITUACIÓN ACTUAL DEL PROYECTO AMS-02

La construcción del instrumento AMS-02 ha seguido las pautas habituales de los experimentos de física de altas energías. Los distintos subdetectores han sido diseñados, construidos, calificados espacialmente y operados por equipos de investigación en los distintos institutos que integran la Colaboración AMS. En la actualidad esta colaboración está formada por ~500 científicos e ingenieros pertenecientes a ~50 institutos en 16 países, **Figura 26**.

En Septiembre de 2007 se completó la construcción de una sala limpia de clase 10000 de ~700 m<sup>2</sup> de superficie localizada en el área Norte del CERN. En esta sala se realizó un ejercicio de pre-integración de todos los subdetectores del instrumento con la excepción del imán superconductor, remplazado por un replica con idénticas dimensiones y masa, cuya construcción y prueba funcional está prevista para finales de 2008, **Figura 27** y **Figura 28**. El ejercicio de pre-integración ha permitido corregir diversas inconformidades con relación a las especificaciones téc-



**Figura 26.** Instituciones participantes en el proyecto AMS





**Figura 27.** Integración de AMS-02 en la sala limpia del CERN

nicas, establecer un protocolo definitivo de integración, verificar y poner a punto todos los sistemas electrónicos y su sincronización, incluidos los de *trigger* y de adquisición de datos y llevar a cabo una extensa campaña de toma de datos con rayos cósmicos.

En Enero de 2009 se iniciará la integración final de todos los subdetectores y se repetirá la toma de datos cósmicos con el imán operativo. A continuación el instrumento será expuesto a haces de partículas (protones, electrones y núcleos de distintas energías) producidos en los aceleradores del CERN. En el segundo semestre de 2009 el instrumento se transportará al centro ESTEC (European Space Research and



**Figura 28.** Integración de AMS-02 en la sala limpia del CERN



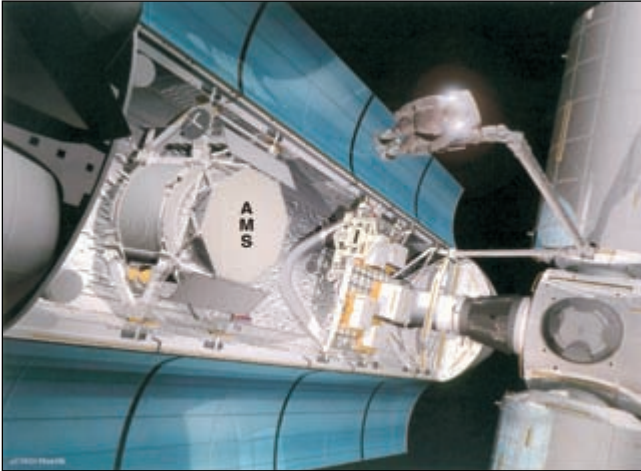
**Figura 29.** Simulador espacial en ESTEC (ESA, Noordwijk)

Technology Centre) de la Agencia Europea del Espacio (ESA) en Noordwijk (Holanda) en donde se harán las pruebas finales de ciclaje térmico en vacío en el simulador espacial, **Figura 29**, y las pruebas de compatibilidad electromagnética. A finales de 2009 AMS-02 se enviará al Kennedy Space Center, **Figura 30**, para el procesado previo a su ubicación en uno de los trasbordadores de la NASA, **Figura 31**, a bordo del cual será transportado a la Estación Espacial Internacional en donde permanecerá durante un mínimo de



**Figura 30.** Kennedy Space Center. Un trasbordador desplazándose hacia la rampa de lanzamiento





**Figura 31.** Vista artística de AMS-02 durante el trasvase a la ISS desde un trasbordador

3 años, **Figura 32.** Aunque no hay fecha programada para esta misión espacial, parece probable que tenga lugar en el tercer trimestre de 2010.

En paralelo se están poniendo a punto en el CERN los centros POCC (Payload Operation and Control Center) y SOC (Science Operation Center) desde los que se realizará el control de las operaciones del instrumento y el procesado de los datos respectivamente.



**Figura 32.** Vista artística de AMS-02 colocado en la ISS

## PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS DEL INSTRUMENTO AMS-02

Una vez instalado el instrumento AMS-02 en la Estación Espacial Internacional, cargado el imán y activados todos los subdetectores y el sistema de adquisición de datos, el experimento puede iniciar su andadura. En ausencia de problemas severos con el imán superconductor que originen pérdidas importantes de helio la operación del espectrómetro puede durar como mínimo 3 años. En principio, el depósito de helio puede asegurar el funcionamiento del imán ~5 años. Una vez consumidos los 2500 litros de helio líquido el experimento puede prolongarse con un programa científico concentrado en el estudio de distribuciones de núcleos atómicos (propagación y confinamiento de la radiación cósmica).

Durante los primeros tres años de operación el experimento puede acumular estadísticas importantes de los núcleos más abundantes presentes en la radiación cósmica. Por ejemplo:

- $\sim 10^8$  protones con energías  $>100$  GeV
- $\sim 10^7$  núcleos de helio con energías  $>100$  GeV/nucleón
- $\sim 10^5$  núcleos de carbono con energías  $>100$  GeV/nucleón

La identificación de los núcleos atómicos será posible hasta un alto valor de la energía de los mismos. Por ejemplo:

- protones hasta  $\sim 1$  TeV (1000 GeV)
- núcleos de helio, carbono,... hasta  $\sim 1$  TeV
- isótopos de núcleos ligeros hasta  $\sim 10$  GeV/nucleón
- antiprotones hasta  $\sim 200$  GeV
- positrones hasta  $\sim 200$  GeV
- núcleos de anti-helio, anti-carbono,... hasta  $\sim 1$  TeV
- electrones hasta  $\sim 1$  TeV
- fotones hasta  $\sim 300$  GeV

Las muestras estadísticas y la precisión en la determinación de las propiedades de las partículas que forman la radiación cósmica, debido a las altas presta-

ciones del instrumento, van a permitir desarrollar un variado y novedoso programa de investigación. A continuación ilustramos con algunos ejemplos el potencial científico de AMS-02.

- Estudio de precisión de las propiedades de los rayos cósmicos. Composición a diferentes energías (1 GeV, 100 GeV, 1 TeV), determinación del tiempo de confinamiento a partir de, por ejemplo, los flujos de  $^{10}\text{Be}$  y  $^9\text{Be}$ .
- Estudio de la radiación gamma difusa en el intervalo de energía 0,1 GeV-1 TeV.
- Estudio de la emisión de rayos gamma con energías superiores a varios GeV en pulsares en la Vía Láctea.
- Búsqueda de la existencia de antimateria. Con una muestra de  $2 \times 10^9$  núcleos de helio con energías hasta los 2 TeV, en caso de no encontrarse ningún núcleo de anti-helio, será posible excluir la existencia de antimateria hasta el confín observable del Universo ( $\sim 1000$  Mpc,  $\sim 3 \times 10^{24}$  km). Este resultado tendría implicaciones serias para el Modelo del *Big Bang*.
- Evidencia y naturaleza de la materia oscura. El estudio de la dependencia con la energía de la fracción de positrones ( $e^+$ ) sobre el total de electrones y positrones ( $e^+ + e^-$ ) podría revelar la existencia de nuevas partículas compatibles con la abundante presencia de materia oscura. En caso de descubrirse otros posibles candidatos (p. ej. partículas supersimétricas) en experimentos con aceleradores de partículas, el estudio comparativo de las características de ambas señales podría ser de gran interés.
- Búsqueda de nuevas formas de materia en el Universo, por ejemplo núcleos de materia compuestos de super-nucleones formados por tres tipos de *quarks* ( $u, d, s$ ). Este tipo de núcleos, denominados “*strangelets*”, se caracterizan por tener pequeños valores del cociente  $Z/A$  (0,1) a diferencia de lo que ocurre en los núcleos ordinarios ( $Z/A \sim 0,5$ ). Algunas hipótesis apuntan a que las estrellas de neutrones son en realidad un único gigantesco “*strangelet*”.

Aunque algunas de estas cuestiones están íntimamente relacionadas con los fundamentos de la física

moderna (violación de la simetría CP, conservación del número bariónico y leptónico, teorías de gran unificación, existencia de partículas supersimétricas, etc), probablemente el objetivo científico más atractivo del programa de AMS-02 es la exploración de lo desconocido, la búsqueda de fenómenos que existen en la Naturaleza y que nunca habíamos imaginado o para los que no estábamos equipados con la adecuada instrumentación. La versatilidad y prestaciones de AMS-02 hacen que sea considerado ya como el “Telescopio Hubble” para partículas cargadas.

## EL PROYECTO AMS Y LOS VUELOS ESPACIALES TRIPULADOS

Como se ha señalado en secciones anteriores el espectrómetro AMS-02 proporcionará medidas precisas de larga duración de espectros de partículas cargadas y núcleos en el intervalo de rigidez 0,1 GV–3 TV. También medirá rayos gamma de alta energía hasta 0,3 TeV con una resolución angular de 2 arcos segundo. Un elemento crucial de este instrumento es, como ya se explicó, el imán superconductor que constituye un desarrollo tecnológico totalmente novedoso en proyectos espaciales.

Las tecnologías desarrolladas por la Colaboración AMS en estos últimos años tienen posible aplicación en los vuelos interplanetarios tripulados. Probablemente una de las restricciones más importantes en este tipo de misiones es consecuencia del hecho de que, poco después del lanzamiento de la nave espacial al espacio, los astronautas dejan de estar protegidos contra la radiación gracias al blindaje que proporciona el campo magnético terrestre y la atmósfera. En una misión de duración multianual la protección radiológica es factor clave para asegurar el retorno seguro de los astronautas.

La protección de una tripulación en una misión de larga duración requiere:

1. Comprender con precisión la naturaleza de la radiación
2. Diseñar un sistema de protección radiológica
3. Entender los efectos biológicos de la radiación residual y los efectos de gravedad cero

Los efectos de la radiación y las medidas de protección para misiones tripuladas han sido estudiados por la NASA, la ESA y la Agencia Espacial Rusa. Existen dos fuentes de radiación:

- Llamadas solares que producen intensa radiación de baja energía a intervalos impredecibles.
- Rayos Cósmicos Galácticos que consisten esencialmente de protones (85%), helio (14%) y núcleos pesados (1%).

La dependencia en función de la energía de las dosis esperadas debidas a núcleos pesados necesita ser medida hasta valores de 10 GeV/nucleón. Las medidas realizadas hasta la fecha, así como los distintos modelos derivados para su interpretación, presentan contradicciones significativas. Parece necesario complementar la información existente con:

- Medidas del flujo de cada núcleo pesado hasta  $Z=26$  en el intervalo 0,1 GV-10 GV.
- Medidas de posibles variaciones del flujo con el tiempo y determinar si estas variaciones están correlacionadas con la actividad de las manchas solares.
- Medidas de los flujos con una precisión del 1%.

AMS-02 podría hacer las funciones de un observatorio orbital permanente para monitorizar los flujos nucleares en función del tiempo y de la energía. El detector de trazas de silicio y el contador Cerenkov están diseñados para realizar estas medidas. Durante un periodo de 20 años los flujos de 26 núcleos podrían medirse en función del tiempo con una precisión del 1%.

La tecnología de imanes superconductores tendría aplicación para apantallar las tripulaciones en vuelos tripulados. Las partículas cargadas serían desviadas en un campo toroidal creado por una determinada geometría de bobinas superconductoras y no penetrarían en el módulo dedicado a la tripulación. Por otra parte, con la configuración apropiada, el campo magnético sería cero en el interior del módulo habitado y también en el exterior del imán, evitando interferencias con los instrumentos de navegación del vehículo espacial. La Colaboración AMS ha realizado diversos diseños de sistemas de protección magnética a la radiación y estimado el grado de protección en función de la configuración magnética, de las dimen-

siones y peso de las bobinas y del tamaño del compartimiento de la tripulación. En general, con estos diseños se consiguen radiaciones residuales en el interior del módulo habitado del orden de 27 rem/año, que es aproximadamente la mitad del valor máximo permitido para los astronautas de la ISS (50 rem/año). Las dimensiones de estas bobinas superconductoras son similares a las de las bobinas utilizadas en la construcción de los toroides superconductores fabricados para el experimento ATLAS del acelerador LHC del CERN.

Es importante hacer notar que para conseguir con apantallado pasivo un nivel de protección similar al obtenido con imanes superconductores serían necesarios 400 toneladas de aluminio o 500 toneladas de hidrógeno líquido, un orden de magnitud más que en el escenario de protección magnética. Por otra parte, esta última solución es prácticamente insensible a las llamaradas solares.

La validación de la solución magnética al problema de protección radiológica en misiones interplanetarias tripuladas necesita un agresivo programa de investigación y desarrollo, que debería basarse en la experiencia que, previsiblemente, se obtendrá durante la operación del imán de AMS-02 en el espacio.

La tecnología de imanes superconductores podría ser aplicada para el desarrollo de nuevos sistemas de propulsión eléctrica que acortarían la duración de los vuelos interplanetarios. El proyecto VASIMIR es un ejemplo muy prometedor en esta dirección. También las tecnologías magnéticas superconductoras han encontrado aplicación en el desarrollo de sistemas de generación de potencia eléctrica basados en reactores nucleares del tipo VCR.

## EPÍLOGO

En este trabajo hemos tratado de presentar algunos conceptos o fenómenos (antimateria, superconductividad, Big Bang, evolución del Universo, etc) aparentemente desconectados. El paso del tiempo ha demostrado que sólo se trataba de una apariencia. Es ilustrativo hacer notar que descubrimientos, como el de la antimateria o la superconductividad, que en su momento tuvieron un interés esencialmente académico, han generado aplicaciones prácticas extraordinarias y contribuido a desarrollar nuevas tecnologías

que han permitido progresar en el interminable proceso de hacer acopio de conocimiento. Como se ha dicho en repetidas ocasiones, la Ciencia produce resultados que con frecuencia desafían la intuición humana. Es uno de sus aspectos fascinantes. Como también lo es que muchos de estos inesperados resultados hayan propiciado cambios radicales en la forma de vida de los seres humanos. Es altamente probable, por no afirmar que inevitable, que, en el futuro, la investigación básica seguirá produciendo resultados que con el tiempo transformarán significativa e impredeciblemente nuestra existencia.

---

## REFERENCIAS Y AGRADECIMIENTOS

1. Una descripción del instrumento AMS-01 y una compilación de los resultados obtenidos en la misión

a bordo del trasbordador Discovery en 1988 se encuentra en: *M. Aguilar et al., Physics Reports 366 (2002) 331-405.*

2. Está en preparación una descripción del instrumento AMS-02 (*The construction of the Alpha Magnetic Spectrometre (AMS) for the Internacional Space Station*) y se ha enviado a *Nuclear Instruments and Methods A* una descripción de las aplicaciones de las tecnologías desarrolladas en este proyecto para vuelos interplanetarios tripulados (*AMS on ISS: Application of particle physics technology to manned interplanetary flight*).

El autor de este trabajo desea agradecer a los Dres. María Isabel Josa Mutuberría, Javier Berdugo y Carlos Mañá la cuidadosa lectura del texto y numerosas sugerencias.