

Grandes instalaciones científicas en Física Nuclear: pasado, presente y futuro

José Benlliure y Berta Rubio

1. Introducción

El estudio de la materia nuclear, la estructura del núcleo atómico y sus constituyentes, los hadrones, requiere sondas de diferente naturaleza y energía, capaces de proporcionar información sobre una gran variedad de fenómenos que se manifiestan a diferentes escalas de tamaño. Así por ejemplo, la materia nuclear en condiciones extremas de densidad y temperatura sólo puede producirse en el laboratorio, utilizando colisiones entre iones pesados acelerados a energías relativistas. La estructura del núcleo atómico puede investigarse excitando alguno de sus grados de libertad utilizando reacciones inducidas por iones de especies nucleares estables, protones o sondas electromagnéticas. Más recientemente, la posibilidad de producir y acelerar iones de núcleos no estables o núcleos exóticos, ha abierto una nueva dimensión al estudio del núcleo atómico que está permitiendo descubrir nuevos fenómenos y producir grandes avances en el conocimiento del sistema nuclear de muchos cuerpos y la naturaleza de la fuerza nuclear. Finalmente, el estudio de estructuras sub-nucleónicas en nucleones y núcleos requiere el uso de sondas leptónicas y hadrónicas de gran energía que deben estar polarizadas cuando se quiere ser sensible al espín.

Históricamente, esta gran variedad de sondas que utiliza la física nuclear ha dado lugar a un elevado número de instalaciones científicas de escala pequeña o mediana y de ámbito regional o nacional. De hecho, la Unión Internacional de Física Básica y Aplicada (IUPAP) ha elaborado recientemente una guía de instalaciones científicas actuales relacionadas con la investigación básica en física nuclear [1] en la que se listan más de 85 aceleradores distribuidos por todo el mundo. Sin embargo, el incipiente aumento de la complejidad, tanto de los experimentos como de los aceleradores, y por tanto de su coste económico, está dando lugar a un proceso de concentración cuyo resultado es la creación de un reducido número de grandes centros de carácter internacional. Un claro ejemplo lo constituye FAIR, “Facility for Anti-proton and Ion Research” [2], cuya construcción fue aprobada oficialmente el pasado 7 de Noviembre de 2007 por 14 países, entre los que se encuentra España. Por otro lado, hoy en día se están construyendo muchos aceleradores dedicados a proyectos aplicados, por citar dos de los casos más emblemáticos podemos mencionar el tandem ubicado en el laboratorio de los sótanos del Louvre, dedicado al análisis de obras de arte, o el sincrotrón recientemente instalado en el hospital de Heidelberg para terapia de tumores con iones pesados. En España tenemos dos aceleradores dedicados principalmente al estudio de materiales y al análisis arqueológico en el Centro Nacional de Aceleradores en Sevilla [3] y en la Universidad Autónoma de Madrid [4].

El objetivo de este artículo no es describir de forma exhaustiva todas las instalaciones que se usan en física nuclear sino seleccionar aquéllas que están teniendo un papel más significativo en el estudio de las tres principales líneas de investigación actuales en física nuclear: la física de iones pesados relativistas, la física hadrónica y la estructura del núcleo atómico. Debido a la trascendencia que va a tener para el futuro de la física nuclear en general, y en particular para nuestro país, vamos a darle una atención especial a la descripción del nuevo centro internacional de investigación con iones y anti-protones (FAIR). Terminaremos este artículo describiendo las actividades de los grupos de investigación españoles en estas instalaciones científicas.

2. Estructura nuclear

El núcleo atómico es un sistema cuántico complejo cuyos constituyentes fundamentales son los protones y los neutrones ligados por la interacción fuerte, pero donde también están presentes las interacciones electromagnética y débil. Los núcleos presentan una gran variedad de aspectos, su complejidad varía desde los más simples, con un sólo protón, hasta aquéllos con cientos de nucleones. Sus estados excitados se manifiestan a veces de forma colectiva, como si se tratase de un sólo cuerpo, y a veces poniendo de manifiesto su carácter de una o varias partículas acopladas a un “core” más o menos inerte. El reto de la física nuclear es poder explicar éste y otros fenómenos a partir de ingredientes sencillos: los nucleones, las interacciones entre ellos, las leyes de conservación o el principio de exclusión de Pauli. Para ello es a menudo necesario conocer la respuesta del núcleo en condiciones extremas, por ejemplo de espín, de temperatura o de isoespín (ver artículo de M.J.G. Borge y A. Poves en este monográfico).

Como ya hemos explicado en la introducción la forma más efectiva de estudiar los núcleos es haciéndolos interactuar con otros núcleos o con partículas. Para ello se utilizan los aceleradores de partículas. Los primeros aceleradores de partículas o iones se construyeron hace unos 70 años, eran relativamente simples y aceleraban iones ligeros como protones y partículas alfa a energías que apenas superaban la barrera coulombiana. Estos primeros aceleradores sólo permitían estudiar algunas propiedades básicas de los núcleos y sus mecanismos de reacción.

El aumento progresivo de la energía de los iones nos ha permitido estudiar fenómenos colectivos que se manifiestan a más alta energía como las resonancias gigantes. Estados excitados del núcleo en los que, por ejemplo protones y neutrones se mueven coherentemente y en fases opuestas, formando un dipolo nuclear. Hoy en día podemos acelerar iones a energías

que superan con creces las necesarias para el estudio de la estructura nuclear, pero que nos han permitido penetrar en el estudio de la física hadrónica, es decir en la estructura interna de los nucleones como veremos en el siguiente capítulo. Por otro lado, las reacciones inducidas por iones pesados a no muy alta energía se han utilizado para producir por fusión núcleos pesados y superpesados. Estas reacciones no sólo han permitido extender los límites de la tabla periódica, sino estudiar el comportamiento de los núcleos en condiciones extremas de momento angular (hasta 75 unidades de $\hbar$), lo que ha dado lugar a descubrimientos interesantes como la superdeformación nuclear [5]. Las instalaciones europeas de iones pesados que continúan produciendo muchos resultados interesantes son LNL-INFN (Legnaro, Italia) [6], JYFL (Jyväskylä, Finlandia) [7], GANIL (Caen, Francia) [8] y el GSI (Darmstadt, Alemania) [9].

Las sondas electromagnéticas de hasta varias decenas de MeV también permiten estudiar la estructura del núcleo atómico utilizando reacciones de difusión elástica o inelástica. Las reacciones de difusión elástica de electrones proporcionan información sobre la distribución de carga de los núcleos. La difusión inelástica inducida por electrones y fotones no sólo permiten excitar de forma selectiva algunas resonancias nucleares sino que también son un mecanismo para estudiar la estructura de estados de partícula independiente mediante colisiones del tipo $(e, e'p)$ o $(e, e'n)$. Para producir este tipo de sondas son necesarios aceleradores de electrones que también permiten producir fotones por *Bremstrahlung* (frenado). Hasta ahora estas sondas sólo podían utilizarse con núcleos estables. En un futuro próximo, el experimento Elise de FAIR permitirá estudiar colisiones entre electrones y núcleos exóticos.

¿Que pasa con el isospín? ¿En otras palabras, cuánto hemos conseguido alejarnos del así llamado Valle de la Estabilidad? La posibilidad de producir núcleos muy lejos de la estabilidad (también llamados núcleos exóticos) ha permitido durante las últimas décadas estudiar cómo el isospín nuclear afecta a la estructura y las propiedades básicas del núcleo atómico. Estos núcleos se producen en reacciones nucleares primarias inducidas por haces de núcleos estables. Diferentes técnicas de identificación y separación permiten producir núcleos pertenecientes a diferentes regiones de la carta de núcleos y por lo tanto con diferente valor de isospín. Hoy en día se utilizan dos técnicas complementarias para la producción de núcleos exóticos.

La primera de estas técnicas es la llamada “separación isotópica en línea” ISOL (de sus siglas en inglés). En este caso se utilizan reacciones de fusión-evaporación, fisión o espalación para producir núcleos lejos de la estabilidad. Los núcleos producidos en estas reacciones se extraen del blanco por difusión térmica, se ionizan en una fuente de iones y se separan e identifican utilizando un dipolo magnético o separador de masas. El separador de masas más antiguo y que todavía sigue produciendo núcleos muy alejados de la estabilidad es ISOLDE (CERN), que explota la energía e intensidad del haz de protones del “booster” del PS para producir núcleos exóticos mediante reacciones de espalación. Otras instalaciones que utilizan la técnica ISOL en Europa son LISOL en Louvain-la Neuve (Bélgica) [10] y IGISOL en Jyväskylä (Finlandia) [11].

La otra técnica que se utiliza para producir núcleos exóticos es la llamada “técnica de separación en vuelo” (In-flight separation). En este caso se aceleran núcleos pesados a energías relativistas que se hacen reaccionar con blancos relativamente finos de elementos ligeros. Los núcleos producidos en la fragmentación del proyectil constituyen los núcleos exóticos que debido a la cinemática inversa de la reacción siguen en movimiento y son identificados y separados utilizando espectrómetros magnéticos como el FRS del GSI (Alemania) [12], LISE en GANIL (Francia) [13] y el S800 en MSU (USA) [14]. Todas estas instalaciones utilizan ciclotrones o sincrotrones capaces de acelerar haces de iones pesados.

Los núcleos producidos por estos métodos pueden servir para estudiar sus propiedades: forma de desintegración, masa, espín etc..., o se pueden usar como haces secundarios para hacer una nueva reacción. En este segundo caso las instalaciones se llaman RIBS “Radioactive Beam Facilities”. En estos momentos existen instalaciones como REX ISOLDE [15], GANIL o el GSI donde se producen una gran variedad de haces radioactivos que se usan para llevar a cabo reacciones secundarias. Los haces postacelerados como los de REX-ISOLDE tienen una calidad equivalente a la de los haces estables. Haces producidos directamente en fragmentación pueden llegar a una calidad equivalente si se utilizan anillos de almacenamiento.

El límite hoy en día de estas instalaciones es la intensidad. Por ello la comunidad europea ha hecho una apuesta de futuro cuyo objetivo es conseguir haces radioactivos de alta intensidad. Una de las propuestas es FAIR que por su importancia y por la participación de la comunidad científica española explicaremos con más detalle en la segunda parte de este artículo. La otra gran apuesta, basada en la técnica Isol tendrá dos fases, una a corto plazo, Spiral 2 [16], que se construirá en Francia prácticamente en paralelo con FAIR y la otra es Eurisol [17], a más largo plazo (unos 20 años). FAIR y Spiral 2 forman parte de la lista de 23 grandes instalaciones de la hoja de ruta de ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) [18] mientras que Eurisol se considera todavía en estado “embrionario” en esta misma lista.

El continente americano no se ha quedado al margen de este tipo de iniciativas. En estos momentos hay laboratorios que usan la técnica Isol para producir haces radioactivos como ISAAC en TRIUMF (Canada) [19] y HRIBF en Oak Ridge [20], y NSCL en MSU [21] que utiliza la técnica de fragmentación. En cuanto al futuro se propone una instalación de segunda generación que se llamó originariamente RIA (Rare Isotope Accelerator) y ahora ha pasado a llamarse RIBF (Rare Isotope Beam Facility) que contempla una solución mixta Isol/Fragmentación. Esta propuesta está incluida en el documento aprobado por el departamento de energía de Estados Unidos en Agosto de 2007 [22].

Japón ha finalizado recientemente la construcción de una nueva instalación para producir haces de núcleos exóticos “Radioactive Ion Beam Factory” de RIKEN [23]. En este caso se ha apostado por una serie de 3 ciclotrones en línea con tecnología superconductora con los cuales son capaces de acelerar iones pesados hasta una energía de 350 MeV por nucleón. Los haces radiactivos se producen mediante fragmentación y se separan en vuelo usando el separador de

fragmentos BigRIPS. Esta instalación de haces radioactivos está iniciando su andadura y ya están obteniendo los primeros resultados (figura 1).

Finalmente queremos mencionar que algunas reacciones a baja energía con iones ligeros o reacciones de captura neutrónica son de gran interés en astrofísica nuclear y tiene sus instalaciones dedicadas. Si nos restringimos a Europa, podemos citar los aceleradores de Bochum (Alemania) o FZK (Kalsruhe, Alemania) hasta hace poco y actualmente LUNA en Gran Sasso [24] y nTOF en el CERN [25].

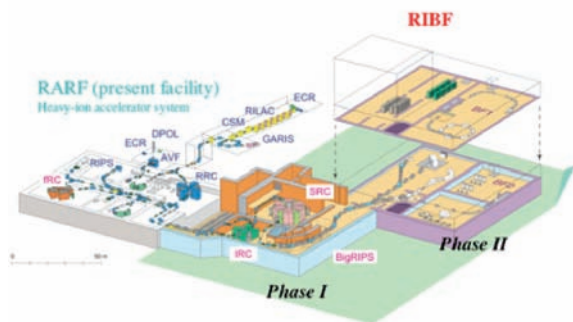


Figura 1. Visión artística de RI beam Factory en RIKEN (Japón). En estos momentos se ha terminado de construir la fase 1 y se están obteniendo los primeros resultados.

3. Física de iones pesados relativistas

Hoy en día disponemos de una teoría que describe la interacción fuerte, la cromodinámica cuántica (QCD), con un número reducido de parámetros que deben determinarse a partir de medidas experimentales. Sin embargo, todavía resulta un desafío el utilizar la cromodinámica cuántica para describir el comportamiento de la materia ligada por la interacción fuerte, excepto en el límite en el que el acoplamiento es lo suficientemente débil como para poder utilizar métodos de cálculo perturbativo.

Las colisiones entre iones pesados a energías relativistas y ultrarelativistas permiten producir materia en condiciones extremas de densidad y temperatura cuyo comportamiento puede predecirse con QCD. Por tanto, este tipo de experimentos permiten verificar esta teoría, y en particular una de sus simetrías fundamentales, la simetría quiral, responsable del confinamiento de quarks y gluones en la materia que conocemos y de la transición entre el plasma de quarks y gluones y la materia hadrónica que tuvo lugar pocos instantes después del Big-Bang. Por otra parte, el estudio de colisiones entre iones pesados también permite caracterizar la dinámica de la materia nuclear en base a variables macroscópicas, tales como temperatura y densidad, y a partir de ellas determinar la correspondiente ecuación de estado.

Desde un punto de vista experimental, el primer programa de estudio de la materia nuclear en condiciones extremas de densidad y temperatura y de su ecuación de estado, se inició en el Bevalac (Berkeley, USA) a principio de los años 70. El Bevalac fue el primer sincrotrón capaz de acelerar iones de cualquier elemento de la tabla periódica hasta energías del orden de 2 GeV por nucleón con los que poder estudiar reacciones de núcleos pesados sobre blancos fijos. Poco después el sincrotrón de gradiente alterno (AGS) de Brookhaven (USA) permitió acelerar iones pesados hasta 20

GeV por nucleón. En los años 80 se inician los programas de iones pesados en el super sincrotrón de protones (SPS) del CERN y en el sincrotrón SIS18 del GSI (Alemania) alcanzando energías del orden de 160 y 2 GeV por nucleón respectivamente.

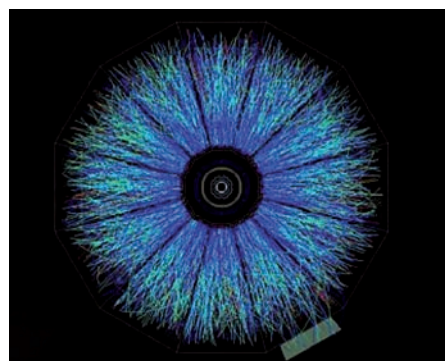


Figura 2. Primera colisión Au-Au a 100 GeV por nucleón vista por el detector STAR de RHIC.

El gran salto cualitativo en la producción de materia nuclear densa y caliente se ha producido en los últimos años con la puesta en funcionamiento del colisionador de iones pesados ultrarrelativistas RHIC (Relativistic Heavy Ions Collider) en Brookhaven (USA) [26] (figura 2) y la inminente puesta en operación del LHC (Large Hadron Collider) en el CERN [27]. Estas dos instalaciones van a permitir estudiar colisiones núcleo-núcleo en movimiento, con energías en el centro de masas suficientes para explorar la transición y el plasma de quarks y gluones.

El proyecto FAIR, recientemente aprobado, incluye un programa experimental de colisiones de iones pesados acelerados hasta 40 GeV por nucleón en el sincrotrón SIS300 con blancos fijos. En estas colisiones se espera producir un gran volumen de materia nuclear con temperatura moderada pero con gran densidad bariónica, explorando así otras regiones del diagrama de fases de la materia nuclear.

4. Física hadrónica

La física hadrónica tiene por objeto el estudio de la estructura de los hadrones y en particular de los nucleones, dentro del llamado régimen de confinamiento o régimen no perturbativo de QCD. Aunque este régimen sigue siendo un desafío, los cálculos de QCD en red representan una herramienta prometedora que puede validarse a partir de la observación experimental de algunas de sus predicciones. En este sentido destaca la predicción de la existencia de mesones exóticos (“glueballs” y “hybrids”), en los que los gluones juegan un papel más allá de ser meros responsables de la ligadura entre quarks, contribuyendo también a los números cuánticos que definen a los hadrones como el espín. La actividad experimental también contribuye activamente a caracterizar la estructura del nucleón en base a sus distribuciones de masa y carga, de momentos electromagnéticos y de espín, así como la modificación de las propiedades de los hadrones cuando éstos se encuentran dentro del medio nuclear.

La caracterización experimental de la estructura de los hadrones y las verificaciones de los cálculos de QCD en red requiere una gran variedad de sondas sensibles a diferentes

observables, y por tanto el uso de una gran cantidad de instalaciones equipadas con diferentes tipos de aceleradores. Difusiones elásticas e inelásticas inducidas por sondas electromagnéticas y colisiones “Drell-Yan” inducidas por hadrones, constituyen técnicas complementarias para el estudio y caracterización de la estructura de los hadrones. Además de los diferentes tipos de sondas y rangos de energía, la polarización de proyectiles y blancos es una herramienta necesaria para poder obtener observables sensibles al espín.

Las principales instalaciones que se utilizan en física hadrónica pueden clasificarse en función del tipo de sonda (ver tabla 1). Las principales sondas que se utilizan son los fotones de alta energía producidos por retrodifusión Compton de un láser sobre electrones circulando en un sincrotrón, los haces de electrones en colisiones sobre blanco fijo, colisionadores e^-e^+ o las sondas hadrónicas, principalmente protones y anti-protones. La modificación de las propiedades de los hadrones en el medio nuclear se estudia en instalaciones que proporcionan haces de iones pesados a energías relativistas. Entre estas podemos destacar los experimentos CERES [40] en el SPS del CERN (Suiza) y Hades [41] en el SIS18 del GSI (Alemania).

Sonda	Centro	Ubicación
$\gamma(1.5 \text{ GeV})$	Graal, ESRF [28]	Grenoble (Francia)
$\gamma(8 \text{ GeV})$	LEPS, Spring-8 [29]	Harima (Japón)
$e^-(5.5 \text{ GeV})$	Thomas Jefferson [30]	Virginia (USA)
$e^-(1.5 \text{ GeV})$	MAMI [31]	Mainz (Alemania)
$e^-(0.5 \text{ GeV})-e^+(0.5 \text{ GeV})$	DAΦNE [32]	Frascati (Italia)
$e^-(9 \text{ GeV}) - e^+(3.1 \text{ GeV})$	SLAC [33]	Stanford (USA)
$e^-(8 \text{ GeV}) - e^+(3.5 \text{ GeV})$	KEK [34]	Tsukuba (Japón)
$e^-(27.5 \text{ GeV})-p(920 \text{ GeV})$	HERA [37]	DESY (Alemania)
$p(2.8 \text{ GeV})$	COSY [38]	Julich (Alemania)
$p(20 \text{ GeV})$	SPS[39]	CERN (Suiza)
$p(250 \text{ GeV})-p(250 \text{ GeV})$	pp2pp, RHIC [26]	Brookhaven (USA)

Tabla 1. Principales centros de investigación en Física Hadrónica.

A medio y largo plazo la actividad en física hadrónica va a estar dominada principalmente por tres nuevas instalaciones, la ampliación del Jefferson Lab en Estados Unidos, el proyecto FAIR en Europa y el proyecto J-PARC en Japón. El incremento en energía del haz de electrones del Jefferson Lab hasta 12 GeV [42] permitirá extender las medidas de los factores de forma eléctrico y magnético del protón y del neutrón a distancias hasta un factor dos más pequeñas que las que se pueden explorar hoy en día y obtener información sobre la estructura de los hadrones a tres dimensiones a partir de la distribución generalizada de partones. En el caso de FAIR se propone utilizar colisiones anti-protón protón entre 1 y 15 GeV. Este rango de energías permitirá la producción de mesones exóticos, en particular de estados excitados de gluones en el sector de quarks ligeros. Estas energías también permitirán producir mesones con encanto pudiendo

desarrollar estudios espectroscópicos del charmonio, mesones constituidos por un quark y un anti-quark con encanto. Finalmente, el proyecto J-PARC (figura 3) [43] propone desarrollar un programa de física hadrónica a partir de haces secundarios de piones y kaones producidos en colisiones inducidas por protones de 50 GeV. El programa científico gira en torno a la física de la extrañeza, espectroscopía de hadrones o la medida de la distribución de partones.



Figura 3. Representación esquemática del complejo de aceleradores del nuevo proyecto J-PARC en Japón.

5. El centro internacional de investigación con iones y anti-protones FAIR

El pasado 7 de Noviembre de 2007 tuvo lugar en la ciudad alemana de Darmstadt la ceremonia inaugural de la construcción del nuevo centro internacional de investigación con iones y antiprotones FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) (figura 4). Este gran centro internacional estará equipado con un moderno sistema de aceleradores con los que estudiar la estructura de la materia a nivel subatómico, y su influencia en la comprensión del origen y posterior evolución del Universo. FAIR cubrirá el intervalo existente entre la física de partículas (estudio de los constituyentes fundamentales de la materia) y la física de estado sólido y materiales (estudio de estructuras complejas de materia).



Figura 4. El nuevo centro internacional de investigación con iones y antiprotones FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research)

Los dos sincrotrones superconductores de 100 y 300 Tm, junto con los cuatro anillos de almacenamiento y el separador de fragmentos Super-FRS hacen de FAIR el centro de investigación internacional más ambicioso, versátil e innovador, desde el punto de vista de la tecnología de ace-

leradores. De hecho, este centro permitirá producir haces de núcleos estables y exóticos con intensidades sin precedentes y energías de hasta 40 GeV por nucleón, así como haces de anti-protones de gran intensidad. Estos haces harán posible el desarrollo de un amplio programa científico multidisciplinar en física hadrónica, nuclear y atómica, que pretende dar respuesta a preguntas tan fundamentales como cuál es el origen de la masa de los hadrones, en qué parte del Universo y de qué manera se crean los elementos químicos que forman la Tierra y por qué son unos más abundantes que otros, o la caracterización de una de las cuatro interacciones fundamentales y menos conocida presentes en nuestro Universo, la interacción fuerte.

En el programa científico de FAIR participan 2500 investigadores de 14 países; Alemania, Austria, China, Eslovenia, España, Finlandia, Francia, India, Italia, Polonia, Reino Unido, Rumania, Rusia y Suecia. Este programa científico se articula en torno a cuatro ejes: estructura del núcleo atómico y astrofísica nuclear con haces de núcleos exóticos, estudios de QCD y física hadrónica con haces de protones y anti-protones, materia hadrónica a alta densidad y temperatura a partir de colisiones de iones pesados hasta 40 GeV por nucleón sobre blancos fijos y física de plasma, física atómica y aplicaciones combinando haces de iones pesados y láseres de gran potencia.

El interés científico y tecnológico del proyecto FAIR está avalado por numerosos paneles de expertos internacionales. En particular NuPECC, el comité europeo experto en física nuclear, ha priorizado este proyecto situándolo en el primer lugar de su “hoja de ruta” y ESFRI lo ha incluido en su “lista de oportunidades”. El coste total del proyecto FAIR asciende a 1186 M€ de los que el 75% serán financiados por el gobierno alemán y el 25% restante por los otros países participantes en FAIR. La construcción del centro se iniciará en 2007 y se extenderá en tres fases hasta el año 2015. España participa en FAIR con un porcentaje mínimo del 2%.

5.1 NUSTAR

La colaboración NUSTAR (NUclear STructure, Astrophysics and Reactions) [44] propone realizar una serie de experimentos explotando los haces radioactivos que se producirán en FAIR con una intensidad y variedad sin precedentes. La clave del avance de FAIR respecto a otras instalaciones de haces radioactivos existentes o de próxima construcción radica en la intensidad y la universalidad de los haces radioactivos que se producirán. A ello contribuyen el modo de producción (fragmentación), la intensidad del haz primario, su energía y la gran aceptación del Separador de Fragmentos Superconductor (Super-FRS). En NUSTAR se espera aumentar la intensidad de los haces radioactivos en tres órdenes de magnitud respecto a lo que se produce en la actual instalación del GSI.

Si pensamos en cómo hemos estudiado hasta ahora las propiedades de los núcleos vemos que las dos herramientas fundamentales han sido el estudio de las desintegraciones radiactivas, y las reacciones nucleares. Ambas técnicas se aúnan en los experimentos propuestos en NUSTAR. Es más, existe una gran complementariedad entre unos experimentos y otros. En NUSTAR queremos realizar experimentos en

los que podamos variar tanto la energía como el espín o el isoespín, pero no cabe duda que en términos de isoespín es donde se espera el mayor avance

NUSTAR estará dividido en tres grandes áreas experimentales como vemos en la figura 5, el área de alta energía (High Energy Branch), el área de baja energía (Low Energy Branch) y el área de los anillos. El experimento que explota la energía inicial de los haces radiactivos haciéndolos incidir sobre un blanco fijo es R3B (Reactions with relativistic radioactive ion beams) que se situará en la línea de alta energía. La mayor parte de las partículas creadas en la colisión se emitirán hacia delante. En R3B se medirán neutrones, protones, fragmentos pesados y gammas. La idea es tener una reconstrucción completa de cada suceso.

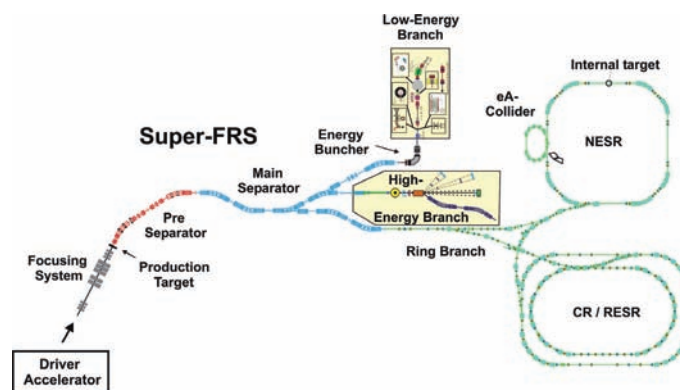


Figura 5. Representación esquemática de las instalaciones NUSTAR de FAIR.

En el área de baja energía se decelerarán los iones radioactivos, el rango de energías irá de 100 MeV por nucleón hasta cero. En HISPEC (High resolution In flight spectroscopy) se estudiarán reacciones a energías intermedias o energías próximas a la barrera de Coulomb. Uno de los componentes más importantes de HISPEC es AGATA (Advance Gamma Tracking Array) [45]. AGATA será la primera bola compuesta completamente por cristales de Ge hiperpuros y con un poder de resolución mucho mayor que los espectrómetros actuales. Por otro lado en DESPEC (Decay Spectroscopy) se plantea el estudio de las propiedades de desintegración de los núcleos más exóticos. Este tipo de experimentos proporciona a menudo la primera información sobre un núcleo que se sintetiza por primera vez. El dispositivo experimental de DESPEC incluye un detector de implantación, rodeado de detectores de radiación gamma, y neutrones. Los experimentos MATS y LASPEC usarán una cámara de gas para frenar los núcleos radioactivos y líneas de haz que los reconducirán hasta los correspondientes dispositivos experimentales. En MATS se utilizará un “Advance Trapping System” consistente en tres trampas en línea que permitirán hacer medidas de masas de una gran precisión. Por otro lado en LASPEC (LASer SPECTroscopy of Short-lived nuclei) se hará uso de la experiencia acumulada en otras instalaciones Isol europeas para, utilizando láseres compactos en línea con los haces radioactivos, extraer información de los estados fundamentales o isoméricos tales como el tamaño y la forma de la distribución de carga, el espín etc...

La línea de los anillos es un aspecto único de FAIR. Solamente en RIKEN se han planteado un anillo de acumulación, pero de momento está relegado “sine diem” a una segunda fase. La línea de los anillos de FAIR consiste en un primer anillo de acumulación CR que recoge directamente los haces radioactivos producidos en el Super-FRS para luego transferirlos al anillo propiamente experimental NESR.

Los anillos también pueden utilizarse como instrumento de medida. El experimento ILIMA (Isomeric beams, Lifetimes and MAsses) hará uso del CR para medir masas de iones e isómeros con vidas medias de hasta microsegundos, usando la técnica de circulación isócrona de los iones en el anillo (ISM, Isochronous Mass Spectroscopy), mientras que los núcleos con vidas medias superiores a 1 s podrán medirse con mayor precisión usando el método Schottky de espectrometría de masas SMS (Schottky Mass Spectrometry). El dispositivo experimental del experimento EXL (EXotic nuclei studied in Light-ion induced reactions) es en muchos aspectos complementario a R3B. Por un lado tiene la desventaja de que no puede llegar a núcleos tan exóticos como R3B, pero tiene la ventaja de que los haces producidos, acumulados y enfriados en el anillo NESR serán de una gran calidad y por tanto se pueden realizar medidas de más precisión.

Finalmente, los haces radiactivos con características ópticas óptimas nos permitirán hacer experimentos innovadores de colisiones con electrones o antiprotones. Para ello se instalará otro anillo de electrones ER junto al NESR, ver figura 5. ELISE será el primer experimento capaz de medir colisiones elásticas e inelásticas de electrones con núcleos radioactivos. Esto permitirá hacer medidas independientes de modelos de distribución de carga en el núcleo o excitar estados colectivos a baja y alta energía (resonancias gigantes) y diferentes multipolaridades. Análogamente, la colaboración AIC (Antiprotón Ion Collision) usará antiprotones enfriados que se inyectarán en el ER para poder estudiar colisiones con núcleos radioactivos. De esta forma se podrán medir radios de protones y neutrones simultáneamente, cancelando así muchos errores sistemáticos.

Como hemos podido ver hay un gran solapamiento e intereses comunes o íntimamente relacionados en la física que se hará en NUSTAR. Ejemplos típicos son las medidas de radios de carga o distribuciones de carga en ELISE y AIC, y las medidas de momentos eléctricos cuadrupolares en LASPEC o las medidas de masas en ILIMA y en MATS. Además se podrá estudiar la evolución de los estados de monopartícula usando distintas reacciones y se podrá hacer la comparación directa de la desintegración beta y la reacción de intercambio de carga en el mismo núcleo, que quizás nos dará la clave del “quenching” de la fuerza Gamow Teller después de 30 años.

5.2 CBM

El experimento CBM (Compressed Barionic Matter) [46] propone estudiar colisiones de iones pesados con blancos fijos a energías entre 10 y 40 GeV por nucleón. Este régimen de energía permitirá producir e investigar materia bariónica a la mayor densidad que se puede alcanzar en el laboratorio, aproximándose a la que puede existir en el interior de las estrellas de neutrones. Además, la gran intensidad de proyec-

tiles primarios que puede proporcionar el conjunto de aceleradores de FAIR, en particular el sincrotrón SIS300, junto a la gran tasa de adquisición de sucesos que será capaz de registrar el detector CBM (10^7 reacciones por segundo con una multiplicidad media de 1000 partículas cargadas por colisión) permitirán identificar observables raros pero que proporcionan información sobre el comportamiento de la materia nuclear con gran densidad. El programa científico de CBM propone el estudio de la estructura y la ecuación de estado de la materia bariónica de gran densidad. En particular se pretende determinar dónde está el límite en el diagrama de fases entre la materia hadrónica y la materia de partones (plasma de quarks y gluones), identificar el punto crítico que caracteriza dicha transición de fase y buscar evidencias del restablecimiento de la simetría quiral cuando la densidad bariónica es muy elevada. Este programa científico es complementario a los que se desarrollan en el RHIC en Brookhaven y en un futuro próximo en el LHC en el CERN donde se explorará el diagrama de fases de la materia nuclear en regiones de muy alta temperatura y baja densidad bariónica.

Uno de los mayores desafíos de este experimento es el establecer observables que proporcionen información sobre los objetivos científicos descritos en el párrafo anterior. Estos observables están basados en las tasas de producción y distribución en el espacio de fases de las nuevas partículas que se creen en estas colisiones, y sus correlaciones y fluctuaciones. Hoy en día sabemos que diferentes especies de partículas proporcionan información sobre diferentes estados y condiciones de la materia nuclear. Así por ejemplo, las partículas que contienen quarks con encanto, como los mesones D, son producidas en las primeras fases de la colisión. De hecho, la teoría predice que las propiedades de los mesones D se modifican en un medio nuclear denso y por tanto se espera que su estudio permita obtener información sobre el restablecimiento de la simetría quiral al aumentar la densidad bariónica. Otro ejemplo lo constituye la producción de partículas pesadas con quarks extraños, como mesones ϕ o hiperones Ξ o Ω , que tiene lugar en condiciones de alta densidad y temperatura. Sus tasas de producción, y distribuciones angulares y de momento, proporcionan pues información sobre la zona de reacción. Por otro lado, el movimiento colectivo de las partículas emitidas está relacionado con la compresibilidad de la materia creada en la colisión y por tanto su medida contribuye a la caracterización de la ecuación de estado de la materia nuclear. Las transiciones de fase, y en particular cuando éstas tienen lugar a través de un punto crítico, llevan implícitas grandes fluctuaciones de densidad. En el caso de la materia nuclear, se predice que esas fluctuaciones den lugar a un aumento en las fluctuaciones de las tasas de producción o del momento transversal medio de las partículas emitidas. Estas fluctuaciones dinámicas han sido propuestas como evidencias de la existencia de un punto crítico en la ecuación de estado de la materia nuclear. Pero para poder identificarlas se necesitan medidas exclusivas con un sistema de detección con gran aceptación geométrica y excelente capacidad de identificación de partículas.

El detector CBM constituirá un sistema de detección universal capaz de explotar todo el potencial de la física con iones pesados relativistas en FAIR. Este detector será capaz de detectar simultáneamente hadrones y leptones con una

gran aceptación geométrica. Una de las características clave de este instrumento será su capacidad de medir sucesos con una alta tasa de ocurrencia, lo cual permitirá investigar observables poco probables como la producción de mesones D o charmonio.

En la figura 6 representamos un esquema de este detector. En él puede identificarse el blanco rodeado por el dipolo magnético y el sistema de reconstrucción de trayectorias (STS) que permitirán reconstruir el momento de las partículas con una precisión mejor del 1%. El detector Cerenkov (RICH) permitirá identificar los electrones y suprimir los piones en el rango de momento de los electrones producidos en la desintegración de mesones vectoriales ligeros. El detector de radiación de transición (TRD) permitirá reconstruir las trayectorias e identificar los electrones y positrones de gran energía. La identificación de los hadrones se obtendrá por tiempo de vuelo medido con un muro de detectores de placas paralelas resistivas (TOF). Por último, el calorímetro electromagnético (ECAL) contribuirá a la identificación de electrones y fotones. Tal y como ya se ha mencionado, uno de los mayores desafíos de este detector es el sistema de trigger y adquisición de datos, capaz de gestionar una tasa de adquisición de unos 10^7 eventos por segundo con una multiplicidad media de 1000 partículas cargadas por evento.

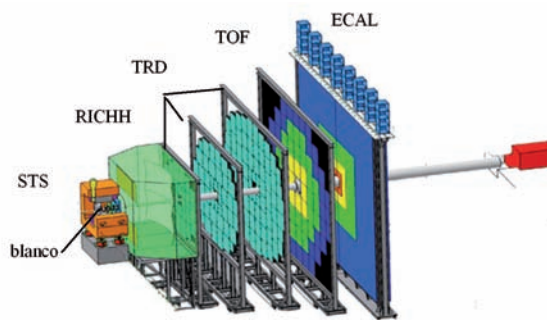


Figura 6. Representación esquemática del detector CBM.

5.3 PANDA

El experimento PANDA [47] propone responder a cuestiones fundamentales sobre física hadrónica y nuclear estudiando reacciones inducidas por anti-protones con energías entre 1 y 15 GeV, circulando en el anillo de almacenamiento HESR (High Energy Storage Ring) de FAIR, y un blanco fijo, generalmente de protones, alrededor del cual se sitúa el detector PANDA. Este tipo de reacciones permitirá producir gran cantidad de partículas con quarks extraños, quarks con encanto y gluones. Este experimento permitirá continuar y superar los programas experimentales desarrollados con anterioridad en el acumulador de anti-protones de Fermi Lab (USA) o el experimento LEAR en el CERN. La principal novedad la constituye no sólo el rango de energía, que permitirá la producción de quarks con encanto, sino también el uso de técnicas avanzadas de enfriamiento para el haz de anti-protones que permitirán medidas de mucha mayor resolución. Los principales temas del programa científico de PANDA son:

- Los quarks con encanto son lo suficientemente pesados como para poder utilizar cálculos perturbativos no relativistas para su descripción, aproximación que no es válida para quarks más ligeros. Por tanto, el estudio de la espectroscopía del charmonio permitirá obtener información sobre la naturaleza del confinamiento de los quarks dentro de los hadrones.
- Las colisiones entre anti-protones y protones hasta 15 GeV también van a permitir producir partículas con grados de libertad gluónicos en el sector de los quarks pesados en particular los quarks con encanto. Por ello, otro de los pilares del programa científico de PANDA será la búsqueda de estados exóticos de gluones como “glueballs” o “hybrids” en el rango de masa del charmonio.
- Por último PANDA también contribuirá a otros dos de los programas científicos de FAIR, el estudio de la materia nuclear en condiciones extremas de densidad y temperatura y la estructura del núcleo atómico. En particular PANDA permitirá estudiar la modificación de las propiedades de mesones con encanto en el medio nuclear y obtener información sobre la interacción charmonio-nucleón y charmonio-núcleo que es de vital importancia para identificar la formación del plasma de quarks y gluones en colisiones entre iones pesados relativistas. Del mismo modo, PANDA permitirá producir y estudiar núcleos atómicos en los que uno de los quarks ligeros, arriba (u) y abajo (d), que constituyen los nucleones, es sustituido por un quark con extrañeza (s) dando lugar a la formación de un hipernúcleo o núcleo extraño. Estos estudios abrirán otra dimensión al estudio de la estructura del núcleo atómico, la extrañeza, complementaria al uso de núcleos exóticos que permiten investigar el isoespín nuclear.

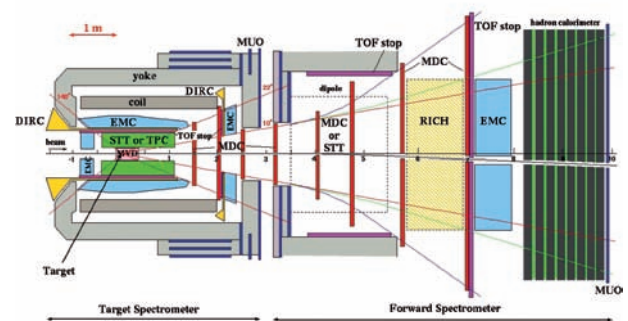


Figura 7. Representación esquemática del detector PANDA.

La consecución de estos objetivos científicos se basa en dos requisitos experimentales, una luminosidad sin precedentes para las interacciones anti-protón protón y una gran precisión en las medidas debida a una excelente calidad del haz de anti-protones y el uso de las tecnologías más recientes para la construcción del detector PANDA. El detector se divide en dos zonas, el espectrómetro alrededor del blanco y el espectrómetro situado a ángulos hacia delante.

El espectrómetro alrededor del blanco está constituido por los siguientes elementos: un solenoide superconductor, el sistema de detectores de micro vértice (MVD) constituido por detectores de píxel y microstrip, el detector de trazas

para el que se condiscutan dos opciones, detectores de silicio (STT) o una cámara de proyección temporal (TPC), un detector Cherenkov (DIRC) y finalmente el calorímetro electromagnético (EMC) constituido por más de 17000 cristales de PbWO_4 o BGO.

Los principales elementos del espectrómetro situado a ángulos hacia delante son: un dipolo magnético de gran apertura, detectores de trazas basados en cámaras de deriva, un segundo detector Cherenkov (RICH), la parte final del calorímetro electromagnético (EMC) y finalmente un calorímetro hadrónico.

5.4 APPA (Atomic Physics, Plasma Physics and Applications)

La posibilidad de disponer de haces de iones pesados y antiprotones en un rango tan amplio de energías y con intensidades muy superiores a las que se tienen hoy en día ofrece grandes posibilidades a campos afines a la física nuclear y a sus posibles aplicaciones. En la colaboración APPA participan experimentos cuyo objetivo es la producción de antimateria con la que estudiar simetrías fundamentales FLAIR [48], el estudio de las propiedades de átomos altamente ionizados SPARC [49], las propiedades de plasma de materia densa y caliente producido con haces intensos iones pesados y láseres de gran potencia HEDGeHOB [50] así como el estudio de materiales o tejidos biológicos en condiciones extremas de irradiación [51].

6. Participación española en grandes centros de investigación en física nuclear

La investigación básica experimental en Física Nuclear está presente en nuestro país desde los años setenta. Las primeras actividades se iniciaron en el Instituto de Física Corpuscular (CSIC-Universidad de Valencia) y fueron completadas con la creación en los años ochenta de otro grupo del CSIC en el Instituto de Estructura de la Materia en Madrid. Estas actividades se reforzaron a finales de los noventa con la creación de nuevos grupos de investigación en las Universidades de Santiago de Compostela y Huelva, así como en el CIEMAT. Más recientemente se han incorporado nuevos investigadores de esta área en la Universidades Autónoma y Complutense de Madrid, la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Salamanca. Además, algunos centros que hasta no hace mucho habían tenido una actividad puramente teórica han empezado a orientarse hacia la actividad experimental, como es el caso de la Universidad de Sevilla.

La principal línea de investigación que siguen los grupos en nuestro país es el estudio de la estructura y la dinámica del núcleo atómico, utilizando reacciones inducidas por neutrones, núcleos estables y sobre todo núcleos exóticos. Otras actividades que involucran a un menor número de investigadores están relacionadas con la astrofísica nuclear, el estudio de colisiones núcleo-núcleo o la física hadrónica. Esta actividad experimental tiene un amplio reconocimiento internacional y se realiza en la mayor parte de las instalaciones europeas dedicadas a este fin como son los experimentos ISOLDE y nTOF en el CERN, los experimentos RISING,

FRS y Hades en el GSI (Alemania) y diversos experimentos en otras instalaciones europeas importantes como GANIL (Francia), LNL (Italia), CRC (Bélgica) y JYFL (Finlandia). Los programas científicos desarrollados en estos centros por investigadores españoles se describen en otros artículos de este monográfico.

Cabe destacar que las actividades de los grupos españoles en todas estas instalaciones han sido aceptadas en base a la excelencia científica de las mismas sin que nuestro país haya contribuido a los costes de mantenimiento de las instalaciones, excepto en la instalación ISOLDE del CERN donde nuestro país contribuye oficialmente desde 2003. Esta situación ha cambiado desde la reciente aprobación de la participación española en el proyecto FAIR. De hecho, este proyecto está permitiendo incrementar el grado de coordinación entre los grupos de investigación españoles en física nuclear, aumentando así la visibilidad de estas actividades no sólo en el contexto internacional sino también en el nacional. Actualmente, científicos de once Universidades españolas, tres institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y del Centro de Investigaciones Energéticas, Tecnológicas y Medioambientales (CIEMAT), están trabajando activamente en la propuesta de futuros experimentos en FAIR y en el diseño del equipo experimental, liderando algunas de estas iniciativas.

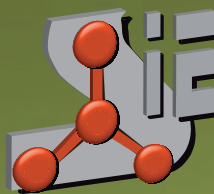
Referencias

- [1] Research Facilities in Nuclear Physics, IUPAP report 41
- [2] www.gsi.de/fair
- [3] www.centro.us.es/cna
- [4] www.uam.es/cmam/
- [5] B. M. NYAKO, ET AL. *Phys. Rev. Lett.*, **52** (1984) 507 y P.J. TWIN, ET AL. *Phys. Rev. Lett.*, **54** (1986) 811
- [6] <http://www.lnl.infn.it>
- [7] <http://www.jyu.fi/science/laitokset/fysiikka/en>
- [8] www.ganil.fr
- [9] www.gsi.de
- [10] <http://fys.kuleuven.be/iks/lisol>
- [11] <http://www.jyu.fi/science/laitokset/fysiikka/en/research/accelerator/igisol>
- [12] www-wnt.gsi.de/frs
- [13] www.ganil.fr/lise
- [14] www.nsl.msu.edu/tech/devices/s800
- [15] rextap.home.cern.ch/rextap/
- [16] <http://www.ganil.fr/research/developments/spiral2/index.html>
- [17] <http://www.eurisol.org>
- [18] ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/era/docs/esfri_list_opportunities_290305.pdf
- [19] <http://www.triumf.info/>
- [20] www.phy.ornl.gov/hrbif/
- [21] www.nsl.msu.edu
- [22] <http://www.science.doe.gov/about/Future/Facilities%20for%20the%20Future%20of%20Science.htm>
- [23] www.riken.go.jp/engn/index.html
- [24] <http://www.lngs.infn.it/>
- [25] <http://pceet075.cern.ch/>
- [26] <http://www.bnl.gov/rhic/>
- [27] <http://aliceinfo.cern.ch>

- [28] <http://www.lnf.infn.it/~levisand/graal/graal.html>
- [29] <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/index.html?>
- [30] <http://www.jlab.org/>
- [31] <http://www.kph.uni-mainz.de/>
- [32] <http://www.lnf.infn.it/acceleratori/>
- [33] <http://www.slac.stanford.edu/>
- [34] <http://www.kek.jp/intra-e/>
- [35] <http://www-public.slac.stanford.edu/babar/>
- [36] <http://belle.kek.jp/>
- [37] <http://adweb.desy.de/mpy/hera/>
- [38] http://www.fz-juelich.de/ikp/ikp-general/cosyh_e.html
- [39] <http://www.wcompass.cern.ch/>
- [40] <http://www.physi.uni-heidelberg.de/physis/ceres/>
- [41] <http://www-hades.gsi.de/>
- [42] <http://www.jlab.org/12GeV>
- [43] <http://j-parc-jp/index-e.htm>
- [44] http://www.gsi.de/fair/experiments/NUSTAR/projects_e.html
- [45] <http://www-win.gsi.de/agata/overview.htm>
- [46] http://www.gsi.de/fair/experiments/CBM/index_e.html
- [47] http://www-panda.gsi.de/auto/_home.htm
- [48] <http://www.oew.ac.at/smi/flair/>
- [49] http://www.gsi.de/fair/experiments/sparc/index_e.html
- [50] <http://hedgehob.physik.tu-darmstadt.de/>
- [51] http://www.gsi.de/forschung/bio/biomaat_fair_e.html

José Benlliure*Universidad de Santiago de Compostela***Berta Rubio***Instituto de Física Corpuscular,
CSIC-Universidad de Valencia*

A veces lo +
pequeño
es lo +
grande



Sistemas Informáticos Europeos

El SIE Hydra 2QP es una máquina de cálculo matemático o un nodo de cluster basado en los nuevos procesadores AMD Opteron™ de **cuádruple core**.

Las prestaciones de estos nuevos procesadores son sobresalientes ya que disponen de 512Kb de caché L2 dedicada por núcleo y 2 MB de caché L3 compartida de altas prestaciones.

Sistemas Informáticos Europeos integra una solución de alta densidad incorporando 8 vías y hasta 64 GB de RAM en rack de 1U. El alto rendimiento hace de estas máquinas de **64 bits** idóneas para los entornos de alta disponibilidad donde se necesita un servicio de 24 horas al día sin caída de rendimiento.

SIE crea soluciones de cluster computacional o cálculo científico en entornos de investigación con comunicaciones Gigabit o Myrinet (baja latencia en 2 Gb/s).

La fiabilidad de estas máquinas esta garantizada por 3 años de garantía total así como los 17 años de know how que respaldan a Sistemas Informáticos Europeos.



Sie desde hace 8 años colabora estrechamente con el Instituto de Química Física Rocasolano a través de un acuerdo de I+D. Así mismo patrocina diversos eventos como el 75 aniversario del edificio Rockefeller, la XXXI reunión Bienal de física, etc...

SIE Hydra 2QP con procesador AMD Opteron™ cuádruple core 2350 2,0 Ghz y 16 Gb de RAM.
Disco Duro 250 GB. Configuración completa lista para su uso, preconfigurada con Linux.

SOLO 3.995 € + IVA

SIE HIDRA



SISTEMAS INFORMÁTICOS EUROPEOS

C/Marqués de Mondéjar 29-31
28028 Madrid, España

Tel: (+34) 91 361 08 66 - (+34) 91 361 10 02
Fax: (+34) 91 361 10 87 comercial@sie.es



www.sie.es www.clustersie.com

AMD, el logotipo de AMD, ATI Radeon y todas sus posibles combinaciones, son marcas comerciales de Advanced Micro Devices, Inc. Tux, logotipo de Linux diseñado por Larry Ew. SIE y SIE HIDRA son marcas comerciales de Sistemas Informáticos Europeos S.L. Microsoft es marca comercial registrada de Microsoft Corporation en los Estados Unidos y/o en otros países. El resto de nombres solamente sirven de referencia y pueden ser marcas comerciales de sus compañías respectivas.

