

LA MISIÓN ESPACIAL HERD

HERD es una misión científica propuesta para la Estación Espacial China (CSS) cuyo objetivo es abordar el estudio de diversos tópicos de física fundamental realizando medidas precisas de los rayos cósmicos hasta energías superiores a 1 PeV y proporcionar una monitorización continua del cielo mediante la medida de rayos gamma con energías por encima de 100 MeV. Los equipos de CIEMAT, ICCUB e IFAE tienen una participación destacada en este proyecto.



Jorge Casaus

Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
jorge.casaus@ciemat.es

David Gascón

Institut de Ciències del Cosmos
de la Universitat de Barcelona (ICCUB)
david.gascon@icc.ub.edu

Javier Rico

Institut de Física d'Altes Energies (IFAE)
jrico@ifae.es

La plataforma de detección de radiación cósmica de alta energía HERD (*High Energy cosmic Radiation Detection facility*) (<http://herd.ihep.ac.cn/>) es un detector de partículas propuesto para ser instalado en la Estación Espacial China (CSS, *China Space Station*) en 2027 y estar en operación durante al menos 10 años.

El objetivo de HERD es el estudio de diversos tópicos de física fundamental tales como la naturaleza de la materia oscura mediante la medida precisa del espectro energético y composición de los rayos cósmicos hasta energías superiores a la *rodilla* del espectro ($\sim 10^{15}$ eV) y proporcionar una monitorización continua del cielo mediante la medida de rayos gamma de energías a partir de los 100 MeV.

La colaboración científica HERD está compuesta por 30 institutos de investigación y universidades de China, Italia, España y Suiza, y cuenta con la participación de más de 200 físicos e ingenieros con una dilatada experiencia en el diseño, simulación, construcción y operación de los instrumentos espaciales más avanzados en este campo, en particular, en espectrómetros magnéticos espaciales PAMELA y AMS-02 y de los detectores calorimétricos DAMPE y CALET. La participación española en HERD está liderada por los grupos del CIEMAT, ICCUB e IFAE con la participación de 20 físicos e ingenieros.

La aportación tecnológica española a HERD se centra en el desarrollo de la electrónica de lectura y disparo de los principales subsistemas del instrumento. Los desarrollos bajo la responsabilidad de los institutos españoles son esenciales tanto para alcanzar los objetivos científicos principales de la misión (la medida del espectro y composición de los rayos cósmicos de alta energía), como para incrementar su impacto científico (a través de la detección y medida precisa de rayos gamma de alta energía).

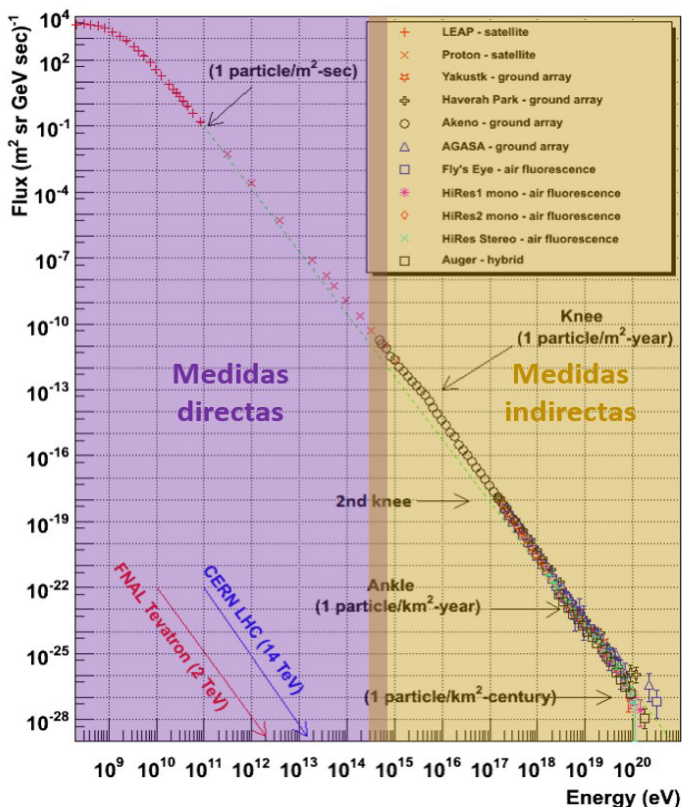
LA RADIACIÓN CÓSMICA

La atmósfera terrestre está permanentemente bombardeada por partículas elementales y núcleos atómicos con energías que abarcan más de 12 órdenes de magnitud, desde las menos energéticas, con unos pocos cientos de MeV hasta las partículas con la mayor energía observada, con energías del orden de 10^{12} GeV.

Los rayos cósmicos son partículas cargadas, esencialmente núcleos atómicos (98%) y electrones (2%). La componente nuclear está constituida principalmente por protones (~87%), helio (~12%) y núcleos más pesados (~1%). También se observa una pequeña fracción de antimateria (positrones y antiprotones) cuyo origen se cree que es secundario, es decir, producto de las interacciones de los rayos cósmicos primarios con el gas interestelar. Las partículas neutras de la radiación consisten en rayos gamma, neutrinos y antineutrinos.

Los rayos cósmicos son una muestra genuina de materia de origen fundamentalmente galáctico. La abundancia relativa de los diferentes elementos en los rayos cósmicos es similar a la que se encuentra en el sistema solar. Este hecho sugiere un origen común para todos ellos, a saber: la fusión de núcleos ligeros en el interior de las estrellas.

Espectro energético de los rayos cósmicos. El rango energético de la radiación cósmica se extiende más de 12 órdenes de magnitud en energía y 30 órdenes de magnitud en intensidad. El flujo, en términos de la cantidad de partículas por unidad de superficie y tiempo, determina la estrategia de detección y medida.



La característica más relevante del espectro energético de los rayos cósmicos es la existencia de dos cambios en el exponente de la ley de potencias que lo describe o índice espectral. A energías de unos 10^{15} eV, en la llamada *rodilla* del espectro, el índice espectral aumenta de 2.7 a 3, para retomar un valor de 2.7 a energías superiores a 10^{19} eV, en el llamado *tobillo* del espectro. Esta acusada dependencia energética conlleva que la intensidad de los rayos cósmicos varíe en más de 30 órdenes de magnitud a lo largo de su rango energético y determina las técnicas utilizadas para su medida.

A energías inferiores a la rodilla, el flujo de rayos cósmicos es suficientemente alto como para permitir detectarlos y medir sus propiedades directamente mediante instrumentos situados en plataformas espaciales o en globos estratosféricos. Por encima de la rodilla la detección directa requeriría el uso de instrumentos con áreas de colección tan grandes que resultan inviables para su construcción y operación en espacio. A energías más altas se utilizan métodos indirectos de detección que hacen uso de detectores extensos colocados en la superficie terrestre para detectar y medir las propiedades de las partículas de las cascadas atmosféricas producidas por los rayos cósmicos.

La medida precisa de las propiedades de los rayos cósmicos a todas las energías permitirá identificar el origen de las estructuras observadas en su espectro energético, que se cree contienen información sobre los diferentes posibles orígenes y los mecanismos mediante los que son acelerados y se propagan en el cosmos.

Actualmente las medidas directas de rayos cósmicos están limitadas a energías por debajo de la rodilla del espectro. La extensión de las medidas directas hasta energías de 10^{15} eV permitirá realizar estudios precisos de la composición y la estructura de la rodilla y avanzar enormemente en la comprensión de los rayos cósmicos galácticos.

La potencialidad de las medidas directas gracias a instrumentos precisos instalados en plataformas espaciales puede ilustrarse con las medidas recientes obtenidas por el espectrómetro magnético AMS-02 que opera en la Estación Espacial Internacional

(ISS) desde 2011. Las medidas de los flujos de las especies individuales de rayos cósmicos hasta energías de unos pocos TeV han revelado estructuras en sus espectros energéticos que no han podido ser reconciliadas con los modelos actuales para la producción y propagación de los rayos cósmicos galácticos. Por ejemplo, las estructuras observadas en los espectros de positrones y electrones requieren la inclusión de fuentes primarias de estas partículas no contempladas en los modelos actuales, ya sean de origen astrofísico, como pulsares, o los productos de la aniquilación de partículas de materia oscura en el halo galáctico.

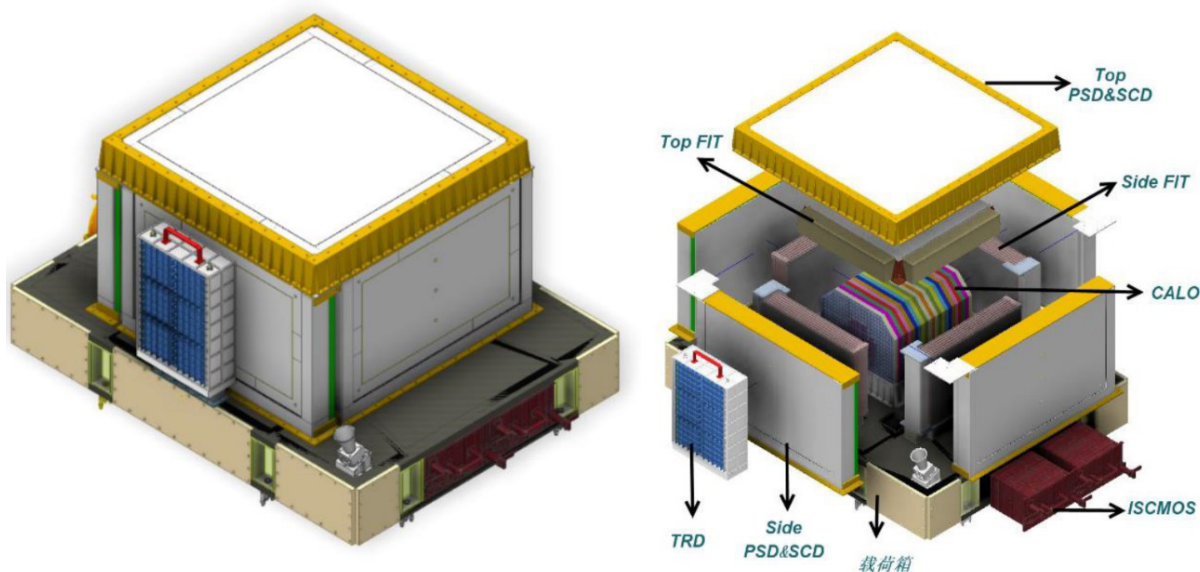
Sin embargo, los resultados experimentales actuales están limitados por la cantidad de partículas detectadas así como por el rango energético alcanzado. Para realizar una mejora cualitativa en la medida directa de los rayos cósmicos es necesario un nuevo instrumento que permita un aumento significativo en la exposición a la radiación cósmica. Este es el objetivo principal de HERD.

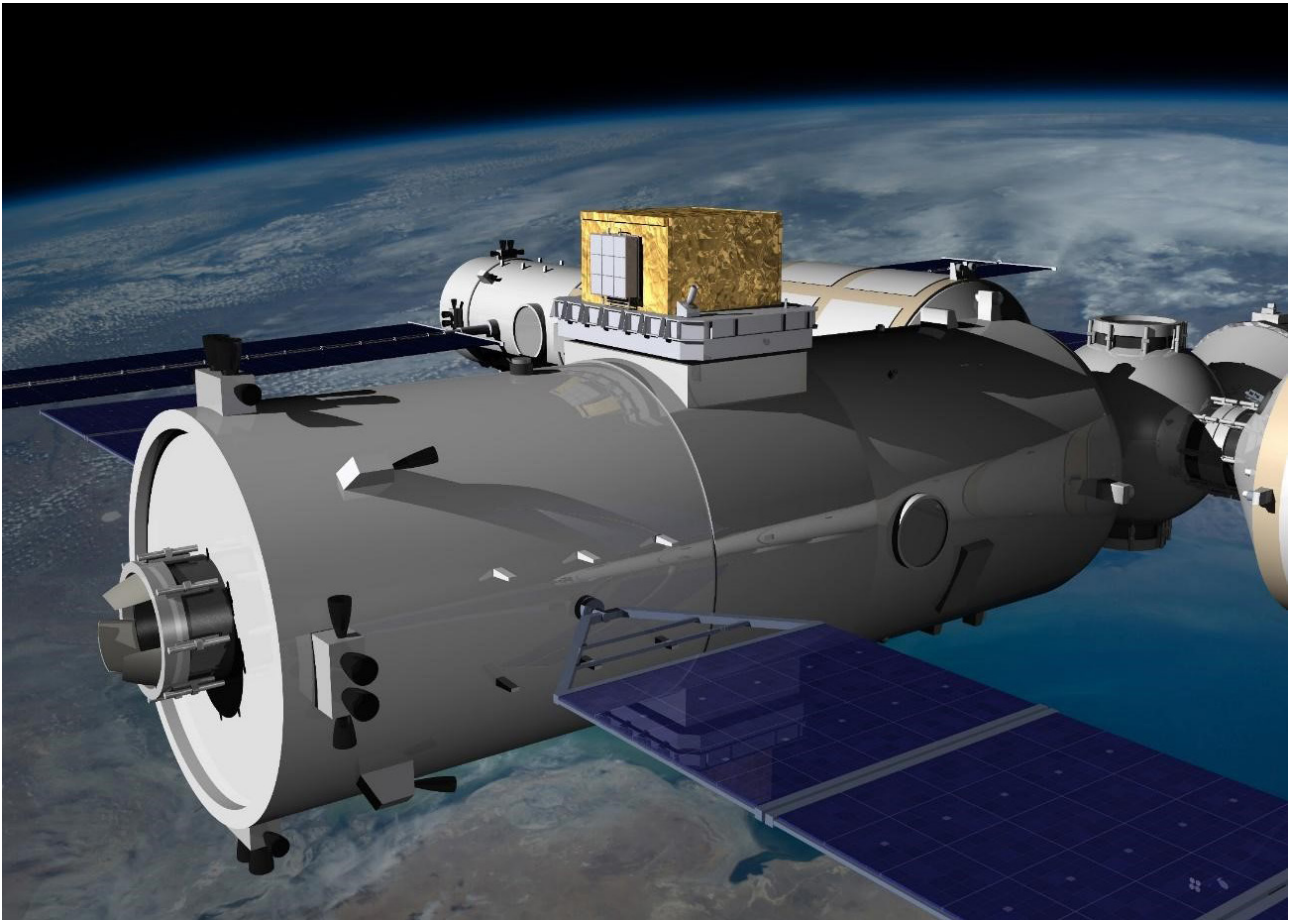
Además, dentro de la radiación cósmica, los rayos gamma constituyen una pequeña fracción en cuanto a su intensidad, pero de gran relevancia ya que, gracias a su carácter neutro, mantienen su trayectoria de origen, lo que permite realizar observaciones de objetos astronómicos y estudiar los fenómenos astrofísicos de más alta energía.

De igual modo que los rayos cósmicos, los rayos gamma interactúan en la atmósfera produciendo cascadas puramente electromagnéticas que, para energías por encima de unas pocas decenas de GeV, pueden ser detectadas en tierra mediante instrumentos especializados como los telescopios de rayos gamma MAGIC y el primer gran telescopio del futuro Cherenkov Telescope Array (CTA), el LST-1, ambos actualmente en operación en el Observatorio del Roque de los Muchachos en La Palma.

A energías por debajo de pocos centenares de GeV, el flujo de rayos gamma es suficientemente alto como para que los instrumentos espaciales

Esquema de HERD. Todos los servicios y la mayor parte de los componentes electrónicos del instrumento están ubicados en el plano inferior para maximizar el campo de visión del instrumento. La vista ampliada muestra los principales subsistemas de HERD.





Vista de HERD en la CSS. Ilustración de HERD ubicado en la parte superior de módulo multipropósito de la estación espacial china CSS. La CSS proporciona todos los servicios necesarios para HERD, incluyendo la potencia eléctrica, el circuito de refrigeración para la electrónica, así como la telemetría requerida para el control y monitorización y la transmisión de los datos científicos.

puedan detectarlos directamente y medir con precisión su dirección y energía utilizando las mismas técnicas experimentales que para la medida de rayos cósmicos.

Gracias a su gran campo de visión, HERD proporcionará una monitorización continua del cielo con observaciones que complementarán las de detectores de rayos gamma de muy alta energía en tierra (LHASSO, CTA), así como las de ondas gravitacionales (Virgo, LIGO) y neutrinos de alta energía (Ice-Cube, Km3NeT), durante el próximo decenio, en el contexto de la nueva astronomía multi-mensajero.

EL DETECTOR HERD

El detector central de HERD es un calorímetro (CALO) que proporciona la identificación y medida precisa de la energía de los rayos cósmicos incidentes. Rodeando al calorímetro se encuentra el detector de trazas (FIT) para la medida precisa de la trayectoria de las partículas cargadas, el detector de plástico de centelleo (PSD), que permite la identificación de los rayos gamma, y un detector de carga (SCD) que proporciona la medida del valor absoluto de la carga eléctrica de la partícula incidente. En un lateral, el detector de radiación de transición (TRD) permite la calibración en la medida de la energía del CALO.

El diseño de HERD se basa en la experiencia acumulada en detectores espaciales de radiación cósmica de alta energía y en una intensa actividad de I+D para el desarrollo y validación de detectores calorimétricos isótopos altamente segmentados para aplicaciones espaciales que permite un aumento significativo del factor geométrico efectivo para la misma masa de la carga útil.

El concepto de HERD ha sido validado mediante simulaciones detalladas y extensas campañas de pruebas con haces de partículas de alta energía que han permitido evaluar con precisión las capacidades de cada uno de los subdetectores tanto individual como conjuntamente. En particular, se ha comprobado que la resolución en la medida de la energía y las capacidades de identificación de las partículas incidentes responden a los requisitos establecidos.

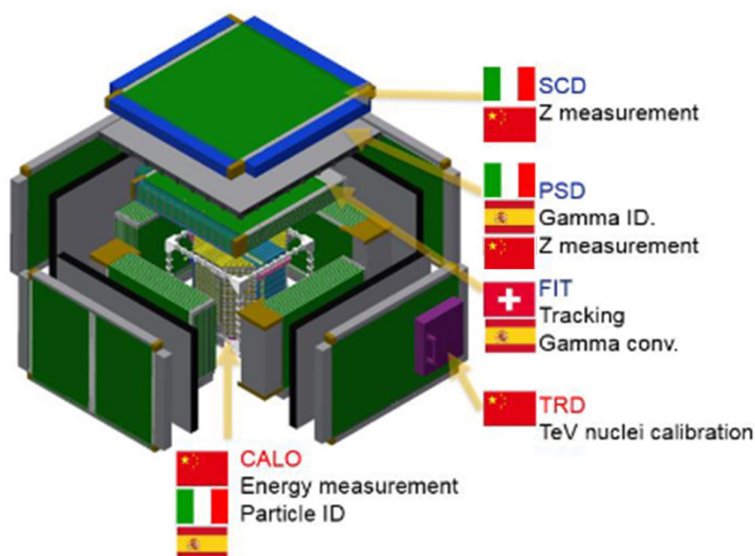
Basado en la validación proporcionada por los prototipos funcionales y el buen acuerdo con las simulaciones detalladas del instrumento, el diseño del modelo de vuelo de HERD, con unas dimensiones de 2.3 x 2.3 x 2.6 m³, una masa total de 4 toneladas, un consumo máximo de 1.2 kW, aumentará en más de un orden de magnitud el área efectiva de detección respecto a los instrumentos actuales, lo que permitirá extender el rango en la medida directa de las partículas de la radiación cósmica en más de un orden de magnitud y medir por primera vez con precisión la rodilla del espectro de los rayos cósmicos.

La CSS proporciona los recursos necesarios para la operación continua de HERD durante un periodo mínimo de 10 años incluyendo, además de la potencia eléctrica requerida por el instrumento, la infraestructura de refrigeración de la electrónica, así como la telemetría para el control y monitorización y la transmisión de los datos científicos, que se estima en 100 Mbps en promedio.

HERD se emplazará en la parte superior del nuevo módulo multifuncional de la CSS cuya instalación está prevista en la segunda mitad de esta década. HERD será integrado como carga útil en el interior de este módulo y, una vez completadas las operaciones de ensamblaje con el resto de la estación, será extraído con ayuda del brazo robótico de la CSS y depositado en la plataforma superior del módulo. Asimismo, el diseño de HERD permitirá, en caso de que fuera necesario a lo largo de su vida útil, realizar labores de mantenimiento mediante operaciones extravehiculares previstas en la CSS.

PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN HERD

Los grupos de astrofísica de partículas de CIEMAT, ICCUB e IFAE han identificado HERD como la misión que permitirá extender y complementar su programa experimental en física de rayos cósmicos y rayos gamma, y aplicar los desarrollos tecnológicos más recientes en detectores de física de partículas en un entorno espacial.



Participación Internacional en HERD. Ilustración de los principales sistemas de HERD en la que se muestra su funcionalidad y la participación internacional en su desarrollo. Los grupos españoles participan en el desarrollo de tres de los cuatro instrumentos de medida principales de HERD.

El CIEMAT inició en 2015 un programa de I+D para la próxima generación de detectores de rayos cósmicos espaciales, con el objetivo de desarrollar calorímetros isotrópicos para aplicaciones espaciales que pudieran proporcionar áreas efectivas superiores en un factor de 10 a las de los dispositivos actuales. Esto permitiría sondear las fuentes primarias de electrones y positrones más allá de los 10 TeV y, por primera vez, realizar un estudio preciso de la rodilla del espectro de los rayos cósmicos galácticos en el rango del PeV. En 2017, el CIEMAT se unió a HERD con el propósito de implementar las técnicas desarrolladas en el su programa de I+D. El CIEMAT desarrolla la electrónica de lectura y disparo del sistema de fotodiodos del calorímetro de HERD.

El ICCUB está desarrollando un circuito integrado de aplicación específica (o ASIC, de su definición en inglés "*Application Specific Integrated Circuit*"), denominado BETA para el FIT y el PSD que representa una contribución tecnológica clave para HERD. BETA es un ASIC diseñado para la lectura de fotomultiplicadores de silicio (SiPM), con bajo consumo, gran rango dinámico y con potencial uso en múltiples aplicaciones espaciales: sistemas de disparo y veto, medición de carga, calorimetría, conteo de fotones y contadores de tiempo de vuelo con resolución temporal moderada. De hecho, más allá del experimento HERD, BETA se utilizará para desarrollar una nueva versión del monitor de

radiación para la misión LISA de la ESA y se considera para diferentes misiones CubeSat.

La participación de IFAE se centra en optimizar el potencial científico de HERD como observatorio espacial de rayos gamma. Para ello, IFAE está desarrollando un sistema avanzado de disparo para rayos gamma, así como la electrónica de disparo del FIT y la electrónica de lectura y disparo del PSD. Gracias a la incorporación del sistema de disparo desarrollado en IFAE, se pretende reducir el umbral de detección de rayos gamma hasta 100 MeV, lo que convertirá a HERD en el instrumento de gran campo de visión más sensible dentro de su rango de energía durante su periodo de operación, y permitirá realizar observaciones complementarias a los telescopios terrestres y aumentar así sensiblemente el retorno científico de la misión.

La aportación tecnológica española en HERD se centra pues en el desarrollo de electrónica avanzada para los principales sistemas (CALO, FIT y PSD), y cubre toda la cadena de adquisición y disparo asociada.

Los desarrollos bajo responsabilidad de los grupos españoles son esenciales para alcanzar los objetivos científicos de la misión con rayos cósmicos de alta energía y permiten aumentar significativamente las capacidades de HERD para física de rayos gamma.