

# FAIR: la futura instalación para la investigación con anti-protones e iones

Andrea Jungclaus

Departamento de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, España

*En el año 2003 el gobierno alemán aprobó el proyecto de una nueva instalación para la investigación con antiprotones e iones (Facility for Antiproton and Ion Research, FAIR). La construcción de esta instalación, que se ubicará en la sede de la actual Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) en Darmstadt, Alemania, comenzará el próximo año y los primeros experimentos tendrán lugar en 2011. En este escrito se introduce la instalación, se discute la investigación que se llevará a cabo en la misma y por último se describe brevemente la involucración de la comunidad científica española en el proyecto.*

## 1. Introducción

El año próximo comenzará la construcción de la nueva instalación internacional para la investigación con antiprotones e iones en la sede de la actual GSI en Darmstadt, Alemania (ver Fig.1). FAIR es una instalación de nueva generación para la investigación básica y aplicada con haces de anti-protones e iones. La meta del proyecto FAIR es ofrecer a la comunidad europea e internacional un sistema de aceleradores técnicamente nuevo, y en muchos aspectos único, para la realización de un amplio programa científico. Este programa científico abarca los siguientes campos: estructura y reacciones de núcleos atómicos muy lejos de la estabilidad; estructura y dinámica de hadrones; transiciones de fase en QCD (Cromodinámica Cuántica) a densidades bariónicas finitas; procesos nucleares en el universo, en particular durante la nucleosíntesis explosiva; la física y transiciones de fase de plasmas densos calientes; estructura y dinámica de iones pesados muy ionizados y QED (Electrodinámica Cuántica) en campos intensos; tests de las simetrías fundamentales en materia y antimateria y el uso de haces de iones y métodos nucleares en otros campos, p.ej., Física del Estado Sólido, Ciencia de Materiales y Biología. Algunos de estos tópicos se discuten en la siguiente sección.

El proyecto FAIR lo propuso el GSI por vez primera en otoño de 2001 cuando se presentó un informe del diseño conceptual 'conceptual design report' (CDR) [1]. En Febrero de 2003 el ministro alemán de Educación y Ciencia aprobó el proyecto con las condiciones de que al menos el 25% del costo del proyecto corriese a cuenta de socios extranjeros y



Figura 1. Foto-montaje de la futura instalación FAIR al este de la sede del GSI.

de que se confeccionase un plan en etapas. Posteriormente el programa científico propuesto en el CDR se concretó via 'Letters of Intent' en 2004 y Propuestas Técnicas en 2005, ambas revisadas por un comité internacional (PAC, 'Programme Advisory Committee'). Más de 2100 científicos han participado en la elaboración de esos documentos y están involucrados en la investigación y el desarrollo de FAIR.

En paralelo a las preparaciones científicas y técnicas se desarrolló una estructura organizadora y financiera con el fin de incluir a socios internacionales. Hasta ahora trece países (Alemania, China, España, Finlandia, Francia, Grecia, India, Inglaterra, Italia, Polonia, Rumanía, Rusia y Suecia) han firmado el Memorando de Acuerdo (MoU, 'Memorandum of Understanding') expresando su intención de participar como miembros fundadores en una organización FAIR supranacional. Este año, en un acuerdo (convención) intergubernamental se definirá la forma organizacional y financiera de FAIR así como la contribución individual (en especie o financiera) de los países miembros al monto de aproximadamente mil millones de Euros de la construcción de FAIR. La construcción, en tres etapas, comenzará el año próximo y la instalación al completo se prevé que esté funcionando en 2014.

## 2. El complejo de aceleradores

La concepción del complejo de aceleradores de FAIR se basó en los cuatro requisitos siguientes:

- Se deberían poder usar haces de toda clase de iones, desde el Hidrógeno hasta el Uranio así como antiprotones, y con un gran rango de energías.
- Las intensidades de los haces primarios deberían ser un factor 100-1000 mayor que las actualmente disponibles. Para los haces secundarios radiactivos el incremento sería incluso un orden de magnitud mayor debido a las grandes aceptancias de los nuevos separadores y anillos de almacenamiento.

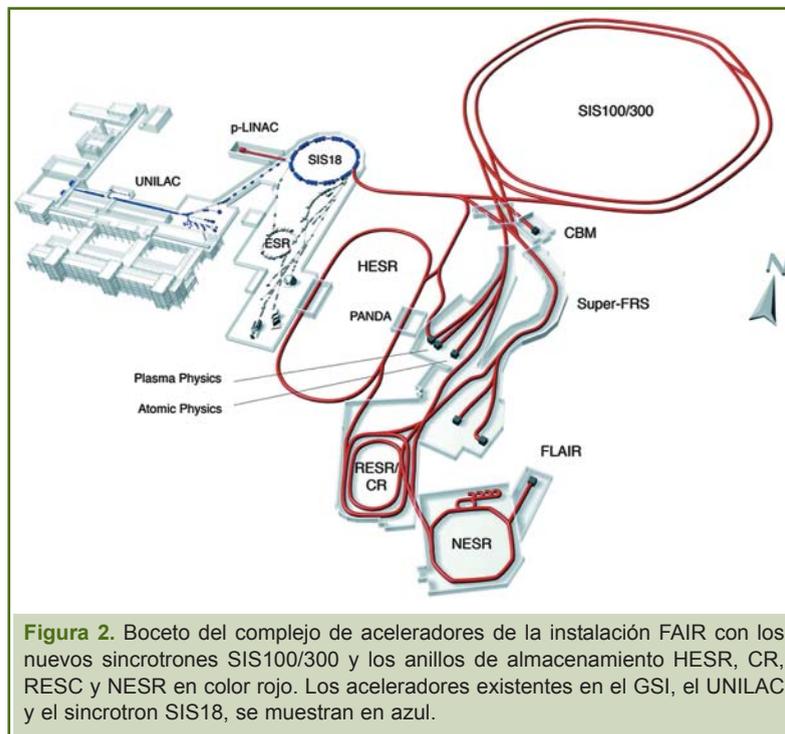
- Las energías deberían ser suficientemente altas para permitir la producción de antiprotones (se necesitan protones de 30 GeV), alcanzar las más altas densidades bariónicas y la producción de encanto en colisiones núcleo-núcleo (Uranio<sup>92+</sup> con 35 GeV/u).
- Mejora en la definición de la energía y de la emitancia de los haces primarios y secundarios en varios órdenes de magnitud.

Para satisfacer estos requerimientos se ha diseñado un sistema de sincrotrones y anillos de almacenamiento como se muestra en la Fig. 2. La parte central del nuevo complejo de aceleradores FAIR son los dos grandes sincrotrones SIS100/300 de aproximadamente 1100 metros de circunferencia. Estos dos sincrotrones, equipados con imanes superconductores, estarán situados uno encima del otro en un túnel subterráneo. El SIS100 es la locomotora básica y acelera hasta  $10^{12}$  iones de Uranio<sup>28+</sup> por pulso para la producción de haces radiactivos y  $2.5 \times 10^{13}$  protones para la producción de antiprotones. Los haces de iones y protones se pueden comprimir en el SIS100 en pulsos cortos de 50-100 ns necesarios para la producción y almacenamiento de núcleos exóticos y haces de antiprotones y la generación de plasmas densos. Además el SIS100 sirve de preacelerador del SIS300 que puede acelerar átomos totalmente ionizados a energías de hasta 35 GeV/u para el Uranio<sup>92+</sup>. La intensidad de estos haces es de  $10^{10}$  iones por llenado y se pueden extraer durante un largo periodo de tiempo de 10-100 segundos como un haz cuasicontinuo. Esto es importante puesto que los sistemas de grandes detectores usados en experimentos de colisión núcleo-núcleo tienen una limitación en la tasa y solo pueden aceptar hasta  $10^8 - 10^9$  partículas por segundo. A continuación de los sincrotrones SIS100/300 se encuentra un complejo sistema de anillos de almacenamiento (el anillo colector CR, el anillo acumulador RESR, el nuevo anillo de almacenamiento experimental NESR y el anillo de almacenamiento de alta energía HESR) que unidos a los blancos de producción y los separadores para el haz de antiprotones y los haces secundarios radiactivos harán que FAIR disponga de la mayor variedad de haces de partículas a nivel mundial. Los aceleradores actualmente existentes en el GSI, UNILAC y SIS18, junto con un nuevo LINAC para protones se usarán como inyectores para los sincrotrones SIS100/300.

Una característica muy importante del nuevo complejo de aceleradores FAIR es que se podrán realizar de forma realmente paralela hasta cinco programas científicos con diferentes requerimientos. Esto es crucial para un uso eficiente y económico de la instalación.

### 3. El programa científico a vista de pájaro

En la actualidad más de 2100 científicos de 44 países se encuentran preparando las actividades experimentales de la futura instalación FAIR. Se han organizado en distintas colaboraciones y han efectuado 18 propuestas técnicas de experimentos en FAIR [2] que han sido evaluadas por un PAC. El programa de Física es muy amplio y variado y por tanto es imposible describir todos los tópicos en este breve artículo. Vamos a presentar por ello una descripción resumida de las distintas actividades de FAIR para a continuación dar una discusión más detallada de alguno de los tópicos, a saber, las investigaciones en estructura nuclear y astrofísica nuclear en núcleos lejos del valle de la estabilidad.



**Figura 2.** Boceto del complejo de aceleradores de la instalación FAIR con los nuevos sincrotrones SIS100/300 y los anillos de almacenamiento HESR, CR, RESR y NESR en color rojo. Los aceleradores existentes en el GSI, el UNILAC y el sincrotron SIS18, se muestran en azul.

#### 3.1. Estructura y dinámica de hadrones: QCD en el régimen no perturbativo

En el experimento PANDA ('antiProton ANnihilation at DArmstadt', aniquilación de antiprotones en Darmstadt) se producirán estados hadrónicos en la aniquilación de antiprotones con protones en el anillo de almacenamiento de alta energía HESR. Los objetivos iniciales del programa experimental son la espectroscopía del charmonio, la espectroscopía de estados con grados de libertad gluónicos ('glue balls', híbridos), la física de hipernúcleos dobles y el estudio de estados con encanto en los núcleos. Estos estudios tratan de descubrir estados que no estén compuestos por dos o tres quarks, lo que incluiría quarks de valencia adicionales o

Física para todos  
Física no mundo

contenido de valencia de 'glue'. Estos estados son una consecuencia importante de la QCD pero hasta la fecha falta una evidencia experimental clara sobre su existencia. Los detalles sobre el programa científico así como sobre el detector de blanco fijo interno de  $4\pi$  multifuncional, desarrollado por la colaboración PANDA, se pueden encontrar en [3].

Una opción adicional en el HESR, que está siendo implementada por la colaboración PAX, son experimentos con antiprotones polarizados almacenados. Su finalidad es la medida directa de la transversalidad del nucleón que es un eslabón que falta en la descripción de la estructura partónica del nucleón en el marco de la QCD a orden principal. El estudio de la estructura del espín transversal requiere la medida de la producción de Drell-Yan en colisiones entre protones polarizados con antiprotones polarizados.

### 3.2. Colisiones núcleo-núcleo a las más altas densidades bariónicas

A nivel mundial se están haciendo grandes esfuerzos para estudiar la materia nuclear en condiciones extremas. Mientras que los experimentos en el 'Relativistic Heavy Ion Collider' (RHIC) del BNL (Brookhaven National Laboratory, EEUU) y en el 'Large Hadron Collider' (LHC) del CERN se centran en la parte de alta temperatura del diagrama de fases, el experimento CBM (Compressed Baryonic Matter) en FAIR se concentra en la investigación de las densidades bariónicas más altas a temperaturas moderadas. La estructura y la ecuación de estado de la materia bariónica, a densidades comparables a las existentes en el interior del corazón de las estrellas de neutrones, se estudiarán en colisiones de iones pesados a energías ultrarelativistas. La finalidad es determinar la dependencia energética de la producción de hadrones y dileptones en colisiones de iones pesados, en el rango de energías  $10 \text{ GeV}/u < E_{\text{lab}} < 45 \text{ GeV}/u$ , por medio de medidas sistemáticas de pruebas de diagnóstico que no se han medido nunca en este rango de energías, tales como la desintegración dileptónica de mesones vectoriales ligeros o hadrones que contengan quarks encantados. La colaboración CBM está preparando la construcción de un sistema de detección universal que permita explotar al máximo el potencial físico de las colisiones núcleo-núcleo en FAIR. Se podrán medir hadrones y leptones simultáneamente con una gran aceptación geométrica y con tasas altas. Una descripción detallada de los experimentos CBM se encuentra en [4].

### 3.3. Física Atómica y Fundamental con iones muy cargados y antiprotones de baja energía

Los intensos y energéticos haces de iones pesados de los que dispondrá FAIR permitirán estudiar átomos en las condiciones existentes en los plasmas estelares: altas temperaturas, átomos altamente ionizados y campos electromagnéticos

intensos. Nótese que el campo eléctrico experimentado por un electrón K de un átomo de Uranio hidrogenoide es de  $1.8 \times 10^{16} \text{ V/cm}$ , más de cuatro órdenes de magnitud mayor que los más intensos campos de láseres disponibles hoy en día. Con el fin de obtener campos fuertes que varíen rápidamente se emplearán iones pesados muy relativistas en numerosos estudios de colisiones atómicas con fotones, electrones y átomos. Las componentes transversales de los campos eléctricos y magnéticos de iones rápidos son del mismo orden de magnitud lo que da lugar a cambios dramáticos en procesos elementales tales como ionización, excitación, captura electrónica y producción de pares electrón-positrón. Los intensos campos de fotones (virtuales) que se crean durante cortos periodos de tiempo ( $10^{-20}\text{s}$ ), debidos a las altas velocidades y grandes cargas, dan lugar a la producción directa de pares electrón-positrón. Una de las metas principales de SPARC (Stored Particle Atomic Physics) [5] es entender la dinámica de las colisiones en campos electromagnéticos fuertes. Otro área de investigación de SPARC es la realización de pruebas de precisión de la Electrodinámica Cuántica (QED) en campos fuertes. Hasta la fecha la QED es la teoría que ha sido confrontada con el experimento con el mayor grado de precisión (factor  $g$  del electrón libre, energía de ligadura de los estados  $1s$  y  $2s$  de los átomos de Hidrógeno y Helio). Sin embargo estos experimentos solo atañen a la QED de campos débiles mientras que la física de la QED con campos fuertes, en la cual nuevos fenómenos son posibles, apenas ha sido comprobada experimentalmente. En el nuevo anillo de almacenamiento NESR será posible medir con gran precisión el desdoble  $2s_{1/2} - 2p_{1/2}$  ( $2s$  Lamb shift) de átomos pesados semejantes al Litio usando diferentes métodos.

La instalación FLAIR (Facility for Low-energy Antiprotons and Ion Research) [6] se dedicará a experimentos con antiprotones fríos. Una suposición del modelo estándar es la existencia de una simetría entre materia y antimateria, esto es una simetría bajo la transformación combinada CPT. Experimentalmente la simetría CPT puede ser comprobada comparando propiedades de materia y antimateria. En FLAIR se producirán haces de antiprotones con intensidades un factor 100 mayores que las que se obtienen en el decelerador de antiprotones (AD) del CERN y a la vez con energías menores, esto es, más favorables. Estos haces se pueden extraer de forma pulsada o continua y permitirán realizar un amplio espectro de nuevos experimentos en Física Atómica, Nuclear y de Partículas.

### 3.4. Física de plasmas muy densos

La mayor fracción de la materia del Universo no existe en forma sólida, líquida o gaseosa sino como plasma: en la parte interior de las estrellas como materia de densidad de energía extremadamente alta y como plasma caliente de

pequeña densidad en las atmósferas estelares o en el espacio interestelar. En la parte interior de planetas gigantes como Júpiter existe un plasma de especial interés que tiene alta densidad de energía pero baja temperatura. En este plasma la energía de interacción coulombiana de los constituyentes cargados es mayor que su energía térmica de tal forma que las propiedades estadísticas y termodinámicas de tal conjunto vienen determinadas por la fuerza coulombiana de largo alcance. El uso de haces intensos de iones pesados para el estudio de esta materia de densidad de energía muy alta tiene un número de ventajas, comparado con el uso de rayos X de un láser de electrones libres o haces de protones generados por láser, ya que se producen muestras de mayores dimensiones (unos mm<sup>3</sup> o incluso cm<sup>3</sup>) con gradientes de temperatura y de densidad mas débiles y mayores vidas medias (0.1 ns). Para este tipo de estudios la colaboración HEDgeHOB (High Energy Density generated by Heavy iOn Beams) [7] está preparando en FAIR una instalación experimental de física de plasmas que comprende PHELIX (Petawatt High Energy Laser for Ion Experiments) y dos estaciones de blancos, HIHEX ('Heavy Ion Heating and EXpansion') y LAPLAS ('LABoratory PLANetary Science').

(Caen, Francia), NSCL (East Lansing, EEUU), RIKEN (Saitama, Japón), ISOLDE (CERN, Suiza) y Louvain-la-Neuve (Bélgica). Se ha encontrado que muchas de las propiedades nucleares, obtenidas a partir de estudios de núcleos en las proximidades del valle de la estabilidad durante varias décadas, cambian conforme nos acercamos a núcleos con un gran exceso de neutrones o de protones, esto es, núcleos próximos a las líneas de goteo. Conforme aumenta el isospín el nivel de Fermi del sistema de nucleones en exceso se aproxima al continuo de tal forma que la correcta y consistente consideración del continuo es crucial para la descripción de los estados débilmente ligados así como de los estados resonantes no ligados. Se ha observado que un gran exceso de protones o neutrones da lugar a nuevos fenómenos lejos de la estabilidad tales como diferentes distribuciones de densidad para protones y neutrones, lo que en núcleos ricos en neutrones produce pieles de neutrones y estructuras de halos. Otra consecuencia de isospín grande es el cambio en la estructura de capas lejos de la estabilidad. Algunos de los números mágicos del modelo de capas, establecidos hace varias décadas, dejan de serlo cuando se incrementa el isospín. La primera manifestación clara de este hecho ha sido el descubrimiento de la isla de inversión alrededor del núcleo deformado <sup>32</sup>Mg, indicando la desaparición del cierre de capa N=20. En el lado deficiente de neutrones la línea de goteo de protones se ha alcanzado hasta masas intermedias. Se ha observado radiactividad de protones y se han identificado los primeros casos de desintegración de dos protones como un nuevo modo de desintegración.

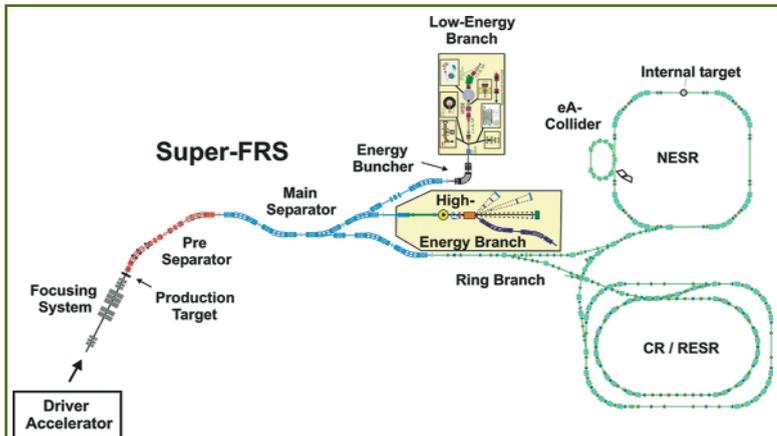


Figura 3. Boceto esquemático del Super-FRS y las tres ramas de la instalación NUSTAR: La rama de alta energía (HEB), la rama de baja energía (LEB) y la rama de anillos (RB).

#### 4. Investigaciones de Estructura Nuclear y Astrofísica Nuclear con núcleos lejos del valle de la estabilidad

Durante los últimos veinte años la imagen del núcleo atómico ha cambiado considerablemente debido a los resultados de numerosos nuevos estudios experimentales de núcleos atómicos exóticos lejos del valle de la estabilidad. Estos experimentos se realizaron en la primera generación de instalaciones con haces radiactivos tales como GSI, GANIL

Para una visión general de los resultados más excitantes de la investigación en estructura nuclear durante las dos últimas décadas se recomienda al lector interesado ver [8]. El estudio de todos estos fenómenos es crucial para el conocimiento de la dependencia en densidad e isospín de la fuerza nuclear así como de los fenómenos de apareamiento y enclaustramiento ('clustering'). El objetivo final de la teoría de la estructura nuclear siendo el conocimiento unificado de las propiedades nucleares a partir de las interacciones fundamentales entre los nucleones. Esto implica una descripción microscópica y consistente de todos los aspectos de las propiedades del estado fundamental y del espectro de excitación así como de las transiciones electromagnéticas y débiles.

El estudio de todos estos fenómenos es crucial para el conocimiento de la dependencia en densidad e isospín de la fuerza nuclear así como de los fenómenos de apareamiento y enclaustramiento ('clustering'). El objetivo final de la teoría de la estructura nuclear siendo el conocimiento unificado de las propiedades nucleares a partir de las interacciones fundamentales entre los nucleones. Esto implica una descripción microscópica y consistente de todos los aspectos de las propiedades del estado fundamental y del espectro de excitación así como de las transiciones electromagnéticas y débiles.

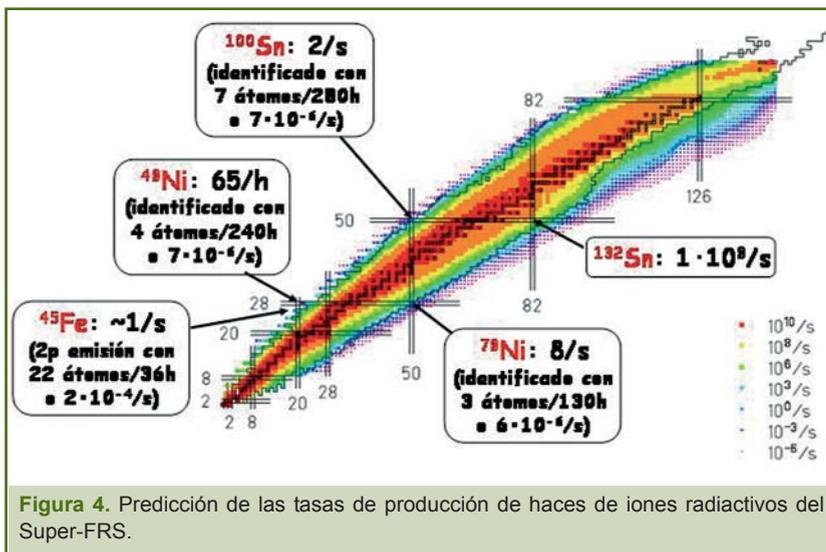
##### 4.1. Producción de haces de iones radiactivos en el Super-FRS

De todos los proyectos de haces de iones radiactivos (RIB, 'Radioactive Ion Beam') de nueva generación, la instalación del proyecto FAIR es la primera que ha sido aprobada y

Física para todos  
Física no mundo

ofrecerá posibilidades únicas para el estudio de núcleos muy exóticos. En EEUU y Japón proyectos similares se encuentran actualmente en fase de discusión. Mediante la fragmentación de un haz primario de iones o a través de la fisión de un haz de  $^{238}\text{U}$  a energías de hasta 1.5 GeV por nucleón se producirán iones radiactivos de vida corta que serán separados en vuelo en el nuevo separador de fragmentos de retroceso superconductor (Super-FRS, ver Fig. 3) [9].

Las altas intensidades del haz primario que se pueden obtener de los sincrotrones en FAIR y la gran aceptación en el espacio de fases del Super-FRS da lugar a intensidades de los haces secundarios tres a cinco órdenes de magnitud mayores que las que se obtienen en las instalaciones existentes. En la Fig. 4 se presenta un resumen de las tasas de producción predichas (para núcleos con vidas medias mayores que 100 ns) en la instalación de haces radiactivos de FAIR. Puesto que el proceso de producción (fragmentación o fisión) es químicamente no selectivo y los tiempos de transporte cortos, se pueden estudiar isótopos a lo largo y ancho de la Tabla de Nuclidos, incluso con vidas medias muy cortas. Se podrá disponer de haces secundarios muy puros, con un amplio rango de energías y con estructura temporal flexible que podrán ser transportados a las diferentes áreas de experimentación en la rama de alta (HEB) y de baja energía (LEB) o inyectados en los anillos de almacenamiento (comparar con Fig. 3). Mientras que en la HEB los haces de iones radiactivos se usan como vienen del Super-FRS con su energía total de típicamente 0.5-1.0 GeV/u, en la LEB se deceleran, en un 'buncher' de energía, a energías entre unos pocos MeV/u y aproximadamente 100 MeV/u.



La colaboración NUSTAR (NUclear STructure, Astrophysics and Reactions) [10], con aproximadamente 600 miembros la mayor de todas las colaboraciones experimentales de

FAIR, está preparando un amplio rango de distintos montajes experimentales para optimizar el uso de los haces radiactivos secundarios separados por el Super-FRS. Como se muestra en la Fig. 4 las secciones eficaces de producción abarcan muchos órdenes de magnitud y consecuentemente se pueden aplicar una gran variedad de técnicas experimentales para obtener la máxima información posible de cada isótopo.

#### 4.2. Técnicas experimentales en la instalación NUSTAR

##### Identificación, propiedades del estado fundamental y su desintegración y masas atómicas

La primera cuestión importante concerniente a isótopos muy exóticos, hasta ahora desconocidos, es sobre su existencia, o en otras palabras si están ligados. La observación o no observación de un nuevo isótopo provee información directa e importante sobre la posición exacta de la línea de goteo. En estos experimentos unas tasas de producción tan bajas como unos  $10^{-6}$  iones/s son suficientes (como se ha demostrado en los experimentos donde, por vez primera, se han identificado los núcleos doblemente mágicos  $^{48}\text{Ni}$ ,  $^{78}\text{Ni}$  y  $^{100}\text{Sn}$ ), ver Fig. 4. Los núcleos exóticos son identificados ion a ion mediante A y Z durante su paso a través del separador midiendo la rigidez magnética, su pérdida de energía y el tiempo de vuelo. En FAIR se podrá determinar la línea de goteo de neutrones, que en la actualidad solo se conoce hasta Z=12, hasta la región de masa intermedia.

Una vez identificado un nuevo isótopo el siguiente paso, posible para tasas de producción  $>10^{-3}$  iones/s, es el estudio de sus propiedades de desintegración. Con este fin la colaboración DESPEC (DEcay SPECtroscopy of stopped beams) [11] está desarrollando en la rama de baja energía un montaje flexible y modular. Una vez frenados los haces de iones radiactivos a energías de unas decenas de MeV/u se implantarán en un detector de Si muy segmentado. La señal de la implantación pudiendo ser correlacionada espacial y temporalmente con desintegraciones posteriores, por ejemplo de desintegración beta. El detector de implantación estará envuelto por un versátil montaje de detectores de rayos gamma y neutrones con el fin de poder estudiar los diferentes modos de desintegración, tanto por el lado rico en neutrones como por el rico en protones. Entre esos modos podemos destacar la desintegración isomérica, la desintegración beta, la desintegración protónica o la emisión de neutrones retardada beta, así como desintegraciones más exóticas tales como desintegraciones de dos protones o dos neutrones o

fisión retardada beta. Un claro ejemplo que ilustra lo que podemos esperar de FAIR para estudios de desintegraciones es el siguiente: El primer caso de radiactividad de dos protones, un nuevo modo de desintegración ya predicho en 1960, se descubrió hace cuatro años en el GSI y GANIL, en paralelo, en el núcleo  $^{45}\text{Fe}$  en experimentos con tasas de producción de aproximadamente  $0.2 \times 10^{-3}$  iones/s. En FAIR se producirá  $^{45}\text{Fe}$  a un nivel de 1 ion/s lo que permitirá estudios muy detallados como, por ejemplo, de las correlaciones angulares. De esta forma será posible responder a la cuestión crucial de si se trata de una desintegración a tres cuerpos o si procede via un estado intermedio  $^2\text{He}$  que posteriormente se desintegra en dos protones (para detalles ver [8] y las publicaciones que en ella se citan).

Una de las magnitudes más fundamentales para entender la materia nuclear y la formación de elementos en las estrellas es la masa atómica. Las medidas de masas de núcleos exóticos hasta los límites de la estabilidad nuclear es indispensable para comprobar el poder predictivo de los modelos nucleares en zonas desconocidas de la tabla de nuclidos, así como para entender los procesos de nucleosíntesis y los correspondientes abundancias isotópicas. Además las masas proveen información muy valiosa para varios aspectos de estructura nuclear como los cierres de capas y la aparición de la deformación nuclear. El método más preciso y versátil para determinar masas de núcleos exóticos es medir el movimiento repetitivo de iones almacenados en ordenamientos especiales de campos electromagnéticos. Actualmente solo en el GSI existe una instalación para acumular núcleos exóticos en un anillo de almacenamiento y enfriamiento (FRS-ERS). La colaboración ILIMA (estudio de Isomeric beams, Lifetimes and MAsses) [12] mejorará e implementará este concepto en la rama de anillos del Super-FRS de FAIR (ver Fig. 5). Aquí, un sistema de varios anillos

de almacenamiento, consistente en un anillo colector CR, un anillo acumulador RESR (re-used ESR) y un nuevo anillo de almacenamiento experimental NESR, ofrecerá una acumulación eficiente de haces secundarios. El enfriamiento (cooling) mediante electrones junto con el pre-enfriamiento estocástico darán lugar a una alta calidad de haz (emitancia y dispersión de momento) en tiempos de refrigeración muy cortos, por debajo de un segundo. Para llevar a cabo en FAIR medidas precisas de masas de núcleos exóticos almacenados se utilizarán dos métodos desarrollados en el GSI: La espectroscopía de masas Schottky (SMS) para haces enfriados de isótopos de vida más larga ( $>1\text{s}$ ) en el NESR, y la espectroscopía isócrona de masas (IMS) directamente en el CR para fragmentos que tienen una vida demasiado corta como para permitir el enfriamiento ( $1\text{s} > T_{1/2} > 10^{-5}\text{s}$ ). Los poderes de resolución que se pueden obtener con ambos métodos son  $7.5 \times 10^5$  para SMS y  $1.5 \times 10^5$  para IMS y ambos métodos han alcanzado el más alto grado de sensibilidad con sólo un ión almacenado. Además de las medidas de masas el uso de anillos de almacenamiento y enfriamiento provee una técnica experimental nueva para acceder en el laboratorio a vidas medias de iones desnudos o con pocos electrones, esto es, bajo las condiciones que prevalecen en entornos estelares calientes. En la colaboración MATS [13] en el LEB se utiliza un método alternativo complementario para la medida de masas. Aquí los iones radiactivos muy cargados procedentes del Super-FRS se paran y extraen de un 'catcher' gaseoso para ser transferidos a un sistema de trampas de iones para medir las masas con imprecisiones del orden de  $10^{-8}$ . La colaboración MATS proporcionará los puntos de calibración necesarios para el programa global de determinación de masas que se realizará en ILIMA y además su precisión, del más alto grado, permitirá contrastar el Modelo Estándar a los más altos niveles de precisión.

A partir de tasas de producción de aproximadamente 100 iones/s se pueden llevar a cabo medidas de otras propiedades de los estados fundamentales y de los isoméricos. En el experimento LASPEC (LAsER Spectroscopy de núcleos de vida corta) [14], los isótopos de corta vida en sus estados fundamentales o estados isoméricos extraídos de la celda de gas en el LEB se estudiarán usando espectroscopía láser 'on-line' basada en desdoblamiento de estructura hiperfina y desplazamiento isotópico. Propiedades tales como el espín del núcleo, el momento magnético, el momento cuadrupolar espectroscópico y los radios cuadráticos medios de carga pueden ser determinados utilizando distintas técnicas. Mientras que las tres primeras son fundamentales para comprobar cualquier modelo o teoría de estructura nuclear la última es crucial para estudiar el fenómeno de la piel de neutrones en núcleos ricos en neutrones (ver más abajo).

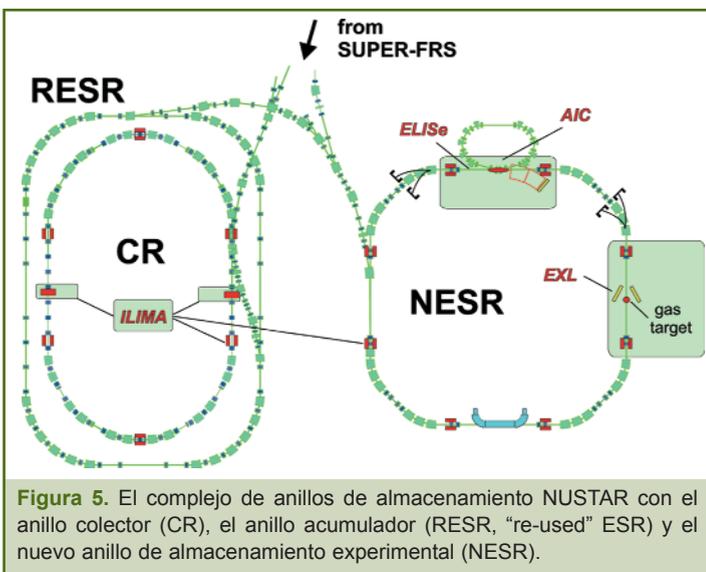


Figura 5. El complejo de anillos de almacenamiento NUSTAR con el anillo colector (CR), el anillo acumulador (RESR, "re-used" ESR) y el nuevo anillo de almacenamiento experimental (NESR).

*Reacciones con haces de iones radiactivos*

Hasta ahora hemos discutido como se estudiarán, en la instalación NUSTAR de FAIR, propiedades del estado fundamental y de desintegración de los isótopos radiactivos exóticos producidos en reacciones de fragmentación o fisión del proyectil y separados e identificados en el Super-FRS. El siguiente paso para comprender más propiedades de los núcleos es la investigación de estados excitados poblados en reacciones nucleares. Durante las últimas décadas se ha empleado una gran variedad de tipos de reacciones, usando haces de iones estables, para estudiar con gran detalle numerosos grados de libertad nucleares. Entre estos destacan la energía de excitación, el momento angular, la temperatura y la frecuencia angular (ver [8] y las publicaciones que en ella se citan). La elevada intensidad de los haces de iones radiactivos de la que se dispondrá en FAIR permitirá estudiar reacciones usando estos haces a alta y baja energía así como iones almacenados en el sistema de anillos.

En la rama de alta energía (HEB) se obtienen haces de iones radiactivos de típicamente 0.5-1.0 GeV/u. A estas energías se pueden usar blancos muy gruesos y por eso es posible estudiar reacciones con una tasa de producción en el rango de  $1 - 10^4$  iones/s. La colaboración R<sup>3</sup>B (Reactions with Relativistic Radioactive Beams) [15] está preparando un montaje muy versátil para reacciones con una eficiencia, aceptación y resolución sin precedentes, para efectuar medidas cinemáticamente completas de reacciones con haces de iones radiactivos relativistas. Este montaje, que es una mejora del actual LAND del GSI, incluye la detección de fragmentos pesados, neutrones, partículas cargadas ligeras así como rayos gamma emitidos por fragmentos excitados semejantes al proyectil (ver Fig. 6). Es adecuado para realizar una gran variedad de experimentos, tales como reacciones de 'knock-out' y ruptura ('breakup'), excitaciones electromagnéticas, dispersión (in)elástica de iones ligeros y dispersión cuasi-libre en cinemática inversa así como medidas de absorción total, permitiendo así extraer información espectroscópica detallada. Reacciones de knockout, por ejemplo, se han usado para comprobar la función de onda del nucleón del halo en núcleos ligeros como el  $^{11}\text{Li}$  y jugarán un papel determinante en el estudio de las estructuras de halo. La primera evidencia de pieles de neutrones en la cadena isotópica del Na se obtuvo midiendo las secciones eficaces de interacción de isótopos de Na a 950 MeV/u sobre un blanco de carbón en un experimento de absorción total, combinado con radios de carga cuadráticos medios obtenidos a partir de medidas de desplazamientos isotópicos

(ver la anterior discusión de LASPEC). Este tipo de experimentos solo ha podido ser realizado hasta ahora con núcleos ligeros debido a las limitaciones de la intensidad del haz. Las intensidades que se obtendrán en la instalación RIB de FAIR abren la puerta al estudio de núcleos pesados ricos en neutrones. La alta sensibilidad de las reacciones de knockout, junto con la alta eficiencia de detección, hacen posible que haces secundarios del orden del átomo por segundo sean suficientes para extraer información espectroscópica detallada, lo que permite estudios de estructura nuclear incluso muy lejos de la estabilidad.

En los estudios de reacciones con haces de iones radiactivos de vida corta a energías intermedias (3 – 100 MeV/u), que se obtienen del 'buncher' de energía del LEB, hay que usar blancos delgados. Por esta razón estos estudios, que están siendo preparados por la colaboración HISPEC (High resolution In-flight SPECTroscopy) [11], solo son posibles con tasas de producción por encima de aproximadamente  $10^5$  iones/s. La excitación coulombiana, la fragmentación multiproceso y las reacciones directas o de fusión-evaporación de haces de iones radiactivos sobre blancos secundarios es un campo relativamente nuevo y se encuentra en desarrollo en RIKEN, MSU, GANIL y GSI. Se requiere la identificación suceso a suceso de la carga y masa así como el seguimiento

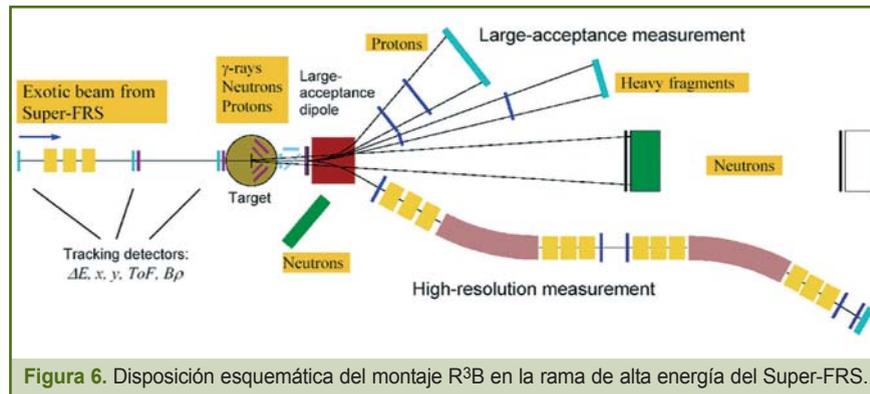


Figura 6. Disposición esquemática del montaje R<sup>3</sup>B en la rama de alta energía del Super-FRS.

de cada partícula del haz entrante y la identificación de la partícula saliente más allá del blanco secundario. Puesto que los rayos gamma emitidos por los núcleos que se mueven rápidamente están muy desplazados Doppler, para realizar espectroscopía de rayos gamma de alta resolución, se requieren detectores de Ge segmentados. Para ello una colaboración europea ha propuesto el detector de  $4\pi$  AGATA (Advanced Gamma-ray Tracking Array) [16] con posibilidades de seguimiento y con una eficiencia sin precedentes. Para asegurar el máximo rendimiento de este instrumento tan caro (coste total 50 millones de Euros) que entrará en funcionamiento en 2011, se usará en diversas instalaciones europeas de haces estables y radiactivos, por ejemplo FAIR,

junto con una variedad de detectores auxiliares para la selección del canal de reacción.

Para haces de iones producidos con el mismo nivel de intensidad ( $> 10^5$  iones/s), la alta luminosidad disponible en el NESR en la rama de anillos del Super-FRS permitirá, por vez primera, la realización de experimentos de reacciones en el anillo ('in-ring reactions'). Las reacciones más relevantes a realizar son la dispersión elástica e inelástica, reacciones de intercambio de carga o dispersión cuasi-libre en cinemática inversa a energías alrededor de cientos de MeV/u. La colaboración EXL (núcleos EXóticos estudiados en reacciones de iones Ligeros en el anillo de almacenamiento NESR) [17] está desarrollando blancos internos de chorros de gas de alta densidad de Hidrógeno y Helio y un sistema de detección universal de alta resolución y gran ángulo sólido en medidas cinemáticamente completas. En estos experimentos se pueden determinar cantidades importantes como distribuciones de densidad de masa precisas, funciones espectrales monoparticulares, correlaciones de enclaustramiento y respuestas multipolares eléctricas y magnéticas.

Estudios de núcleos radiactivos con una prueba puramente electromagnética se realizarán en la colaboración ELISe (Electron-Ion Scattering in storage ring) [18] en el NESR usando anillos de almacenamiento de iones y electrones entrecruzados. Información sobre los radios de carga nuclear y los momentos más altos de las distribuciones de densidad de carga así como los estados colectivos superficiales y las resonancias eléctricas gigantes se puede deducir de la dispersión elástica e inelástica de electrones. En el experimento ELISe la dispersión de electrones, tan decisiva hace muchos años para establecer propiedades nucleares básicas, se aplicará por vez primera a una gran variedad de núcleos radiactivos. Una opción adicional consiste en usar el anillo de electrones para almacenar antiprotones enfriados y decelerados y usar colisiones ion-antiprotón para medir simultáneamente las distribuciones de densidad de protones y neutrones de núcleos exóticos con alta precisión (colaboración pbarA).

## 5. La participación española en el proyecto FAIR

Desde los albores del proyecto FAIR un gran número de científicos españoles ha participado en las discusiones y preparaciones de este proyecto. Aunque algunos grupos españoles participan en las colaboraciones PANDA (Universidad de Valencia), CBM (Universidad de Santiago de Compostela), SPARC (CSIC Barcelona) y HEDGeHOB (Universidad de Castilla La Mancha y Universidad de Valencia), el mayor número de científicos españoles, con gran diferencia, participan en la colaboración NUSTAR (UPC Barcelona,

Universidad de Granada, Universidad de Huelva, CSIC Madrid, CIEMAT Madrid, Universidad Autónoma de Madrid, Universidad Complutense de Madrid, Universidad de Salamanca, Universidad de Santiago de Compostela, Universidad de Sevilla e IFIC Valencia). Para la comunidad de Física Nuclear española FAIR ofrece una oportunidad única y excepcional para participar por vez primera y desde el principio en un gran proyecto internacional en igualdad de derechos con los otros miembros de la colaboración. Este aspecto es todavía más relevante si se considera que los físicos nucleares españoles no disponen de ninguna infraestructura para realizar su investigación en España.

Además de la participación científica en la preparación del programa experimental en la futura instalación FAIR la comunidad científica española colabora también en todos los comités científicos y administrativos de FAIR tales como el 'International Steering Committee', el Grupo de Trabajo de Asuntos Administrativos y Financieros, el Grupo de Trabajo de Asuntos Técnicos y Científicos, el 'Physics Advisory Committees' y las distintas comisiones de colaboración.

## Agradecimientos

La autora agradece la financiación de su investigación al programa Ramón y Cajal y a la DGI, Ministerio de Ciencia y Tecnología, mediante el proyecto FPA2005-00696.

## Referencias

- [1] FAIR Conceptual Design Report, <http://www.gsi.de/GSI-Future/cdr>.
- [2] Todas las Letters of Intent y Technical Proposals pueden encontrarse en la página web. [http://www.gsi.de/fair/reports/index\\_e.html](http://www.gsi.de/fair/reports/index_e.html); para información más general sobre FAIR: [http://www.gsi.de/fair/index\\_e.html](http://www.gsi.de/fair/index_e.html).
- [3] <http://www-panda.gsi.de>.
- [4] [http://www.gsi.de/fair/experiments/CBM/index\\_e.html](http://www.gsi.de/fair/experiments/CBM/index_e.html).
- [5] [http://www.gsi.de/fair/experiments/sparc/index\\_e.html](http://www.gsi.de/fair/experiments/sparc/index_e.html).
- [6] [http://www.gsi.de/fair/experiments/flair/index\\_e.html](http://www.gsi.de/fair/experiments/flair/index_e.html).
- [7] [http://www.gsi.de/forschung/pp/TP-2005\\_e.pdf](http://www.gsi.de/forschung/pp/TP-2005_e.pdf).
- [8] Andrea Jungclaus y J. Luis Egido, "Avances recientes en Estructura Nuclear", *Revista Española de Física* vol. 17, 2003, 55.
- [9] [http://www.gsi.de/fair/experiments/superfrs/index\\_e.html](http://www.gsi.de/fair/experiments/superfrs/index_e.html).
- [10] <http://www.gsi.de/forschung/kp/kp2/nustar.html>.
- [11] [http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech\\_report/09-hispec\\_despec.pdf](http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech_report/09-hispec_despec.pdf).
- [12] [http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech\\_report/06-ilima.pdf](http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech_report/06-ilima.pdf).
- [13] [http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech\\_report/11-mats.pdf](http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech_report/11-mats.pdf).
- [14] [http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech\\_report/10-laspec.pdf](http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech_report/10-laspec.pdf).
- [15] [http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech\\_report/13-r3b.pdf](http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech_report/13-r3b.pdf).
- [16] <http://www.agata.org> y <http://www-w2k.gsi.de/agata/>
- [17] [http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech\\_report/05-exl.pdf](http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech_report/05-exl.pdf).
- [18] [http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech\\_report/04-elise.pdf](http://www-linux.gsi.de/~wwwnusta/tech_report/04-elise.pdf).