LSC

Laboratorio Subterráneo de Canfranc

MEMORIA ANUAL | 2013

EDICIÓN

Alessandro Bettini

Yolanda Labarta

FOTO DE PORTADA

Pedro Pegenaute

Gracias a todos los que han contribuido a la realización de este proyecto editorial

LSC

Laboratorio Subterráneo de Canfranc

Paseo de los Ayerbe s/n

Canfranc Estación

22880 (Huesca)

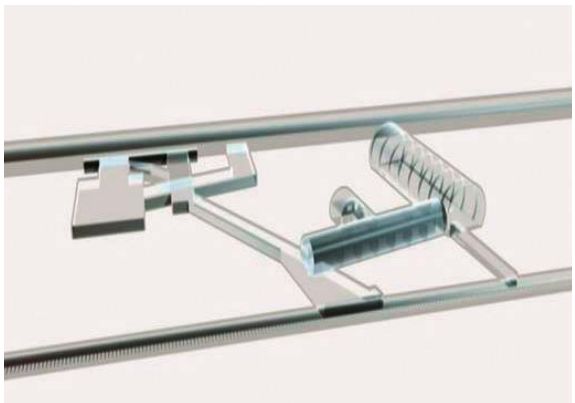
ESPAÑA

http://www.lsc-canfranc.es

Tel: +34 974 373474

ÍNDICE

PRESENTACIÓN DEL DIRECTOR 3
1. INTRODUCCIÓN 5
2. UN POCO DE HISTORIA 6
3. EN LA ACTUALIDAD 8
4. INFRAESTRUCTURAS 11
5. CARACTERÍSTICAS 15
6. LA CIENCIA 19
NEUTRINOS 19
MATERÍA OSCURA 20
GEOLOGÍA 22
HIDROLOGÍA 22
BIOLOGÍA 22
7. ANAIS 23
8. ARDM 26
9. ROSEBUD 29
10. NEXT 31
11. BIPO 34
12. SUPERKGD 36
13. GEODYN 37
14. CUNA 42
15. SOBRE EL LSC 45
PUBLICACIONES EN PRENSA 45
ÓRGANOS DE GOBIERNO 47
COMITÉS ASESORES 47



PRESENTACIÓN DEL DIRECTOR

El Laboratorio Subterráneo de Canfranc es el segundo laboratorio subterráneo a gran profundidad más grande de Europa. Lo gestiona un Consorcio compuesto por el Ministerio de Economía y Competitividad, el Gobierno de Aragón y la Universidad de Zaragoza.

Ofrece instalaciones subterráneas, aisladas de la radiación cósmica natural, a investigadores de todo el mundo en materia de física fundamental y astrofísica así cómo ubicaciones de características únicas para geología, biología y ciencias medioambientales.

En este momento seis infraestructuras experimentales, propuestas por grupos de investigadores procedentes de universidades y laboratorios internacionales, se encuentran ya en funcionamiento o bajo construcción aunque todavía hay disponible espacio subterráneo para ubicar nuevas propuestas. Además, se está estudiando un proyecto de ampliación para albergar una instalación de astrofísica.

Laboratorios, oficinas y salas de reuniones se encuentran también disponibles en el edificio sede en el exterior. El LSC también ofrece los siguientes servicios para los usuarios:

- Medidas de Radiopureza de Materiales con detectores de Germanio de alta pureza (RMS).
- Servicio de Fabricación de piezas de cobre de gran radiopureza utilizando técnicas de electroformación (CES).
- Sala blanca subterránea clase 1.000 (ISO 6) y clase 10.000 (ISO 7) (CRS).
- Auditorio para reuniones institucionales con capacidad para 98 personas.

Acogemos gustosamente tanto nuevas propuestas científicas, que pueden ser ubicadas en el espacio subterráneo que tenemos todavía disponible, cómo peticiones para los servicios. No existe ninguna fecha límite establecida para ello, simplemente remítanse a nuestra web o llámenos por teléfono. El Comité Científico Internacional del LSC estudiará las propuestas científicas, aconsejando a la dirección, basándose únicamente en la excelencia científica, mientras que el Comité de Acceso procesará las peticiones para los servicios.

Esta Memoria describe las infraestructuras, ciencia y actividad experimental de los usuarios externos del LSC hasta el 2013 para no-especializados. Está basada en los informes anuales presentados por cada experimento, que han sido editados por el LSC. *Cualquier dato inexacto introducido en la edición es responsabilidad del LSC.*

Prof. Alessandro Bettini

Canfranc Estación, 31.1.2014

1 INTRODUCCIÓN

Los físicos han desarrollado una descripción teórica sobre las partículas elementales de la materia y las fuerzas de la naturaleza denominada modelo estándar. Se ha probado con creciente precisión todas sus predicciones en las energías que son alcanzables con los aceleradores. Un elemento fundamental que faltaba, el bosón be Higgs, fue descubierto en el CERN en el 2012, cuando el nuevo acelerador de partículas (LHC) alcanzó la energía necesaria para producirlo. Actualmente, se está trabajando para doblar la energía del LHC para explorar así los fenómenos que se puedan producir a esa escala. Pero ya sabemos que esto no será suficiente. Laboratorios subterráneos como el LSC, proporcionan información científica que es complementaria a la que se obtiene con aceleradores, como el del CERN. De hecho, los primeros elementos de la física más allá del modelo estándar se obtuvieron mediante experimentos subterráneos.

El Universo se originó hace unos 14 000 millones de años a raíz de una enorme explosión, el Big Bang. La energía correspondiente, en la escala de energía Planck, es de quince órdenes de magnitud, esto es un uno seguido de quince ceros, mayor que la energía del LHC. Además, sabemos que las distintas fuerzas de la Naturaleza parecen igualarse, o unificarse como solemos decir, a energías que son solo cien veces menores que las de la escala Planck. Nunca podremos alcanzarlas con un acelerador y necesitamos encontrar otra manera. De hecho, los fenómenos que se caracterizan por una alta escala de energía ocurren de manera natural hasta en las energías más bajas del día a día. Pero cuanta más alta es su energía intrínseca más inusual es que sucedan.

Los laboratorios subterráneos, y el LSC en particular, se dedican a la búsqueda de estos fenómenos, nucleares y sub-nucleares, naturales pero extremadamente inusuales. Dicha búsqueda necesita de un ambiente de muy bajo fondo radioactivo. Usando una analogía, todos hemos observado asombrados y con admiración la población innumerable de estrellas en el oscuro firmamento de la noche. Pero no vemos estas estrellas durante el día, aunque sigan brillando. La luz de las estrellas es mucho más débil que la luz del sol. Para poder ver la débil señal luminosa de una estrella necesitamos oscuridad, la ausencia del fuerte "fondo" de la luz del sol. Igualmente, no podemos oír el canto de un grillo con el ruido de una autopista, necesitamos silencio. No podemos detectar las señales de una desintegración nuclear que es muy inusual en presencia de un alto fondo de radioactividad natural. Este ruido de fondo es debido a los rayos cósmicos al incidir sobre la superficie de la Tierra y a la desintegración de los núcleos radioactivos presentes, en trazas, en todos los materiales. Bajo tierra, concretamente bajo el Monte Tobazo, el flujo de rayos cósmicos se reduce en un factor de cien mil.

Otros sectores científicos pueden beneficiarse también de la localización única de las infraestructuras subterráneas. La geodinámica tiene la posibilidad de medir los cambios extremadamente pequeños que se producen en la tensión de la roca, en lo más profundo de la montaña, tanto los debidos al paso de la Luna y a minúsculas aceleraciones y velocidades en la profundidad, como a los debidos a eventos sísmicos muy pequeños. Bajo tierra, los experimentos están protegidos del "ruido" que produce la actividad humana y los fenómenos atmosféricos presentes en la superficie. Los biólogos pueden buscar un tipo de microorganismo muy peculiar que vive dentro de la roca.

2 UN POCO DE HISTORIA

Canfranc es una localidad situada en el Pirineo Central, a 1195 metros de altitud en valle del Alto Aragón y a unos pocos kilómetros de Francia, conectado a ésta por el puerto de Somport. Este último y el propio Canfranc forman parte del Camino de Santiago.

Debido a su posición, estratégica para la conexión entre España y Francia, se llevó a cabo una importante obra civil durante la primera década del 1900 para construir una línea de tren entre los dos países. En Canfranc Estación se realizaron grandes trabajos civiles y de deforestación para albergar una enorme Estación Internacional (Fig. 2.1); se excavó un túnel que conecta con el lado francés de 7875 m de longitud, 4.75 m de ancho y 6 m de alto. El rey de España, Alfonso XIII y el presidente de la República francesa, inauguraron la estación en Julio de 1928 entre dos guerras mundiales. La operatividad del tren cesó en Marzo de 1970 cuando un accidente destruyó un puente en el lado francés que nunca fue reparado.

En 1985 A. Morales y el Grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la Universidad de Zaragoza, comenzaron un proyecto para la explotación del espacio subterráneo, en el túnel ferroviario abandonado, para albergar posibles experimentos de bajo fondo protegiéndolos así de la radiación cósmica. Su primera infraestructura se muestra en la Fig. 2.2. Consistía en un coche, al cual se le habían modificado las ruedas de forma que fuera posible moverlo por las vías, y un remolque que contenía los detectores de radiación y la instrumentación necesaria para caracterizar el túnel en toda su extensión.

El primer laboratorio fue ubicado en un par de cavidades existentes a ambos lados del túnel ferroviario a 780 m de la entrada española. Am-

Fig. 2.1. La Estación de Canfranc

bas localizaciones han sido ahora renovadas e integradas al nuevo LSC y se les denomina Lab 780 L y Lab 780 R. Cada uno de ellos consiste en una pequeña sala (12 m^2) que conduce, a través de escaleras opuestas, a dos túneles paralelos al principal, de unos 70 m. de longitud total.

A principios de los 90 los gobiernos español y francés decidieron escavar un túnel carretero en paralelo al existente y abandonado túnel ferroviario. Éste último se convirtió así en una vía de evacuación conectando a ambos túneles mediante una serie de galerías.

En 1994, aprovechando estas obras, se excavó un nuevo hall experimental, 118 m^2 a 2520 m de la entrada española. Dicho hall albergó en los años sucesivos un número de experimentos de materia oscura y física de neutrinos. A lo largo de estos años más de 50 científicos pertenecientes a 12 instituciones de 8 países distintos han participado en el Programa Científico del LSC. Dicho hall ha sido también integrado al nuevo LSC, tras trabajos de remodelación. Se le denomina Lab 2500.

La acción de A. Morales fue más allá. Con la fuerza del éxito de dos décadas de investigación y su gran determinación, convenció a las autoridades españolas para construir entre los dos túneles un nuevo laboratorio de mayor envergadura respetando plenamente las normas internacionales y con todos los servicios subterráneos necesarios. Tiene una profundidad de 850 m bajo el Monte Tobazo. Ésta instalación, ahora denominada Lab 2400, se completó en 2006. Sin embargo, un año más tarde comenzaron a aparecer señales de inestabilidad en la roca y el laboratorio fue cerrado. La Universidad de Zaragoza realizó una revisión completa del proyecto original y se procedió a la instalación de las estructuras para la sujeción de la roca necesarias para garantizar la seguridad tanto del personal como de las instalaciones.

Fig. 2.2. La primera infraestructura de la Universidad de Zaragoza en Canfranc

Figs. 2.3. Trabajos de excavación

3 EN LA ACTUALIDAD

El LSC lo gestiona un Consorcio compuesto por el Ministerio de Economía y Competitividad, el Gobierno de Aragón y la Universidad de Zaragoza.

El personal no es numeroso, 12 personas, que cubren los servicios esenciales de administración y secretaría, seguridad, prevención e instalaciones, servicios de bajo fondo, servicios de química y sala blanca y servicios de mecánica, electricidad, informática y de apoyo a los físicos.

El protocolo de acceso acordado con el Túnel de Somport (Ministerio de Fomento) regula el acceso al LSC por el túnel carretero, el cual está conectado al laboratorio mediante un bypass con una entrada específicamente dedicada al mismo que conduce a la galería 12, y la salida a través del túnel ferroviario. Ambas maniobras son comunicadas vía emisora al centro de control de túnel.

Los "experimentos" en un laboratorio subterráneo son complejos y con estructuras de grandes dimensiones, que son diseñadas y construidas por "Colaboraciones" de científicos, todas ellas externas en el caso del LSC, pertenecientes a Universidades y centros de investigación. Normalmente, son necesarios varios años de I+D, seguidos de unos cuantos años para su construcción y finalmente bastantes años más para la toma de datos.

Un Comité Científico internacional formado por nueve científicos de renombre, que se reúnen dos veces al año, ayuda en la gestión y valoración de las propuestas y a la monitorización y el desarrollo de los experimentos. Los siguientes experimentos han sido aprobados hasta la fecha: ANAIS, ArDM y ROSEBUD en materia oscura, NEXT en física de neutrinos y GEODYN en geodinámica. Hay otros dos proyectos que son auxiliares de experimentos en otros laboratorios: BiPo para la propuesta SuperNEMO en el laboratorio de Modane en Francia y SUPERKGd para el experimento SuperKamiokande en Japón. Además, se está debatiendo la propuesta de CUNA para una instalación subterránea de astrofísica nuclear.

El número total de usuarios en el 2013 ha sido de 281, de 20 países distintos.

El LSC se gestiona en la actualidad puramente como un Servicio para usuarios externos. Como tal a fecha de hoy, y a diferencia de otras instituciones científicas similares, no tiene un personal científico interno ni un programa de becas de doctorado o post-doctorado. Sin embargo, varios estudiantes de doctorado que pertenecen a los grupos de usuarios trabajan en sus experimentos tanto en sus propias instalaciones como en el LSC. Seis de ellos han conseguido su título de doctorado en el 2013.

En el LSC se organizan diversos Talleres y Conferencias. Durante el 2013 el LSC organizó o albergó los siguientes:

- la Reunión Internacional de la colaboración de NEXT
- las terceras "Jornadas de Gerentes de ICTSs"
- la reunión anual del Grupo de Cristales Líquidos y Polímeros de la Universidad de Zaragoza
- la escuela sobre "Física de Neutrinos y Astrofísica", uno de los Cursos Europeos de Doctorado de la "ISAPP" (Escuela Internacional en Física de Astropartículas)

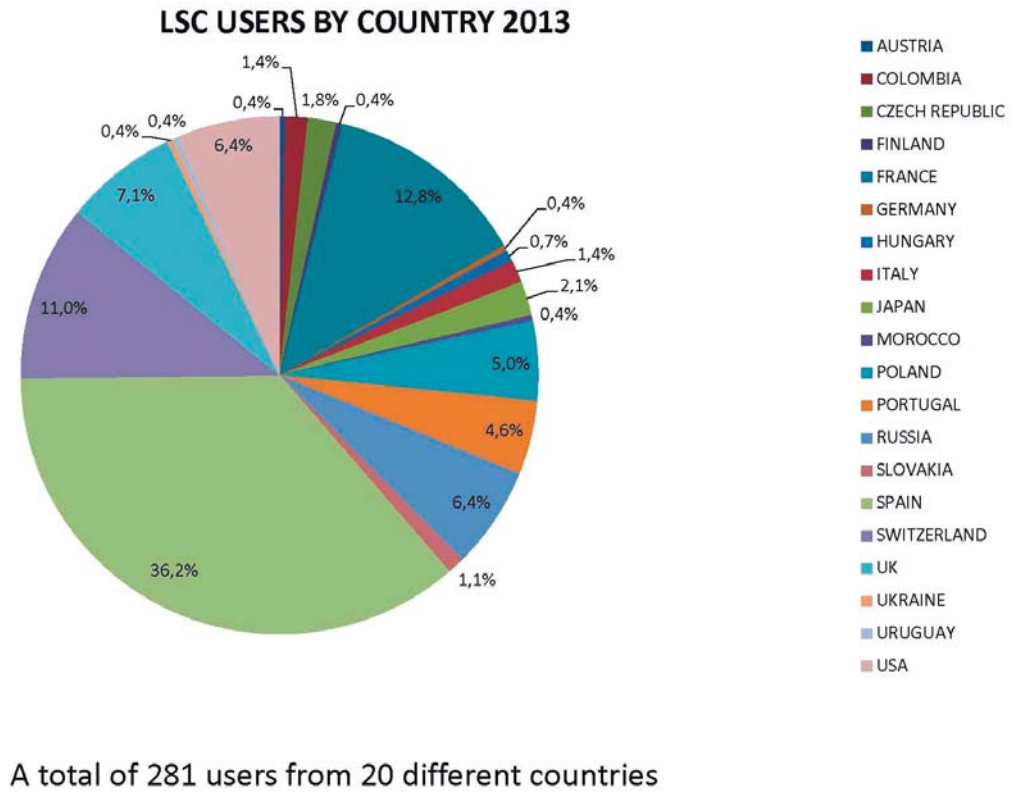


Fig. 3.1. Usuarios del LSC por país en el 2013

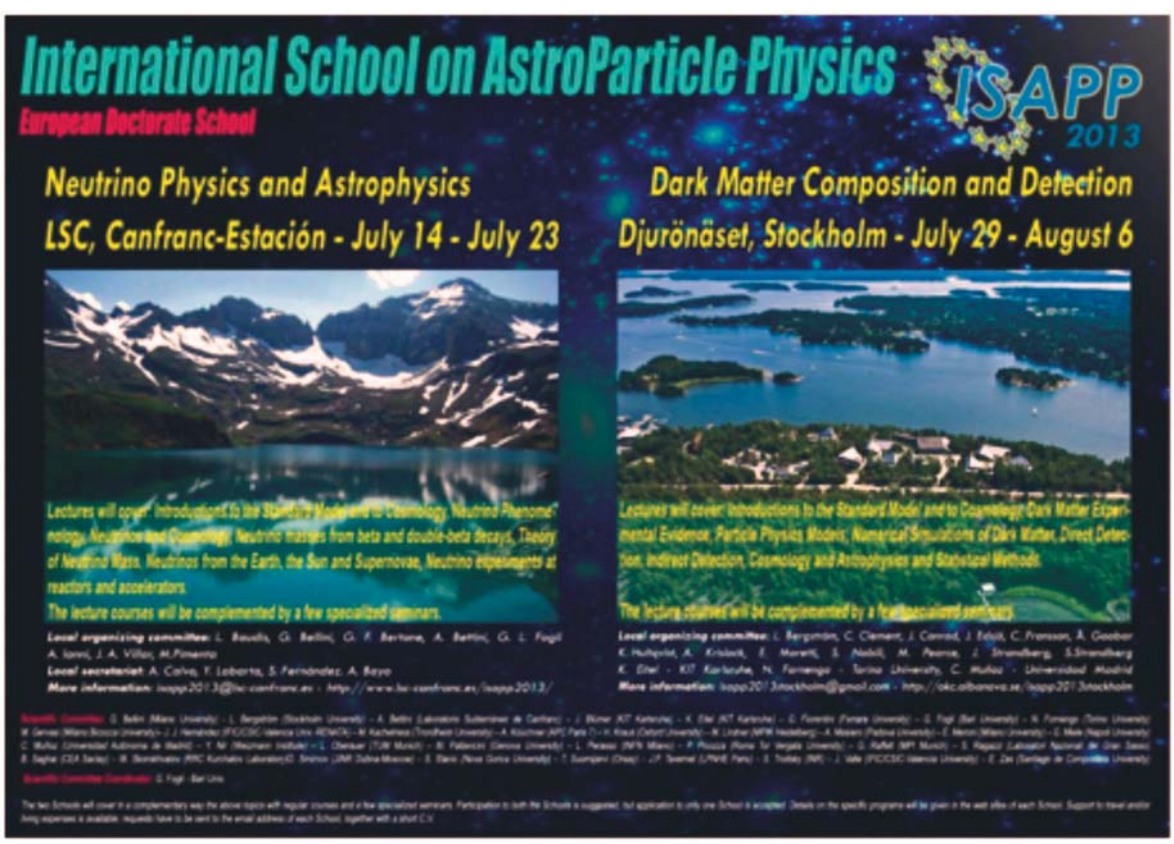


Fig. 3.2 Poster de la Escuela ISAPP en Física de Neutrinos y Astrofísica

El LSC tiene un programa de visitas, con casi 1100 visitantes en el 2013.

Casi 3000 personas han visitado ya el laboratorio desde que comenzaron a realizarse las visitas en el año 2010

Número de visitas al LSC en los distintos años

4 INFRAESTRUCTURAS

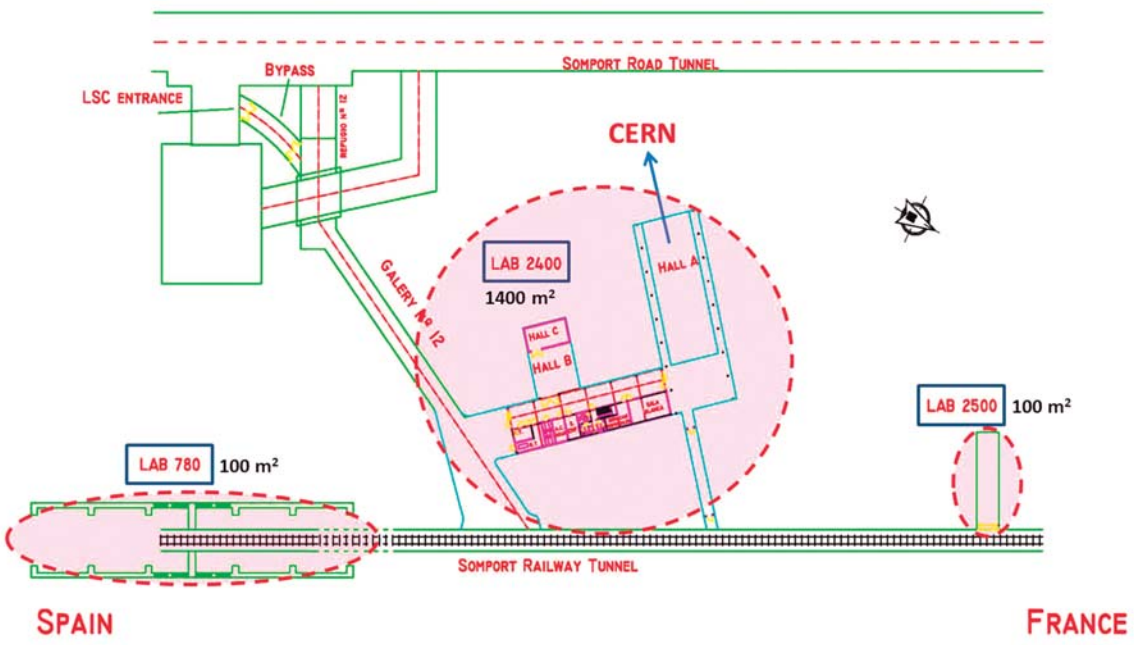


Fig. 4.1 Mapa de las infraestructuras subterráneas

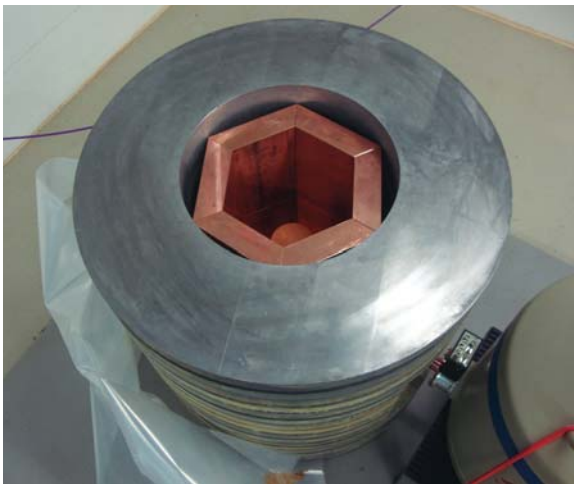
La Fig. 4.1 muestra un mapa de las infraestructuras subterráneas en el Lab 2400. El Hall A, con unas dimensiones de 40×15×12 m^3, se muestra en la Fig. 4.2. La estructura de ArDM se puede ver a la derecha y al final del hall la plataforma dónde será instalado NEXT.

El Hall B, de 15×10×8 m^3, alberga a ANAIS y ROSEBUD en dos casetas distintas.

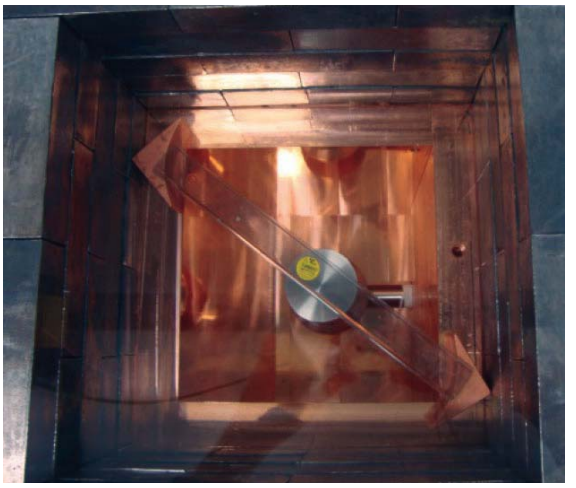
Fig. 4.2. Hall A

Fig 4.3. Casetas de ANAIS y ROSEBUD en Hall B

Fig. 4.4. Hall C con detectores de Germanio



Un detector en proceso de montaje con los blindajes de cobre y plomo



Interior de un detector de Germanio

Al fondo del Hall B, separado por una pared, se encuentra el Hall C. Alberga siete detectores de germanio de alta pureza que con sus blindajes de plomo y cobre les aíslan de la radioactividad ambiental, se muestran en las Fig. 4.4 y 4.5. El Servicio de radiopureza se ofrece también a usuarios externos.

Otro Servicio es la sala blanca de 45 m^2 que se muestra en Fig.4.6. Proporciona servicios de clase 7 y 6 en el sector, tanto para los experimentos del LSC como para usuarios externos.

Se construyó un pasillo perpendicular a los halls. Está dividido en dos partes horizontalmente: la parte izquierda conecta la entrada a los halls y la derecha tiene dos pisos, con los servicios (alta y baja tensión, tratamiento del agua, almacenamiento de gases, baños, un pequeño taller mecánico etc.) en la parte inferior y oficinas para los investigadores en la parte superior).

En la Fig. 4.8 vemos el Lab 2500, que alberga tres detectores de germanio de alta pureza y las actividades de I+D del Grupo de Física Nuclear y Astropartículas de Zaragoza. Hay espacio disponible para futuros experimentos de usuarios externos.

Las complejas estructuras subterráneas, Lab 2400, 2500, 780 L y 780 R y sus correspondientes accesos ocupan un área total de unos 1600 m^2 y un volumen total de 10 000 m^3.

El edificio sede en el exterior tiene aproximadamente 1800 m^2 y se muestra en la Fig. 4.9

Fig. 4.6. La sala blanca en el subterráneo

Fig. 4.7. El pasillo de servicios

Fig. 4.8. Lab 2500

Fig. 4.9. El edificio sede en el exterior

En él se ubica la sede central, administración, una biblioteca, oficinas (Fig. 4.10), un auditorio (Fig. 4.11), laboratorios, almacenes y un taller mecánico, además de estructuras de seguridad y la gerencia.

Fig. 4.10. El edificio por dentro

Fig. 4.11. Auditorio

Existen laboratorios especializados para electrónica, informática, física y química. El laboratorio de física ha sido equipado recientemente con un detector de partículas alfa beta para pequeñas muestras. El laboratorio de química está equipado con una sofisticada instalación de electroformación de cobre desarrollada por el grupo de Física Nuclear de la Universidad de Zaragoza. La razón para ello es la siguiente. El cobre es un material ampliamente utilizado por los experimentos para aislarlos del fondo radioactivo gamma. No obstante, suele contener pequeñas trazas de radioactividad. Para evitar incluso estas mínimas trazas debemos construir la estructura de cobre "átomo a átomo" mediante una deposición electrolítica. A este proceso se le denomina electroformación.

Los laboratorios en el exterior están unidos al subterráneo mediante líneas de fibra óptica. La conexión de alta velocidad a Internet la proporciona el Gobierno de Aragón, mediante radioenlaces, a la Red de Investigación de Aragón (RIA).

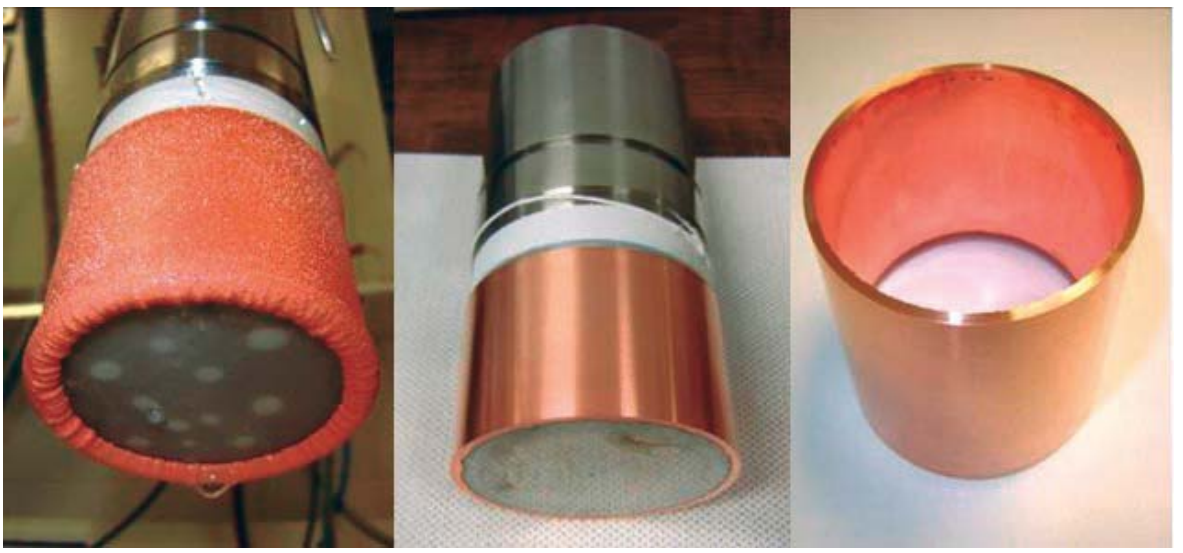


Fig. 4.12. Piezas de electroformación

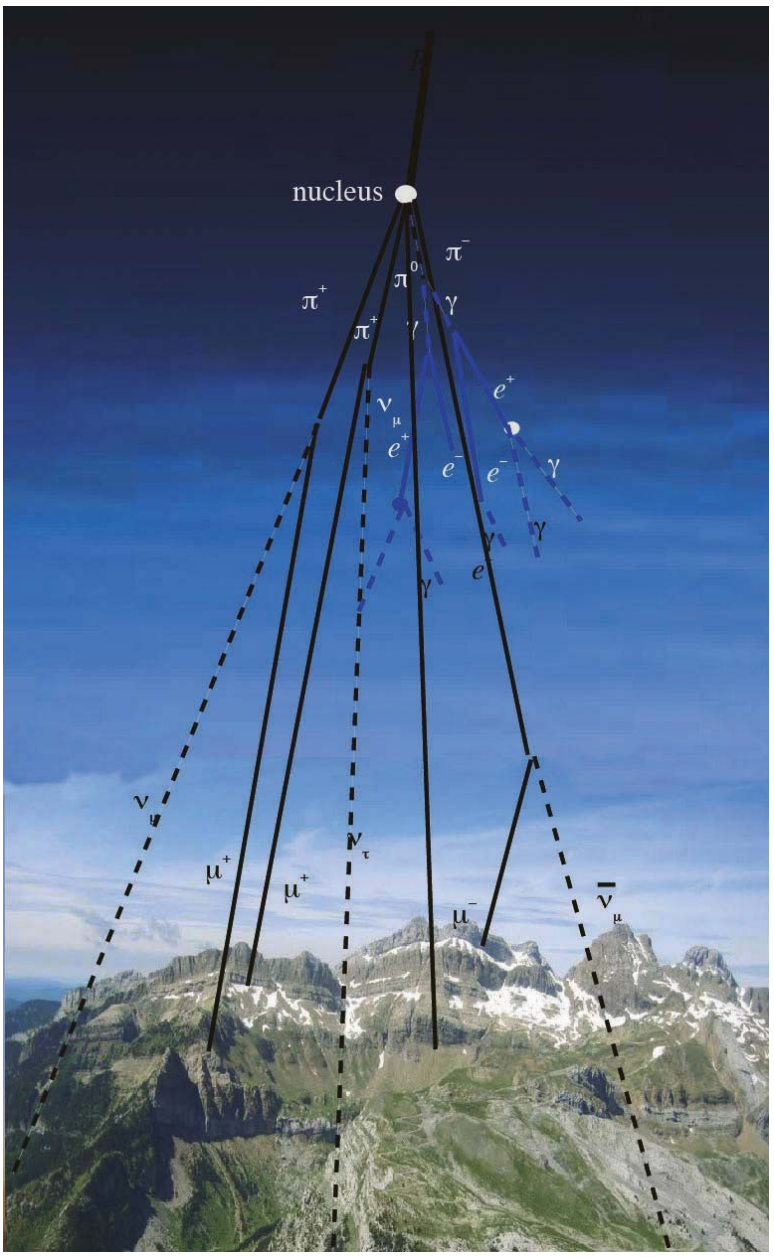
5 CARACTERÍSTICAS

Existe un número de características de los laboratorios subterráneos que se deben conocer y controlar para poder realizar un diseño adecuado, planificación y operatividad de los experimentos.

Con el objetivo de incrementar aún más la seguridad, se ha diseñado una estructura específica de fibras ópticas, que está en funcionamiento ininterrumpido, para monitorizar la estabilidad de la roca de manera continua. Consta de 18 fibras ópticas, de 5 m de largo con sensores asociados de humedad y temperatura, que miden la distancia entre sus extremos con una sensibilidad de unas pocas micras.

Los rayos cósmicos son partículas con carga, en su mayoría protones pero también núcleos y electrones, que provienen del universo y penetran en la atmósfera. En la atmósfera, al colisionar un núcleo, pueden producir una cascada de partículas secundarias inestables. Bajo tierra solamente sobreviven los componentes más penetrantes. Estos son los casi invisibles neutrinos y los muones. Estos últimos son partículas con carga similares al electrón pero con mayor masa. El flujo de muones se reduce, pero no desaparece, con el grosor de la roca. En el LSC es cien mil veces menor que en la superficie. Los muones tienen altas energías, mucho más altas que las de la desintegración nuclear.

El Laboratorio de Bajas Actividades (LABAC) de la Universidad de Zaragoza, en colaboración con los servicios del LSC, realiza análisis sistemáticos radiológicos de distintas muestras de agua recogidas en diversas ubicaciones de los laboratorios subterráneo y superficie. Los análisis se llevan a cabo mediante espectroscopia gamma, alfa y beta. También se realizan análisis biológicos y químicos.



Impresión artística, a escala no-real, de una interacción de rayos cósmicos en la atmósfera produciendo varias partículas primarias y secundarias. Los Neutrinos penetran la roca sin problemas, los muones son absorbidos gradualmente

Pequeñas cantidades, trazas, de isotopos radioactivos están por todas partes, en la roca, en el agua, en el aire y en nuestros propios cuerpos. El núcleo radioactivo puede desintegrarse principalmente de tres formas denominadas desintegración α, β y γ, que corresponden a la emisión de partículas alfa (que son núcleo de helio), electrones o protones respectivamente. Las partículas alfa que se emiten en la roca o en el hormigón son captadas por otros núcleos, que son inestables y se desintegrarán emitiendo un neutrón. En cada caso las energías alcanzan unos pocos MeV (mega electronvoltios).

El Radón es un gas noble radioactivo que proviene del uranio y el torio en el ambiente, en particular en las paredes y el agua. Varios isotopos de la cadena de desintegración del Rn son peligrosos para los experimentos. Algunos de ellos, que pueden ser emisores de α, β o γ, se adhieren a las superficies y pueden contribuir substancialmente al fondo. La actividad de Rn en el aire, tanto en la superficie como bajo tierra, tiene grandes fluctuaciones tanto periódicas (diariamente, anualmente, etc.) como no periódicas. Bajo tierra depende también de las características del conducto de entrada y del índice de renovación del aire.

El sistema de entrada de aire del LSC es auxiliar al de la carretera, aprovechando el espacio entre las tuberías que traen el aire a la misma y el revestimiento de hormigón correspondiente a las estructuras civiles. Una fosa vertical de 250 m de largo coge el aire fresco de la montaña en Rioseta. La actividad del Rn se midió como referencia obteniendo 15 Bq/m^3 en Rioseta y 38 Bq/m^3 en el fondo de la fosa. Hasta alcanzar el LSC, el aire recorre un pasillo en horizontal de 500 m de largo. La actividad de Rn a la entrada

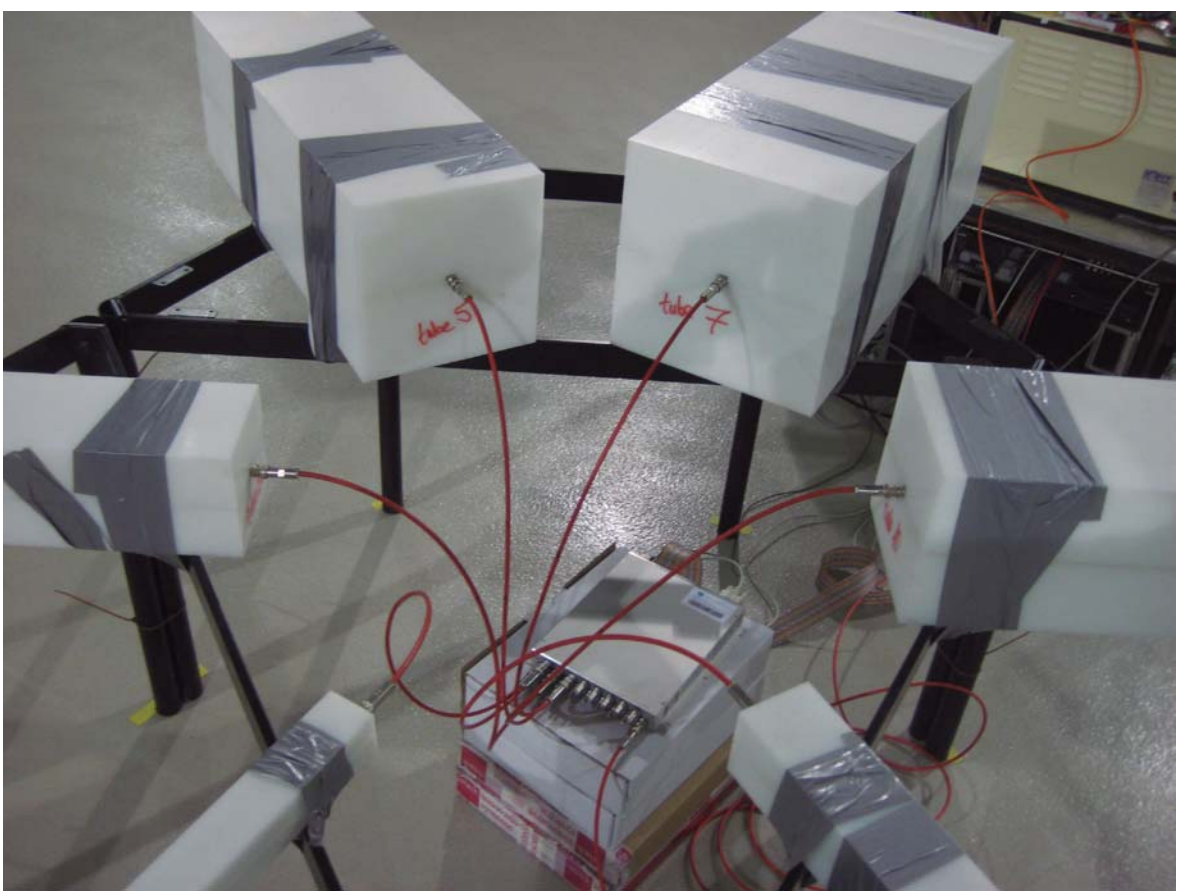


Fig. 5.1 Seis detectores proporcionales de ^{3}He en el Hall A (Colaboración CUNA)

del LSC fue de 70 Bq/m^3. Mediciones sistemáticas mostraron que en las salas experimentales la actividad de Rn es igual a la existente en la entrada, indicando que no hay una contribución extra apreciable de la emanación de Rn de las superficies, con una entrada de aire fresco de 11 000 m^3/h. La actividad específica varía entre 50 and 80 Bq/m^3.

El nivel de fondo de neutrones bajo tierra es también menor que el de la superficie, donde toma valores externos a 100 n/(m^2s) al nivel del mar. La colaboración CUNA ha medido el flujo de neutrones y el espectro de energía en el rango entre 1 eV y 10 MeV. Utilizaron un equipo de seis detectores proporcionales de ^{3}He, del montaje que se explicará en el apartado dedicado a CUNA, dentro de matrices de polietileno de diferentes grosores. De esta manera el fondo de neutrinos se midió simultáneamente a niveles de energía diferentes. El flujo total en el centro del hall A resulto ser de (3.44±0.35) x10^{-2} n/(m^2s), unas treinta veces menos que el de la superficie.

Estos neutrones que proceden del hormigón de la pared deambulan en las salas constituyendo una especie de gas muy diluido. Para hacerse una idea, tenemos unos cien neutrones en el volumen total del Hall A. Son realmente muy pocos, pero suficientes para representar un peligro para los experimentos. Por ello se construyen blindajes con materiales que absorben los neutrones alrededor de los experimentos para su protección.

El espectro de rayos gamma se ha medido en el servicio de medidas de radiopureza del LSC. Su flujo total es de 120 gammas/(m^2s). Es pequeño pero, una vez más, los experimentos deben de construir blindajes para estar protegidos.

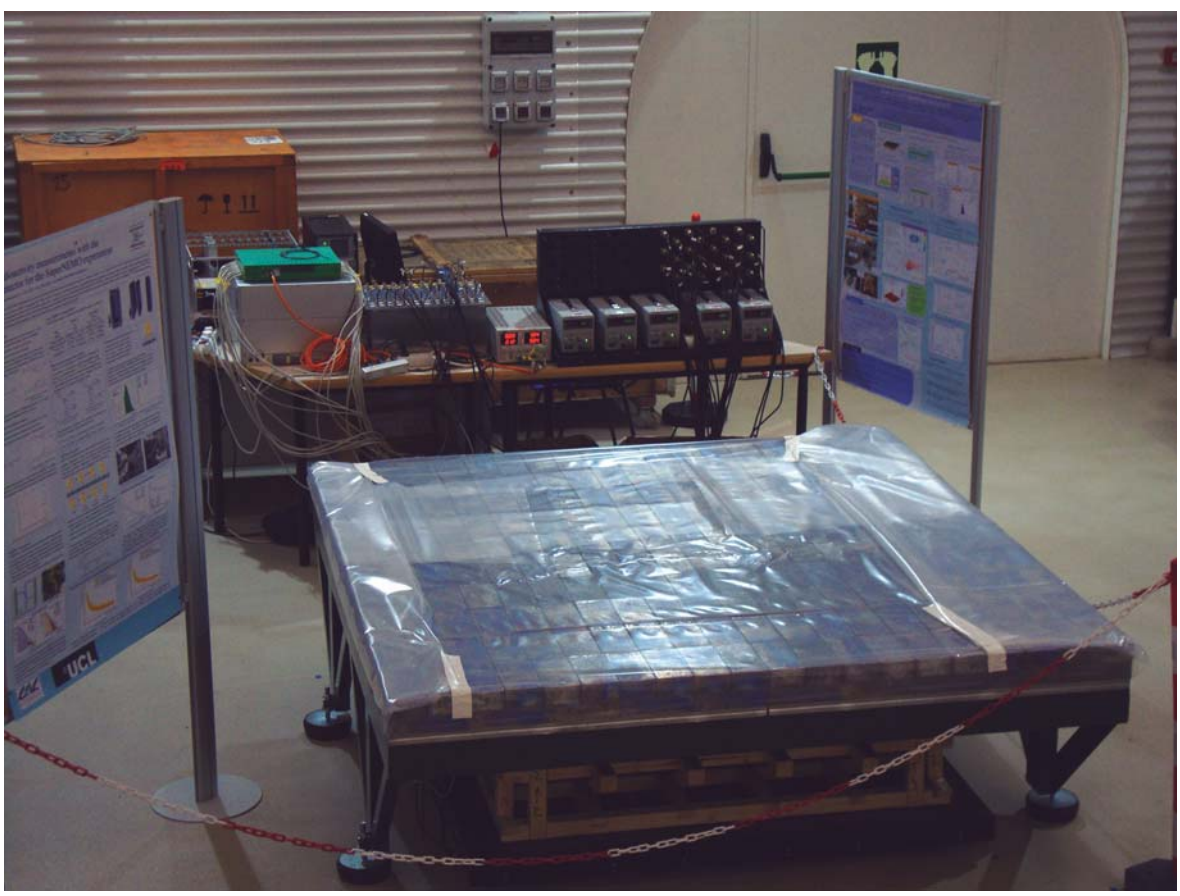


Fig. 5.2 Detector de muones

El flujo total de muones integrado sobre los ángulos se midió en 3-5·10^{-3} m^{-2} s^{-1} en el 2006, dependiendo de la ubicación. En este momento se están realizando nuevas medidas del flujo de muones como una función de los ángulos utilizando una matriz de detectores diseñado y construido por el Instituto de Física y Tecnología de Moscú.

Conociendo la diversidad de fondos, los experimentos pueden diseñar sus blindajes para reducir los efectos de fondo a valores aceptables. No obstante, los materiales de los blindajes y de los propios experimentos contienen trazas radioactivas. En la práctica todos y cada uno de los componentes deben de ser analizados para determinar si existe alguna pequeña traza de isotopos radioactivos. El ya mencionado servicio de baja radioactividad del LSC ayuda a los experimentos en esta actividad fundamental.

Podemos tener una idea más clara sobre esta cuestión valorando el siguiente ejemplo. Nuestro cuerpo es radioactivo, pero vivimos felizmente con él. El Potasio (K) asciende a un 2 por mil de nuestro cuerpo, por lo tanto una persona de unos 70 kg contiene unos 140 g de potasio. Alrededor de uno entre 10 000 de los núcleos de K son el isotopo 40K, el cual es radioactivo. Estos 17 mg producen 44 Bq, lo cual significa 44 desintegraciones por segundo. De estos el 89% son β y el 11% son γ. El cuerpo absorbe los primeros mientras que la mayoría de los últimos irradian fuera. Nosotros emitimos unos 5 gammas por segundo.

Como comparativa, consideren el experimento ANAIS, que está hecho de cristales de yoduro de sodio (NaI). Si una partícula de materia oscura golpeara un núcleo, este podría retroceder, ionizando unos cuantos átomos y produciendo un pequeño destello de luz, el cual podemos detectar. No obstante, el potasio es químicamente similar al sodio, el cual permanece en trazas en el cristal tras haber sido tratado químicamente. Una fracción de la desintegración de 40K produce un destello de luz igual al que se busca, lo que denominamos una señal de fondo. En consecuencia, las trazas de potasio en el cristal deben ser reducidas a un nivel aceptable. Esto es cien mil veces menos que el 2 por mil del cuerpo humano.

6 LA CIENCIA

El programa científico del LSC se basa principalmente en la física de astropartículas, la búsqueda de la materia oscura, la física de neutrinos y la geodinámica.

NEUTRINOS

Los elementos básicos constituyentes de la materia que se conocen se pueden clasificar en tres grupos, denominados "familias". Cada familia se compone de dos quarks, un leptón con carga y un neutrino. Los leptones con carga de las tres familias son el electrón (e), el muón (μ) y el tauón (τ); los neutrinos correspondientes son el neutrino-electrónico (ν_e), el neutrino-muónico (ν_μ) y el neutrino-tauónico (ν_τ). Decimos que el par de leptones de cada familia tiene sabor electrónico, sabor muónico y sabor tauónico respectivamente. Cada partícula, quarks, leptones con carga y neutrinos tiene una antipartícula. El modelo estándar asume que los neutrinos que nacen con un sabor lo mantienen para siempre. Dicha conclusión fue basada en experimentos realizados en aceleradores dónde el haz de neutrinos alcanza longitudes de un kilómetro.

Diversos experimentos en laboratorios subterráneos han estudiado los neutrinos sobre distancias mucho mayores. Sus fuentes son naturales, en lugar de artificiales: las interacciones de rayos cósmicos en la atmósfera y las reacciones de fusiones nucleares en el centro de nuestro sol. Estos experimentos han probado que los neutrinos cambian de sabor si se les da tiempo suficiente para hacerlo. A éste fenómeno se le denomina como oscilación entre sabores y puede ocurrir únicamente si los neutrinos no tienen masa igual a cero. Los tiempos de oscilación son tan largos debido a que las masas de los neutrinos son mucho más pequeñas que aquellas de otras partículas elementales. Pero los neutrinos pueden darnos otras sorpresas.

Así como el electrón tiene una antipartícula, el positrón, la antipartícula del neutrino-electrónico es el antineutrino-electrónico (y de manera similar para el resto). La carga de una antipartícula es opuesta a la de su antipartícula, es decir, los electrones son negativos y los positrones positivos. Aunque no tengan carga eléctrica, en la teoría estándar, se asume que los neutrinos y los antineutrinos son partículas distintas, que se distinguen por la denominada carga leptónica. Pero existe otra posibilidad, fuera de la teoría estándar, y esta es que el neutrino y el antineutrino sean una misma partícula, tal y como imaginó Mayorana en 1937.

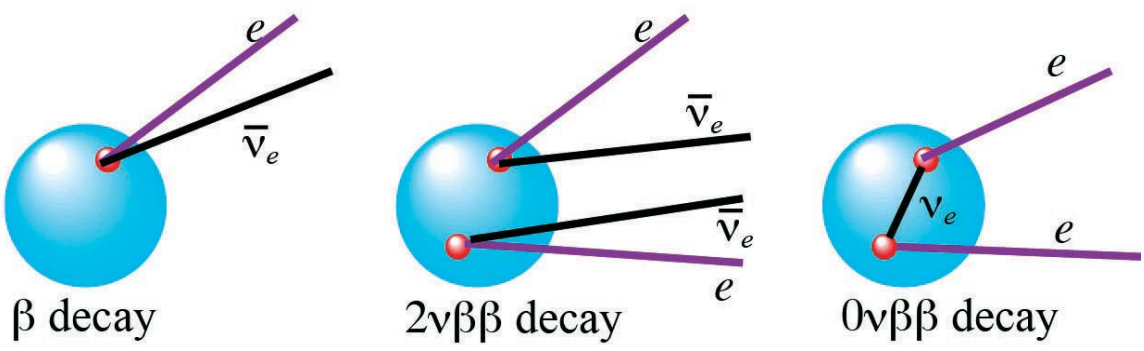


Fig. 6.1. a) Beta decay, b) 2νββ), c) 0νββ

¿Cómo podemos diferenciar entre ambas posibilidades? Diversos núcleos son inestables y experimentan desintegración beta. Un neutrón se desintegra en un protón, emitiendo un par de $e^{-}\overline{\nu}_e$ (electrón - antineutrino electrónico). Para algunos núcleos la desintegración beta está prohibida por razones energéticas, pero otras formas de desintegración, la desintegración doble beta ($2\nu\beta\beta$), está permitida. Dos neutrones se desintegran a su vez en dos protones emitiendo dos pares de $e^{-}\overline{\nu}_e$. Las desintegraciones doble beta tienen una larga vida media, 10^{19}-10^{21} años, pero siguen siendo un proceso previsto por el modelo estándar. Si el neutrino y el antineutrino son la misma partícula otro proceso es también posible, la desintegración doble beta sin neutrinos ($0\nu\beta\beta$). También en este caso, dos neutrones se desintegran en dos protones pero únicamente se emiten los dos electrones. Únicamente hay un neutrino, que permanece dentro del núcleo, intercambiándose entre los dos neutrones que se desintegran. Esto es posible debido a que en este caso el neutrino y el antineutrino son el mismo. No existe un experimento que haya detectado de manera fiable la desintegración doble beta sin neutrinos, pero se han establecido límites, que se encuentran en el rango de 10^{25} años, esto es 10^{15} veces la edad del Universo.

¿Cómo podemos explorar periodos tan largos? Podemos hacerlo porque las desintegraciones son procesos estadísticos: si la duración es de digamos 10^{25} años, los núcleos se desintegrarán en un tiempo del orden de un año. Los experimentos de la generación actual pretenden explorar hasta 10^{26} años. Esto implica la búsqueda de unos cuantos eventos por año en un kilo-mol de sustancia, lo que es igual a 6×10^{26} núcleos. Nótese que sabemos exactamente la energía liberada a los dos electrones en la desintegración. Procedemos entonces a medir la suma de las dos energías de los neutrinos de la forma más precisa posible. No obstante, los fondos siempre están presentes y pueden también simular la señal. Se necesita, como características indispensables para la búsqueda, una energía de resolución extremadamente buena y un índice de fondo extremadamente bajo.

En el LSC el experimento NEXT, actualmente en proceso de construcción, realizará la búsqueda para $0\nu\beta\beta$ de ^{136}Xe.

MATERIA OSCURA

Se han realizado enormes progresos en la física de partículas elementales, en cosmología y en astrofísica, pero todavía no conocemos de qué está hecha la fracción más grande del Universo. Alrededor de un 68% del balance de la masa-energía está hecho de algo que acelera su ritmo de expansión. Ésta ejerce una presión o energía que penetra el vacío. Esto lo denominamos materia oscura, pero realmente no sabemos lo que es.

El 32% restante es materia, pero únicamente el 5% es luminosa, el otro 27% es invisible y denominada oscura. Esta conclusión proviene de muchas observaciones diferentes realizadas en diferentes épocas de la historia del Universo. Una de ellas es la medición de las velocidades de rotación las Galaxias. La ley de Newton nos dice cómo la velocidad de rotación de un ob-

Fig. 6.2. Colisión de dos cúmulos de galaxias, que muestran la presencia de materia oscura. Foto NASA

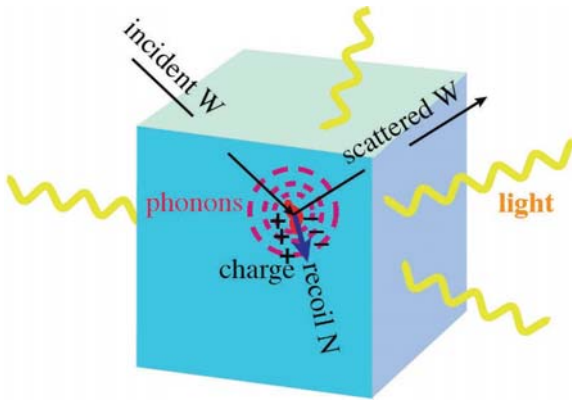


Fig. 6.3. Principios de detección de las WIMP

jeto es relativa a la masa alrededor de la cual está orbitando. Con lo cual podemos calcular la masa de una galaxia a partir de la velocidad de rotación de una nube de gas orbitando a su alrededor. Encontramos que la masa de las galaxias es mucho mayor que su masa luminosa. La Fig. 6.2 nos muestra otro ejemplo. Es una imagen compuesta de dos cúmulos de galaxias que acaban de (en escala cósmica) cruzarse entre ellas. Se le denomina bala puesto que se mueven muy deprisa. La NASA realizó esta imagen (http://apod.nasa.gov/apod/ap060824.html) combinando observaciones ópticas y de rayos X, que proporcionan la materia "visible" observaciones de efecto lente gravitatoria que nos dan la masa total. Podemos ver que la materia visible (en rojo) desaceleró la interacción en el cruce, mientras que la materia oscura (en azul) no lo hizo.

Ninguna de las partículas que se conocen puede explicar la materia oscura. Las partículas de la materia oscura no tienen carga y solo interactúan muy débilmente. En esto son similares a los neutrinos. Los neutrinos se encuentran ciertamente en el Universo, pero su masa es demasiado pequeña para contribuir al balance de manera substancial. Las partículas de la materia oscura deben tener mayor masa, pero no sabemos su tamaño. Esperamos tamaños entre varios GeV (la masa del protón es alrededor de 1 GeV) y unos miles GeV. Se les denomina en genéricamente como WIMPs ("Weakly Interacting Massive Particles"). Una extensión teórica del modelo estándar, la supersimetría, abreviada como SUSY, prevé una buena candidata para las WIMP, el neutralino. La teoría da también indicaciones sobre la interacción del neutralino en sección eficaz (queriendo decir probabilidad de interactuar) con los núcleos. Debería ser muy pequeña, como en los neutrinos, pero no sabemos realmente cuánto.

Si los WIMPs existen deberían de llenar nuestra Galaxia, y la Tierra debería navegar a través de ellas al moverse en su órbita. Para detectarlas utilizamos materiales tales como el cristal (como ANAIS) o el líquido (como ArDM). Cuando, muy rara vez, un WIMP golpea un núcleo, este retrocede e intentamos medir la energía que emite al medio. El núcleo en retroceso ionizará algunos átomos, produciendo cargas libres (electrones), que excitan otros átomos, los cuales emitirán luz (protones), o harán vibrar el cristal (fonones). En nuestros experimentos tratamos de detectar esas partículas secundarias. No obstante, cualquier pequeña traza de radioactividad natural puede producir efectos similares y es por ello que es necesario desarrollar técnicas sofisticadas para distinguir este fondo de la señal.

Existen dos estrategias básicas. La más seguida es la de construir experimentos de manera que el fondo se reduce a cero en la ventana experimental. Esto se consigue mediante la medición de las trazas radioactivas en todos los compo-

nentes del experimento, antes de su montaje, y desarrollando un "modelo de fondo" por simulación numérica. Le sigue un periodo de toma de datos que proporciona una cierta "exposición", que es el producto de la masa sensible o efectiva por el tiempo de exposición. Nuestro modelo de fondo prevé eventos con fondo cero. Si no vemos eventos, concluimos que no hay señal y podemos poner límites a la sección eficaz como una función de la masa de WIMP.

La segunda estrategia busca una marca característica de la señal del WIMP. Nuestro detector se mueve en la Galaxia con la Tierra, por el "mar" de WIMPs. La velocidad de la Tierra en la Galaxia varía a lo largo del año. En junio la Tierra se mueve en su órbita en la misma dirección que el Sol en la Galaxia. Por consiguiente la velocidad de la Tierra relativa a la Galaxia es máxima. Es mínima en diciembre cuando ambas velocidades son opuestas. Como consecuencia de esto, el nivel de la interacción WIMP debería variar periódicamente a lo largo del año con su máximo en junio. La modulación es de un porcentaje bajo, pero debería poder observarse. Esta marca parece ser un poderoso medio para poder distinguir la señal de los fondos. Sin embargo, por desgracia, varios parámetros del ambiente, como la actividad de Rn y la humedad, también tienen periodicidad anual.

GEOLOGÍA

El LSC se encuentra ubicado a profundidad en una de las zonas con más actividad sísmica del Oeste de Europa, la cordillera Pirenaica que marca el límite entre la placa Europea y la micro placa Ibérica. Aparte de esto, el ambiente bajo tierra del túnel asegura un muy bajo nivel de perturbaciones de ruido, de origen bien natural o cultural. Además, el túnel ferroviario abandonado y varios túneles de servicio aportan oportunidades para poder acceder a roca subterránea.

HYDROLOGÍA

El agua de lluvia y agua de nieve derretida penetran gradualmente en la profundidad de las montañas y antes o después van a parar a los ríos. Poder observar estos fenómenos desde una gran profundidad bajo tierra ofrece a los hidrólogos una oportunidad única.

BIOLOGÍA

La vida está presente prácticamente en toda la Tierra, incluyendo ambientes en los cuales se desarrolla bajo condiciones extremas, en particular a gran profundidad bajo tierra. Uno puede intentar contestar preguntas cómo:

- ¿Hasta qué profundidad se extiende la vida en la Tierra?
- ¿Qué hace que la vida resulte en la profundidad bajo la superficie?
- ¿Qué nos puede enseñar la vida bajo tierra sobre cómo evolucionó la vida?

El LSC y los túneles de servicio cercanos, algunos de los cuales poseen un cese total de actividad humana, pueden ofrecer acceso a la búsqueda de "vida oscura" en el grueso de la roca. Por ejemplo, nuevos grupos de bacterias fueron descubiertos a gran profundidad en el 2006 en la mina Henderson en Colorado.

7 ANAIS

http://gifna.unizar.es/anais/

ANAIS es un proyecto de detección directa de materia oscura a través de la observación de la modulación anual que se espera en su ritmo de interacción. Esta modulación anual es una característica distintiva de la señal de materia oscura con respecto a otras posibles señales. De hecho, hasta la fecha, el único experimento que ha presentado una evidencia robusta de presencia de señal de materia oscura en sus datos es DAMA/LIBRA, que opera en el LNGS y estudia dicha modulación anual. Esta evidencia nunca ha sido confirmada por otros experimentos que han alcanzado una mayor sensibilidad, y sin embargo, esta aparente contradicción no puede ser considerada definitiva ya que se han utilizado diferentes técnicas de detección y núcleos blanco. Una confirmación o refutación de los resultados de DAMA/LIBRA puede realizarse de forma independiente del modelo de halo y matera oscura si se utilizan detectores similares a los suyos, es decir centelleadores de NaI, en condiciones de extremadamente bajo fondo radiactivo. ANAIS tiene como objetivo usar una matriz de detectores de NaI, en total 250 kg, en el LSC para estudiar la modulación anual.

Durante 2012 un cristal prototipo denominado ANAIS-0, de 9,7 kg, crecido por la empresa Saint Gobain y encapsulado en la Universidad de Zaragoza, estuvo en operación en el LSC. El objetivo principal fue el montaje y puesta a punto del blindaje, cadena electrónica, adquisición y software de análisis para el experimento ANAIS. Una nueva cadena electrónica basada en estándares VME y NIM fue instalada en 2012. El nuevo software de adquisición de datos fue probado y el análisis correspondiente desarrollado y adaptado al nuevo formato de adquisición, manteniendo los protocolos y parámetros de análisis previamente establecidos.

Se ha progresado de forma muy significativa en el desarrollo de potentes procedimientos de filtrado para rechazar sucesos anómalos en la región de baja energía, no atribuibles a la interacción de la materia oscura, en la comprensión de los fondos radiactivos del módulo ANAIS-0 y en la construcción de un modelo de fondo capaz de reproducir las medidas experimentales. Los resultados derivados de la toma de datos de ANAIS-0 han sido publicados y presentados en importantes congresos a nivel nacional e internacional.

Particularmente importante para ANAIS es la determinación de las trazas de potasio en los cristales de NaI, que no deben superar los 20 ppb (partes por billón), para conseguir los objetivos de fondo del experimento. Los cristales son crecidos a partir de un polvo de NaI, que tiene que ser analizado, como primer paso del proceso. Una muestra de polvo producido por Alpha Spectra Inc. (AS) fue medido en el servicio de medida de radiopureza de materiales del LSC entre octubre de 2011 y enero de 2012. El contenido de potasio de la muestra probó estar por debajo del límite de sensibilidad del contador de germanio, es decir por debajo de 90 ppb. Dos cristales de 12,5 kg cada uno fueron entonces encargados a AS para determinar su contenido de potasio, con mayor sensibilidad, mediante la identificación de la desintegración del ^{40}K por el método de la medida en coincidencia que mencionaremos después. Protocolos para el crecimiento y el encapsulamiento fueron sugeridos por el grupo de la Universidad de Zaragoza y aceptados por AS.

En mayo de 2012 terminó el crecimiento de los dos cristales y comenzó el proceso de encapsulamiento en las instalaciones de Colorado

de AS. Las dimensiones finales de los cristales fueron 4,75“ de diámetro y 11,75” de longitud. Fueron encapsulados en cobre OFHC y diseñados para tener una ventana de Mylar que posibilite la calibración de los detectores a muy baja energía. En octubre de 2012 terminó el proceso de encapsulamiento y los detectores fueron enviados al LSC por transporte en superficie. en lugar de por avión, tratando de minimizar la activación inducida por los rayos cósmicos. Los detectores fueron recibidos a finales de noviembre de 2012 e instalados casi inmediatamente, después de acoplarlos a los fotomultiplicadores (PMTs) en la sala blanca del LSC. El blindaje, cadena electrónica y software de adquisición de ANAIS-0, disponibles en el LSC, fueron usados. La toma de datos comenzó en diciembre de 2012. Nos referiremos a este montaje como ANAIS-25.

En paralelo, 42 PMTs fueron encargados a Hamamatsu, también se adquirieron los 25 módulos electrónicos necesarios para completar la cadena electrónica de un experimento consistente en 20 detectores. El modelo de PMT finalmente escogido muestra unas prestaciones excelentes en eficiencia cuántica y bajo fondo radiactivo, de acuerdo con los resultados derivados de los datos de ANAIS-0.

El objetivo principal de ANAIS-25 ha sido la medida del contenido de 40K en el volumen de los cristales de AS, así como la evaluación global del fondo radiactivo de los detectores. El contenido de ^{40}K fue determinado mediante la medida en coincidencia entre la línea gamma de 1461 keV en un detector y los rayos X de 3,2 keV en el otro, una característica distintiva del decaimiento de este isótopo. El resultado fue una actividad específica de 1,25 +- 0,11 mBq/kg, correspondiente a 41,7 +- 3,7 ppb de potasio. Este resultado indica una mejora de un orden de magnitud con respecto al observado en ANAIS-0 y está muy próximo al objetivo de ANAIS de 20 ppb de potasio.

Otras trazas radiactivas, que se desintegran emitiendo partículas alfa, también contribuyen al fondo radiactivo del experimento. Los sucesos de origen alfa se observan en la parte de más alta energía del espectro. Una línea espe-

Fig. 7.1. Dos detectores de NaI durante la instalación en el blindaje en el LSC

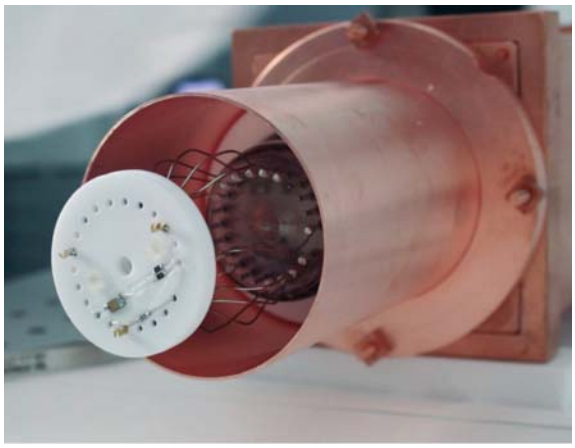


Fig. 7.2. Uno de los fotomultiplicadores de ANAIS en su carcasa de cobre, después de acoplar al cristal de NaI

Fig. 7.3. Montando uno de los detectores de ANAIS-25 en la sala blanca del LSC

cífica de digitalización fue desarrollada y utilizada en paralelo a la cadena electrónica estándar, para identificar mejor los sucesos alfa mediante análisis de la forma de pulsos. El ritmo alfa total en los dos cristales es de aproximadamente 280 kg^{-1} day^{-1} (3,15 mBq/kg). Este valor es mucho más alto que el observado en el prototipo de ANAIS-0 y es un obstáculo importante para alcanzar los objetivos de fondo de ANAIS. Este ritmo alfa alto podría ser debido a la contaminación con ^{222}Rn durante el crecimiento o mecanización de los detectores. Después de algunas semanas solo el ^{210}Pb subsistiría. Conversaciones con AS acerca del posible origen de la contaminación en ^{210}Pb-^{210}Po comenzaron muy pronto tras su descubrimiento. Como resultado, un nuevo cristal de 1 kg, de NaI desnudo fue encargado y rápidamente enviado por AS al LSC para analizar la evolución del ritmo alfa con el tiempo. Se encontró que el ritmo alfa crecía con el tiempo probando que el equilibrio en la cadena de desintegraciones todavía no había sido alcanzado. El detector fue encapsulado en la Universidad de Zaragoza e instalado en el LSC en Agosto de 2013. La toma de datos y el análisis de los mismos con este detector todavía está en curso.

El número de fotoelectrones por unidad de energía depositada (phe/keV) fue determinado en ANAIS-25, con un resultado preliminar de aproximadamente 15 phe/keV. Este excelente resultado se atribuye a un acoplo óptico entre cristal y ventanas de cuarzo mucho mejor en ANAIS-25 que en ANAIS-0, por ejemplo y a la excelente calidad óptica de los cristales de AS. La eficiencia de trigger fue evaluada con los sucesos de 3,2 keV seleccionados mediante la coincidencia con el gamma de 1461 keV. La mayor parte de los sucesos atribuidos a la desintegración del ^{40}K dispararon nuestra adquisición: 99% de los sucesos por encima de 1,5 keV en un cristal y más del 97% en el otro. Este resultado apoya la capacidad de ANAIS de bajar el umbral de energía por debajo de 2 keV.

El trabajo continúa en otras líneas de investigación y nuevos resultados se esperan próximamente. En agosto de 2013 se recibieron en el LSC las primeras 5 unidades de PMT para realizar un control de su radiopureza. Centelleadores plásticos fueron también instalados en el verano de 2013 alrededor del blindaje de ANAIS-25, para detectar los muones que alcanzan el laboratorio. Los sucesos vistos en ANAIS-25 en coincidencia temporal con un muón serán vetados para evitar posibles interferencias de estos en las medidas de modulación anual. Un centelleo lento en los cristales de NaI(Tl) ha sido estudiado. Resultados de las actividades relacionadas con ANAIS han sido publicados en revistas internacionales y presentadas en los congresos más relevantes en el ámbito de la detección directa de materia oscura.

8 ARDM

http://www.ipp.phys.ethz.ch/research/ArDM

El experimento ArDM (Argon Dark Matter), que tiene como objetivo la búsqueda directa de materia oscura, se basa en un detector a gran escala de argón líquido (LAr) a través de una novedosa cámara de proyección temporal (TPC). Es posible medir la dispersión elástica de las partículas que forman la materia oscura (los hipotéticos WIMPs) al observar los fotones centelleantes y los electrones que se producen con el retroceso del núcleo de argón al interactuar con los átomos vecinos. El detector de ArDM está diseñado para medir ambas señales a través de su TPC de doble fase (líquido-vapor). Los electrones de ionización, son derivados en un campo eléctrico uniforme hacia la superficie del líquido y extraídos en el gas saturado de argón que hay sobre el líquido, gracias a grandes campos eléctricos del orden de mil voltios por centímetro (esto requiere un alto voltaje de ~100 kV en el sistema). Los electrones extraídos interaccionan más adelante con átomos de gas argón produciendo una luz de centelleo secundaria (S2) y su intensidad es proporcional a la carga. La luz S2 es detectada por fotomultiplicadores (PMTs) proporcionando información sobre la carga ionizante producida. La luz de centelleo primaria (S1) se detecta rápidamente por los mismos PMTs. El intervalo de tiempo entre S1 y S2 (el tiempo de deriva de los electrones) es proporcional a la distancia desde punto donde ocurre el evento y la superficie del líquido, y se utiliza para conocer exactamente la coordenada vertical del evento.

Las dos coordenadas horizontales se reconstruyen a partir de la distribución de los fotones S2 incidiendo en la matriz bi-dimensional de PMTs. Así se obtiene la información sobre la posición exacta en 3D. Este principio de funcionamiento del detector de ArDM se puede apreciar en el dibujo de la Fig. 8.1 que muestra un diagrama de los procesos de centelleo con argón.

Debido a la pequeña sección eficaz de interacción entre WIMP y el núcleo estos eventos se producen muy raramente y la energía cinética típica de retroceso se encuentra en el rango de 10–100 keV. La señal es por tanto bastante escurridiza y requiere de un experimento en una localización subterránea como la del LSC. Además, es indispensable tener una muy buena discriminación del fondo y buenos blindajes para los detectores.

Líquidos nobles como el argón y el xenón son dos de las mejores opciones para los experi-

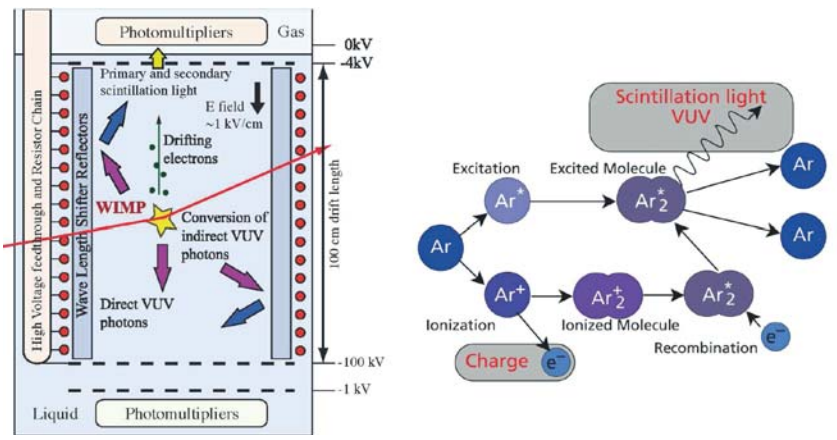


Fig. 8.1. Principios de la TPC de Ar de doble fase

mentos en Materia Oscura de grandes dimensiones puesto que poseen alto rendimiento de centelleo e ionización que es esencial para la detección de estos eventos de tan baja energía y se pueden encontrar comercialmente en grandes cantidades, con lo cual se pueden concebir detectores a gran escala. Proporcionan a su vez masa de detector y auto-blindaje contra las fuentes externas del fondo, dos características esenciales para la detección de eventos inusuales. La elección del argón como material fue motivado por los siguientes razonamientos:

1. El ritmo de eventos en argón no es muy sensible al umbral de la energía de retroceso (la mínima detectada) debido a los tamaños finitos de los núcleos (por el contrario, en el xenón la tasa de eventos se reduce para altas energías de retroceso). Para entender el orden de magnitud, asumimos una distribución estándar de los WIMPs en la Galaxia y consideramos los valores típicos de 100 GeV para la masa del WIMP y 10^{-44} cm^2 para la sección eficaz del núcleo de WIMP. Con el umbral de energía en 30 keV el ritmo en argón es de retroceso por día por tonelada de argón.
2. El argón es mucho más barato que cualquier otro gas noble. En consecuencia, un detector a aún mayor escala (de varias toneladas) que pudiese surgir en un futuro es concebible.
3. La relevancia científica de obtener datos tanto a través de argón como de xenón viene dada por el hecho que el espectro de retroceso es diferente, lo cual nos proporciona una buena verificación cuando se obtiene una señal positiva.
4. La relación entre carga y luz y la forma de la señal S1 nos proporcionan una eficiente discriminación contra los fondos de retroceso de electrones gamma y beta.

Por lo tanto, uno de los principales objetivos de ArDM es demostrar la viabilidad de un detector a gran escala de argón líquido con el rendimiento necesario para detectar de manera eficiente retrocesos nucleares inducidos por las WIMPs con la suficiente discriminación del fondo para una exitosa detección de WIMP.

Se construyó inicialmente en la superficie en el CERN (en Ginebra, Suiza) un prototipo de ArDM de una tonelada y operó con éxito en argón líquido (−186°C at 1 bar) criogenizado. El vacío, la infraestructura criogénica, el panel de control del detector y los sistemas de adquisición de datos se trasladaron al LSC en Febrero del 2012 y se instalaron en el Hall A.

En la Fig. 8.2 se muestra una foto de la instalación de ArDM. Se puede apreciar la plataforma azul construida para la instalación, los enfriadores criogénicos y la estructura de blindaje de neutrones fabricada en polietileno (en blanco).

Para una operativa subterránea segura ArDM posee un sistema de control que monitoriza y regula activamente los distintos subsistemas del experimento. El sistema de control se basa en un controlador lógico que se integra en una matriz de siete racks tal y como se muestra en la Fig. 8.3. Monitoriza todas las presiones, temperaturas y niveles de argón líquido en el detector de ArDM y de su sistema criogénico. También regula el sistema de vacío, la refrigeración del argón líquido, la purificación del argón y el suministro eléctrico para el generador de alto voltaje.

En Febrero del 2013 se instaló en el LSC el detector actualizado con un nuevo sistema de lectura de luz. En la Fig. 8.4 se muestra una foto del nuevo detector, suspendido de la grúa del Hall A en su instalación en la vasija del detector, jun-

Fig. 8.2. La estructura experimental de ArDM

Fig. 8.3. El Sistema de control de ArDM

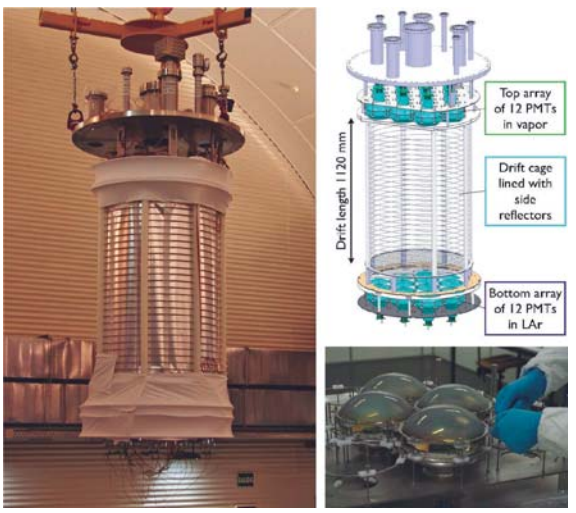


Fig. 8.4. Partes de ArDM

to a su dibujo y un primer plano de uno de las matrices de fotomultiplicadores (PMT). El nuevo detector tiene un total de 24 PMT criogénicos de 8 pulgadas en dos matrices, una en la fase de vapor sobre el volumen de deriva y el otra debajo inmersa en argón líquido. Los PMTs no son sensibles directamente a la luz de centelleo en el argón, que está lejos en la ultravioleta (λ=128 nm). La longitud de onda de la luz es elevada para ser detectable al cubrir las ventanas frente a los PMTs y los reflectores en el lado del volumen con una sustancia química que absorbe los fotones ultravioletas y re-emite luz azul (alrededor de λ=430 nm).

El detector se encuentra en su fase de puesta en marcha y se han tomado una serie de mediciones utilizando el gas argón a temperatura ambiente como medio de detección, mostrando una detección eficiente del sistema de medición de luz a la luz de centelleo del argón tal y como se esperaba.

El sistema de adquisición de datos de ArDM también se actualizó durante el 2013. El nuevo sistema es capaz de manejar un índice de eventos a escala kHz que se espera del LAr, y puede grabar datos a un índice de ~300 MB/s. Un nuevo sistema de almacenamiento de datos, que incluye un disco duro de 192-TB, se instalará en el LSC para la recopilación de datos físicos a este alto nivel.

Se ha realizado un substancial esfuerzo también en el software del análisis físico. Se ha desarrollado sistema de análisis de los datos completo y también un programa de simulación de Monte Carlo, involucrando la geometría del detector en su totalidad y todos los procesos físicos. ArDM está preparado para analizar los datos de física en cuanto estén disponibles.

Al igual que en otros experimentos del LSC, el control y la revisión de un fondo de neutrones es un factor crítico para ArDM. Para ello, se está realizando en este momento en el LSC una campaña de revisión sistemática de los materiales, gracias al apoyo proporcionado por el laboratorio. Se está midiendo la radioactividad de los distintos componentes del detector utilizando la instalación de los germanios en el laboratorio subterráneo. Además, se ha comenzado una medida del fondo de neutrones in-situ en el Hall A del LSC.

EL Experimento ArDM se encuentra ya plenamente preparado para la primera operación criogénica del Ar líquido y está en el proceso de una revisión de la seguridad por parte del LSC con especial atención al uso de una gran cantidad (~2 t) del uso del argón líquido criogénico bajo tierra. Tras una exitosa puesta en marcha y una plena caracterización del sistema durante las primeras operaciones criogénicas, se espera que comience la toma de datos para la búsqueda de la materia oscura en 2014.

La Colaboración de ArDM se compone de científicos del ETH Zurich (Suiza) y del CIEMAT (España).

9 ROSEBUD

ROSEBUD es una colaboración entre el Instituto de Astrofísica Espacial (Francia) y la Universidad de Zaragoza (España), que comenzó en 1998. Se ha dedicado al desarrollo, optimización y caracterización de bolómetos centelleadores para su aplicación en experimentos de física nuclear y de astropartículas. Desde el 2006, ambas instituciones forman parte también de la colaboración EURECA, un gran proyecto europeo para la búsqueda de material oscura, cuyo principal objetivo es combinar diferentes técnicas criogénicas de detección y diferentes blancos en un único montaje experimental de ultrabajo fondo radiactivo, extensible hasta 1 tonelada de masa. ROSEBUD ha completado su programa experimental en 2012 y el dispositivo experimental en el LSC ha sido desmontado en marzo de 2013.

Un bolómetro es un dispositivo que funciona como un calorímetro que mide la energía depositada por la interacción de una partícula (un núcleo retrocediendo por el impacto de un WIMP, un electrón expulsado del átomo por un fotón, etc.). Consiste en un cristal (absorbente), acoplado a un baño térmico, y con un sensor térmico pegado sobre él. El sensor mide la energía depositada en el absorbente gracias al incremento de temperatura que se produce. Este incremento es tan pequeño que sólo es medible a temperaturas extremadamente bajas (próximas al cero absoluto). Por ello se requiere un sistema criogénico muy complejo, que incluye un refrigerador de dilución, para alcanzar temperaturas tan bajas como 10-20 mK. Los bolómetros tienen muchas aplicaciones como detectores de partículas porque esta técnica de detección, además de ofrecer excelentes prestaciones (buena resolución y muy bajo umbral en energía), presenta una muy amplia oferta de posibles materiales (absorbentes).

ROSEBUD ha sido pionero en el desarrollo de bolómetros centelleadores en los que, además del calor, se detecta la luz producida por la interacción de una partícula. La detección simultánea de calor y luz les dota de una excelente capacidad de discriminar los retrocesos nucleares del fondo radiactivo. Los absorbentes centelleadores se montan en una configuración de doble bolómetro que permite medir simultáneamente el calor y la luz. El segundo bolómetro es un disco de Ge (decenas de micras de espesor) con su correspondiente sensor térmico. Los fotones de centelleo son absorbidos en dicho disco.

Los bolómetros centelleadores de ROSEBUD son desarrollados en el Instituto de Astrofísica Espacial y montados en una estructura de cobre acoplada térmicamente a la cámara de mezclas del refrigerador. Aquellos detectores con mejores prestaciones son caracterizados en un entorno de ultrabajo fondo radiactivo en el Hall B del LSC (hasta el 2008 las medidas se realizaban en el Lab 2500). La parte externa consiste en

Fig. 9.1. Un bolómetro centelleador. La luz producida en el cristal centelleador (dcha) es absorbida en el disco de Ge (izqda).

una jaula de Faraday de 3x3x4.8 m^3 que protege de interferencias electromagnéticas. El RD se instala dentro de la jaula de Faraday y se rodea de un blindaje que, de dentro a fuera, consiste en 25 cm de Pb, una lámina de 1 mm de µ-metal, una caja de PVC sellada por cuyo interior circula vapor de nitrógeno líquido para eliminar el radón presente en el aire, y 40 cm de polietileno como blindaje contra neutrones.

Los bolómetros centelleadores tienen muchas aplicaciones en física nuclear y de astropartículas. Los resultados más relevantes obtenidos por la colaboración son los siguientes.

Materia oscura. Los bolómetros centelleadores se emplean en experimentos de detección directa de la materia oscura, aprovechando la amplia elección de blancos y su capacidad de discriminar tipos de partículas. ROSEBUD realizó la primera búsqueda subterránea de materia oscura con medida simultánea de luz y calor usando un bolómetro centelleador de $CaWO_4$. También ha desarrollado y caracterizado en el LSC prototipos de detectores de Al_2O_3 y BGO obteniendo excelentes prestaciones. Estos materiales podrían incorporarse como blancos en el futuro experimento EURECA. Asimismo, ha medido las respuestas en luz y calor a retrocesos nucleares en diversos materiales.

Detección de neutrones. ROSEBUD ha desarrollado y probado bolómetros centelleadores de LiF and ^{6}LiF que podrían ser utilizados para monitorizar el flujo de neutrones en el interior del blindaje de un experimento criogénico de búsqueda de materia oscura, como EURECA, usando la resonancia de la reacción nuclear $^6Li(n,\alpha)$.

Además se han realizado numerosas medidas de ultrabajo nivel radiactivo: límites a la radiactividad α del tungsteno, medida del cociente L/K de la captura electrónica del ^{207}Bi y del reparto energético entre calor, luz y trampas que produce la interacción de la radiación con la materia en diversos materiales.

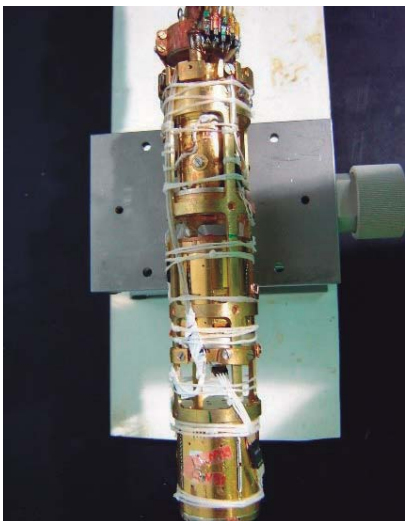


Fig. 9.2. Tres bolómetros centelleadores montados en una estructura de cobre acoplada a la cámara de mezclas del refrigerador de dilución

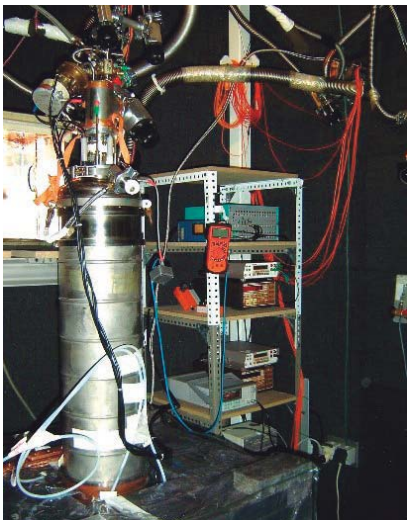


Fig. 9.3. Equipos de vacío y circulación de gases del refrigerador de dilución

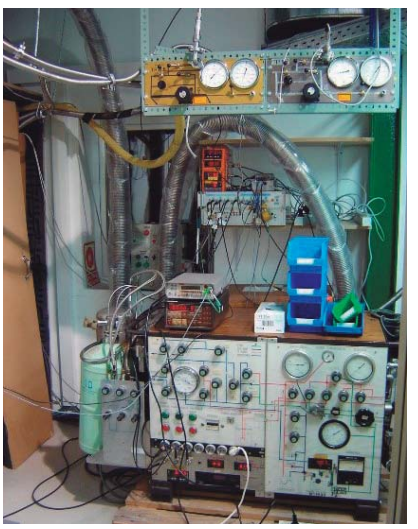


Fig. 9.4. El refrigerador de dilución dentro de la jaula de Faraday con el blindaje parcialmente instalado

10 NEXT

http://next.ific.uv.es/next/

El experimento NEXT tiene el objetivo de detectar la desintegración doble beta sin neutrinos en gas xenón, enriquecido en el isótopo ^{136}Xe. La señal de dicha desintegración es un pico en la distribución de la energía depositada por los dos electrones de la desintegración, que tiene que ser constante, ya que no hay neutrinos que se lleven parte de la energía. Por lo tanto, un buen experimento de $0\nu\ \beta\beta$ tiene que medir la energía con una excelente resolución y tener la capacidad de rechazar aquellos eventos de fondo cuya energía caiga dentro de la resolución alcanzada.

NEXT está formado por una cámara de proyección temporal a alta presión, esto es, un cilindro de acero lleno de 100 kg de xenón a 15 bares de presión en el que se aplica un campo eléctrico, y dos distintos planos de sensores que se utilizan uno para medir la energía y el otro para sacar una "foto" del evento. El principio de detección de NEXT se muestra en la figura 10.1.

Cuando una partícula cargada entra en el gas, deposita su energía interactuando de dos formas con las moléculas del gas. Por un lado, las moléculas pasan a un estado excitado, volviendo acto seguido a su estado normal emitiendo luz en el rango del ultravioleta. Los sensores detrás del cátodo del detector registran esta luz (llamada centelleo) y proporcionan el tiempo en el que empieza el evento. Estos sensores son fotomultiplicadores, aparatos que convierten la luz en corriente eléctrica. Por otro lado, la energía que la partícula deposita puede también extraer electrones de los átomos de xenón a través del fenómeno de la ionización. Estos electrones se mueven por efecto del campo eléctrico hacia una región con mayor intensidad de campo donde son acelerados y producen más centelleo (pero no ionización). Este proceso produce una amplificación de la señal, que crece linealmente con el campo eléctrico. Los fotomultiplicadores detectan esta luz secundaria y proporcionan una medida precisa de la energía del evento. En el extremo opuesto, la distribución de luz en otro plano más denso de fotomultiplicadores de silicio da, en cada momento, una imagen 2D del evento en una posición determinada en la dirección del campo eléctrico. Sabiendo el momento en que

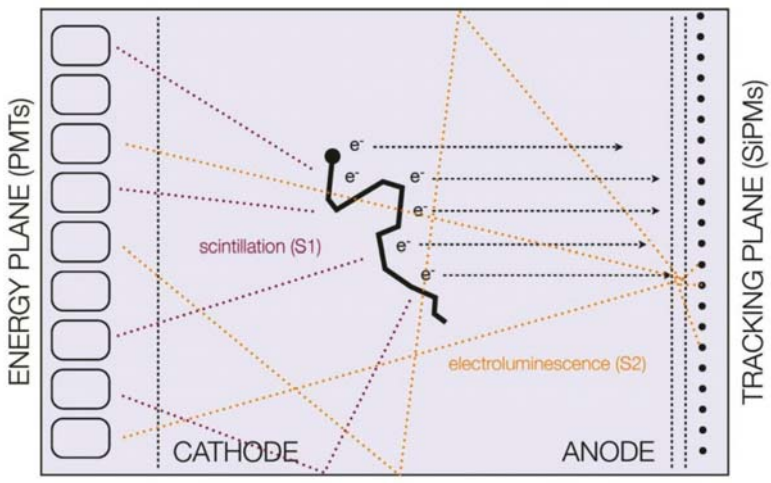


Fig. 10.1. El principio de detección de NEXT

Fig. 10.2. The NEXT-DEMO prototype at the IFIC Valencia

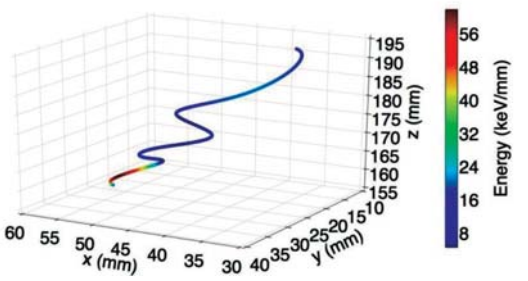


Fig. 10.3. Una traza de electrón reconstruida por el NEXT-DEMO

ha empezado el evento, se puede reconstruir la posición absoluta.

Este novedoso concepto de detección cumple con los requisitos indispensables de un experimento $0\nu\beta\beta$ que hemos mencionado antes. Por lo que se refiere a la resolución en energía, las fluctuaciones en la cantidad de electrones de ionización producidos y de luz de centelleo secundario son muy bajas. Por otro lado, en xenón a 15 bar es posible explotar la señal topológica del evento: los dos electrones del $0\nu\beta\beta$ dejan una traza con deposición de energía casi constante y dos grandes "blob" de energía en los dos cabos, debido a que los electrones siguen un recorrido más tortuoso cuando se quedan con poca energía. Esta señal es una herramienta muy potente para rechazar el fondo.

A partir de 2009 hasta hoy la colaboración NEXT ha estado llevando a cabo un intenso programa de R&D. Este programa ha culminado en la construcción y puesta en marcha de dos prototipos: NEXT-DEMO, un prototipo a gran escala, situado en el Instituto de Física Corpuscular de Valencia y NEXT-DBDM, un prototipo más pequeño que opera en LBNL, en Berkeley, y que ha sido utilizado para estudios detallados de resolución de energía.

NEXT-DEMO ha tenido el objetivo de probar el principio instrumental de NEXT: es una cámara de las mismas proporciones que el detector final y contiene 4 kg de xenón natural a 10 bares de presión. En la Fig. 10.2 se muestra el detector dentro de la sala limpia que lo acoge.

NEXT-DEMO ha estado funcionando con éxito durante más de dos años y ha demostrado: a); b); c) (véase la figura 3).

a. estabilidad de operación, sin fugas y con muy pocas chispas, incluso a alto voltaje

b. una resolución en energía mejor que el 1% una vez extrapolada a la energía del $0\nu\beta\beta$

c. capacidad de reconstruir trazas. (Fig. 10.3)

En julio de 2013 el investigador principal de NEXT ha conseguido un Advanced Grant del Consejo Europeo para la Investigación (ERC, por sus siglas en inglés). El comité científico del Laboratorio Subterráneo de Canfranc ha recomendado que se instale y se empiece a operar una primera fase de NEXT, con el 20% de los sensores del aparato final, con el doble objetivo de evaluar el modelo del fondo de NEXT a partir de los mismos datos y medir la desintegración doble beta con dos neutrinos, lo que será una clara demostración de la señal topológica de NEXT, única en el campo (la observación de dos electrones). Como consecuencia, la colaboración ha decidido construir una primera fase del detector NEXT, un aparato llamado NEW (NEXT-WHITE), en honor al Profesor James White, fallecido recientemente y uno de los científicos clave de la colaboración NEXT. Según nuestro plan, la construcción de NEW, así como la finalización de las infraestructuras necesarias en el LSC (que son las mismas para NEW y el detector final, NEXT-100) se llevarán a cabo a lo largo de un periodo de 12-15 meses. Por lo tanto, está previsto poner en marcha NEW y tomar datos durante 2015

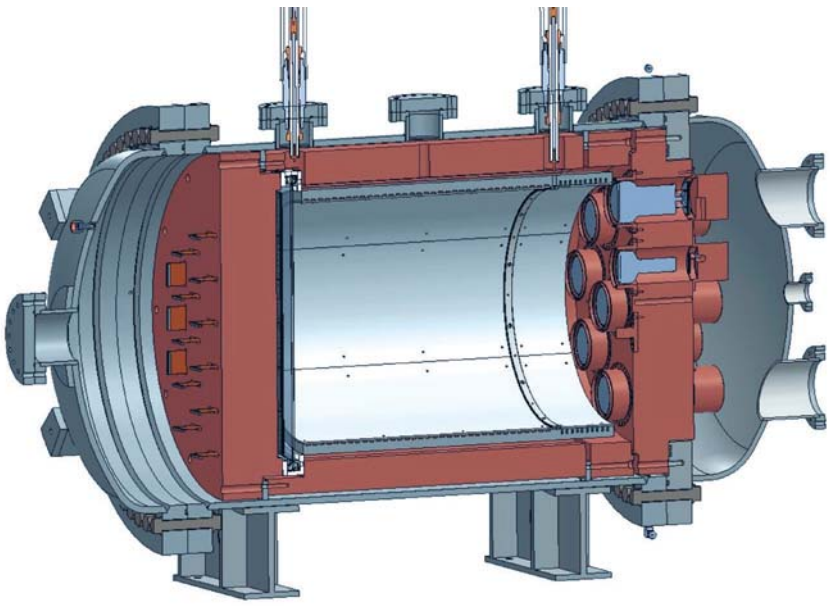


Fig. 10.4. La nueva cámara

y 2016, paralelamente a la construcción del detector NEXT-100. En la Fig 10.4 se muestra un esquema de NEW.

La desintegración doble beta sin neutrinos, si existe, es un evento extremadamente raro, con una vida media mayor que 10^{25} años. Para poder medirla, además de acumular una gran cantidad del isótopo que se desintegra, un experimento necesita proteger el detector de toda la radiación que pueda producir una señal similar a la de los dos electrones. Por esta razón, experimentos de este tipo se ponen bajo tierra, donde la misma tierra bloquea la mayor parte de la radiación que viene del exterior. Además, los materiales utilizados para construir el detector tienen que ser extremadamente radiopuros, con el fin de no introducir una ulterior radiación que pueda confundirse con una desintegración doble beta.

La instalación del detector final de NEXT en el LSC empezó a finales de 2012 con la construcción de la plataforma de trabajo y parte del sistema de gas. A lo largo de 2013 se ha diseñado la parte central de la plataforma, aislada sísmicamente, que soportará el detector y su protección, a la vez que la estructura que alojará la protección. Estas estructuras están en construcción y la previsión es que estén listas para la primavera de 2014. La protección consistirá externamente en ladrillos de plomo puro e internamente en cobre también puro, que es menos radioactivo que el plomo.

Actualmente se está llevando a cabo una campaña detallada de análisis de todos los materiales que se utilizarán en NEXT, midiendo la actividad de una muestra de cada uno con detectores de germanio.

La construcción de la cámara de acero se ha completado en Madrid, por parte de la empresa española Movesa y los otros componentes (la estructura que crea los campos eléctricos, el plano de energía, el plano de tracking, los feedthrough...) están siendo diseñados y construidos por distintos grupos de la colaboración.

La colaboración NEXT está formada por científicos internacionales de distintas universidades: Universidad Antonio Nariño (Colombia), Universidade de Aveiro and Universidade de Coimbra (Portugal); JINR (Russia); IFIC - Instituto de Física Corpuscular, Valencia; Universidad Autónoma de Madrid; Universitat de Girona; Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de Santiago de Compostela and Universidad de Zaragoza (España); Iowa State University, Lawrence Berkeley National Laboratories, Texas A&M University (EEUU).

11 BiPo

SuperNEMO es un experimento diseñado para la búsqueda de la desintegración doble beta sin neutrinos ($0\nu\beta\beta$) propuesto para ser instalado en la futura extensión del Laboratorio subterráneo de Modane (LSM) en Francia. En el proyecto se prevé la instalación de 100 kg de ^{82}Se distribuido en láminas muy finas. Las trazas de los electrones emitidos serán detectados mediante detectores de gas que se sitúan a cada lado de estas láminas, mientras que su energía se medirá utilizando centelleadores orgánicos. Estas láminas deben tener unos niveles muy bajos de radiactividad en ^{208}Tl y ^{214}Bi, isótopos que se producen en la desintegración de las cadenas naturales del ^{232}Th y el ^{238}U respectivamente. Los niveles de radiopureza requeridos para las láminas de 82Se son de 2 mBq/kg en ^{208}Tl (lo que representa menos de 5 desintegraciones de ^{208}Tl al mes por cada kilo de selenio) y 10 mBq/kg para el ^{214}Bi. Estos niveles de radiopureza tan bajos no pueden ser medidos mediante técnicas convencionales actualmente, como la espectrometría gamma con detectores de germanio. Es por ello que la colaboración SuperNEMO ha desarrollado el detector BiPo para medir y cualificar estas fuentes de selenio. BiPo debe ser operado en un laboratorio subterráneo. El detector, fue propuesto y aprobado para su instalación y operación en el LSC dentro de la colaboración existente entre los laboratorios subterráneos europeos (LNGS, LSC y LSM).

En BiPo, la muestra a medir es instalada entre dos centelleadores finos y muy radiopuros para medir la contaminación de ^{208}Tl y ^{214}Bi mediante la detección del denominado proceso BiPo. El ^{214}Bi sufre una desintegración b, emitiendo un electrón, al ^{214}Po, que es un emisor a con una vida media de 164 ms. El ^{208}Tl se evalúa mediante la medida de su padre, el ^{212}Bi, que sufre una desintegración b (en el 64 % de los casos) al ^{212}Po, un emisor a con una vida media de 0.3 μs. En ambos casos, el electrón y, mas tarde, la a emitidos durante los procesos, son detectados por los centelleadores situados a ambos lados de la muestra. Los dos procesos son diferenciados debido al diferente retraso entre la emisión del electrón y la α. El experimento comenzó con la construcción y operación de dos prototipos, BiPo-1 y BiPo-2, que fueron utilizados para desarrollar la técnica de detección. Finalmente el detector BiPo-3 fue ensamblado e instalado en el LSC.

BiPo-3 está compuesto de dos módulos independientes. Cada uno de ellos posee 40 centelleadores ultra-puros acoplados a fotomultiplicadores de baja radiactividad. Cada centelleador tiene un tamaño de 300 x 300 mm^2 y un espesor de 2 mm, lo que implica una superficie total de detección de 3.6 m^2. Cada uno de los módulos está cerrado herméticamente con una estructura y placas de acero, y son situados en el interior de un blindaje instalado en un tanque hermético de acero inoxidable. Los dos módulos de BiPo-3 fueron instalados en el LSC en julio y noviembre del 2012 respectivamente. El blindaje fue completado en enero del 2013 quedando el detector completamente operativo.

Las primeras medidas realizadas con BiPo, hasta mayo de 2013, tuvieron como finalidad la medida del fondo radiactivo del detector. Para ambos detectores se obtuvieron valores muy bajos de contaminación que satisfacen los requisitos para el experimento. Los valores obtenidos corresponden a una contaminación superficial de los centelleadores de ~1 μBq/m^2 en ^{208}Tl y ~5 μBq/m^2 en ^{214}Bi.

Estos niveles de fondo se pueden traducir en niveles de sensibilidad para la medida de fuentes de ^{82}Se de SuperNEMO, utilizando todo el detector BiPo, entre 5 y 8 μBq/kg en ^{208}Tl y 15 y 30 μBq/kg en ^{214}Bi, tras 6 meses de medida, lo que satisface los requisitos de estos elementos para

su instalación en SuperNEMO. Para obtener mejores niveles de sensibilidad y medidas más precisas, sería necesario realizar medidas más largas debido al bajo fondo radiactivo de este detector.

Las fuentes para SuperNEMO se componen de una mezcla que contiene el ^{82}Se colocado entre láminas de un material de baja densidad. Diferentes muestras de estos componentes se están midiendo en la actualidad en los dos módulos de BiPo para asegurar que cumplen los requisitos de radiopureza antes del montaje completo de las fuentes. Actualmente, BiPo es un detector único por su alta sensibilidad para medir muestras con una geometría de finas láminas. Por ejemplo, se está considerando la medida de radiopureza de algunos substratos utilizados en dispositivos y memorias microelectrónicas, ya que actualmente la contaminación natural de estos componentes es un factor limitante en el desarrollo de computadores.

Fig. 11.1. General view of the BiPo-3

Fig. 11.2. Assembling of one of the BiPo-3 modules in the underground clean room

12 SUPERKGd

En el Observatorio de Kamioka, bajo los Alpes Japoneses, Super-Kamiokande es un detector de enormes dimensiones que contiene 50000 toneladas de agua ultra pura en la que se crean las trazas de los leptones cargados (electrones y muones) producidos por las interacciones de neutrinos, mediante la luz que producen en el líquido. Super-Kamiokande entró en operación en 1996 y descubrió las oscilaciones de neutrinos en 1998. Super-Kamiokande sigue siendo el experimento de neutrinos de referencia, produciendo muy importantes resultados en Física y Astrofísica de partículas.

Aunque Super-Kamiokande sea el mayor telescopio de neutrinos de baja energía del mundo, sólo puede ver neutrinos de supernova si la explosión ocurre en nuestra galaxia o en las cercanas Nubes de Magallanes. Lamentablemente, tales explosiones suceden sólo unas pocas veces por siglo. Sin embargo, un número ingente de neutrinos de supernovas de épocas pasadas deambulan por el Universo y deberían poder ser detectados. El flujo de estos neutrinos de supernovas reliquia es constante, uniforme, pero relativamente pequeño. Son por ello, y por su baja energía (predicha), mucho más difíciles de distinguir.

Podemos mejorar la sensibilidad del detector mediante la detección del neutrón producido junto con el positrón en las interacciones beta inversa de los antineutrinos de baja energía, disolviendo en el agua una sal de gadolinio (Gd) a muy poca concentración. El núcleo de Gd tiene una gran sección eficaz (probabilidad) para la captura de neutrones, emitiendo el nuevo núcleo en su fase de estabilización rayos gamma observables. Esta sal de Gd debe tener una contaminación radioactiva muy baja. Super-Kamiokande ha establecido un programa específico de I+D para la implantación de la técnica Gd en el detector que incluye la construcción de un detector de prueba (200 toneladas) con todo el sistema de purificación del agua y tratamiento de Gd necesario, y una acción sistemática de caracterización, principalmente radioactiva, de los materiales relevantes.

El servicio de radio-pureza del LSC tiene una excelente reputación internacional tanto por la calidad de los detectores de Ge cómo por sus sistemas de análisis de datos. El equipo de la Universidad Autónoma de Madrid (U.A.M.) que participa en el experimento Super-Kamiokande y en su programa de I+D en Gd, presentó una propuesta, aprobada por el Laboratorio, para una serie de medidas de diferentes muestras de sales de Gd y otros materiales relevantes al programa.

Los resultados de los primeros lotes medidos dejaron claro que la contaminación radiactiva de las sales de Gd es un problema grave, siendo los valores actuales no aceptables para el experimento. Por ello se inició una exhaustiva búsqueda mundial de proveedores, todavía en curso, que ya está dando los primeros resultados positivos: se ha identificado al menos una fábrica capaz de producir sal de Gd con una contaminación radioactiva suficientemente pequeña.

Sin embargo, a los trabajos de la UAM en el LSC les queda un largo camino por recorrer. Tenemos que lograr un control en la producción de tal manera que la limpieza de las sales entregadas sea la rutina. Doscientas toneladas de sal de Gd se disolverán en Super-Kamiokande en la fase final del proyecto. Monitorizar su radio-pureza y cuantificar la contaminación residual en esta enorme cantidad de material es una parte crucial del proyecto Gd.

13 GEODYN

El LSC está situado en una de las zonas más activas sísmicamente de Europa Occidental, en la cordillera Pirenaica que marca el límite entre la placa Europea y la microplaca Ibérica. Además, el entorno del túnel subterráneo garantiza un nivel muy bajo de perturbaciones por ruido. Estas características hacen que el LSC sea particularmente apropiado e interesante para albergar un observatorio geodinámico integrado y avanzado para monitorizar con gran precisión la actividad sísmica local y regional, así como los procesos de deformación interna de la zona.

La infraestructura geodinámica en el LSC consiste en un sismómetro de banda ancha (BA), un acelerómetro, dos extensiómetros/interferómetros láser y dos estaciones GPS en modo continuo en el exterior. Esta instrumentación multidisciplinar permite efectuar estudios avanzados de fenómenos geodinámicos, tanto a escala local como global, en un rango espectral que abarca desde las ondas sísmicas de periodo corto hasta la deformación tectónica. Por ello, resulta de indudable interés para una amplia comunidad de investigadores en Ciencias de la Tierra.

La gestión de los instrumentos geofísicos se aborda en cooperación con equipos de expertos pertenecientes al Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera-CSIC Barcelona (sísmica), la Universidad de Salerno, Italia (interferómetros láser) y la Universidad de Barcelona (GPS en superfície). Los datos del Geodyn-LSC se integran en redes y bases de datos regionales y Europeas, dentro de proyectos a gran escala como Topo-Iberia y Topo-Europe, así como el programa EPOS (ESFRI hoja de ruta) de infraestructura de investigación, lo que asegura un muy amplio acceso científico a esta infraestructura geodinámica del LSC.

Componente Sísmica. Los dos sensores (sismómetro de banda ancha y acelerómetro) y el registrador instalados en el Lab780 L están totalmente operativos desde Junio de 2011, en que se implementó la sincronización temporal mediante la instalación de una antena de tiempo GPS en el exterior, cerca de la entrada del túnel, junto con el despliegue de un cable de fibra óptica de 800 m de longitud que transporta la señal de tiempo hasta el Lab780. Además, desde Julio de 2011, el equipamiento sísmico está conectado a internet, lo que permite el control remoto de sus componentes, así como la descarga remota de los datos registrados. El estado de los parámetros del equi-

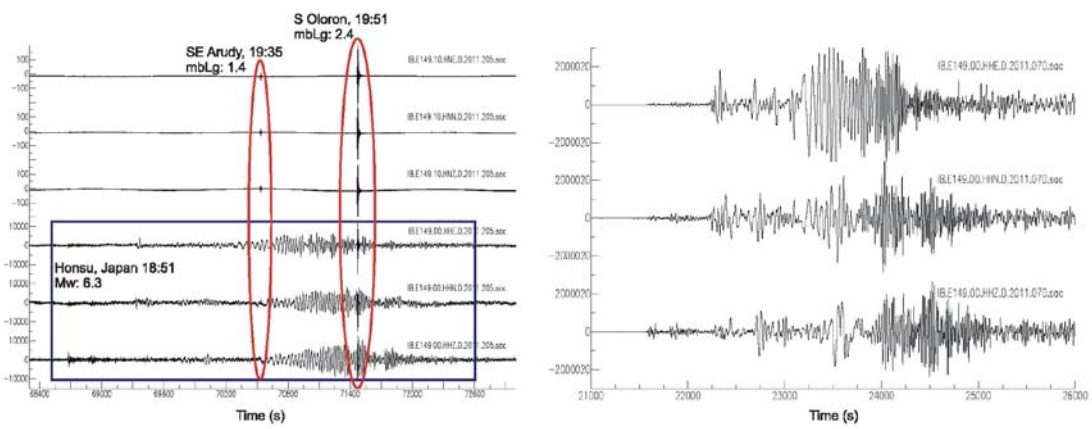


Fig. 13.1. Eventos sísmicos cercanos y lejanos

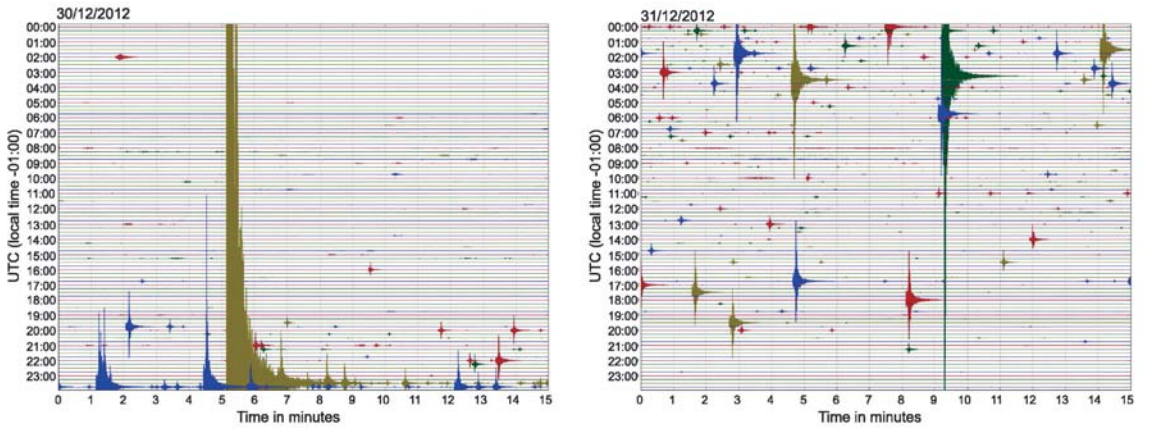


Fig. 13.2. Crisis sísmica cerca de Lourdes en 2012-1013 registrada en GEODYN

po y la visualización de las tres componentes es accesible online en la dirección:

http://193.146.122.114:8083/pages/taurus/status.page. La Figura 13.1 muestra algunos ejemplos de terremotos registrados en los instrumentos sísmicos de GEODYN. El panel izquierdo muestra dos eventos locales en los Pirineos, al norte del LSC, cada uno a unos 40 km de distancia de Canfranc, y un evento telesísmico en Japón registrado muy poco tiempo después (el panel muestra las 3 componentes del acelerómetro arriba y las 3 del sismómetro BA abajo). Panel derecho: gran terremoto de M= 9.0 en Tohoku-Japón (Marzo de 2011) registrado en el sensor BA. Longitud del registro 5000 s (~1.4h).

Otro ejemplo que puede mencionarse es una crisis sísmica en los Pirineos Franceses, a unos 40 km al noreste del LSC. Se desencadenó el 30 de Diciembre de 2012 a partir de un terremoto de M=4.7 acaecido al SO de la ciudad de Lourdes, a las 23h35 GMT. El evento principal fue precedido por al menos una docena de precursores en las horas previas, y seguido por centenares de réplicas en los días siguientes, según se muestra en los paneles de registro diario en el LSC (Fig. 13.2). Todos los registros muestran un nivel mucho menor de ruido de fondo debido a actividades humanas respecto de los registrados habitualmente en el exterior.

Los interferómetros LASER. Un interferómetro láser proporciona información de las variaciones de la tensión que experimenta una roca; es pues un 'tensiómetro' o extensiómetro. Ello se consigue midiendo la componente de tensión en la dirección del láser. Para tener la información en dos direcciones perpendiculares, se han instalado dos interferómetros en la galería 16 y en el Lab780L, respectivamente (Fig.13.3). Se encuentran operativos desde Diciembre de 2011. Los dos extensiómetros miden cambios de distancia entre dos extremos por medio de interferómetros ópticos de tipo Michelson. Los dos extremos de cada interferómetro están anclados en la roca, separados por unos 70 m. Dos foto-diodos miden la intensidad de la componentes polarizadas vertical y horizontalmente de una de las dos salidas de cada inteferómetro.

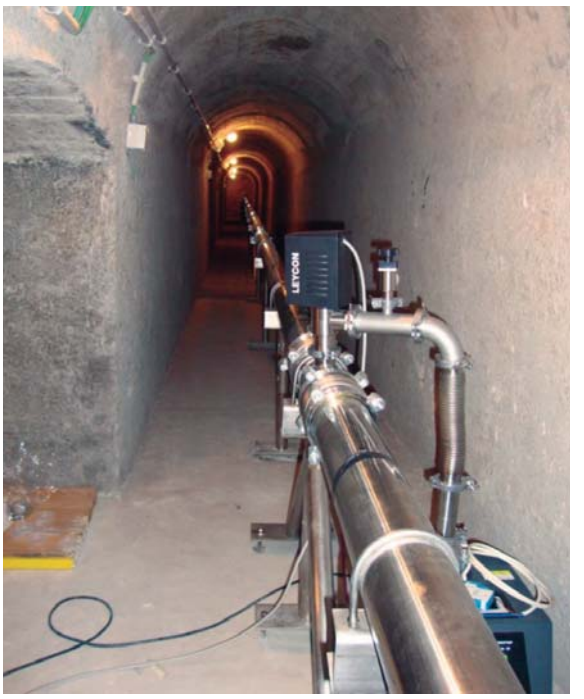


Fig. 13.3. El interferómetro en el Lab 780L

Señales Hidrológicas. Durante el procesado de rutina de los datos sísmicos, se detectó una signatura espectral inusual, que no se correspondía con las fuentes típicas de ruido sísmico y que podía reconocerse también en los registros de deformación. Hemos calculado el espectrograma de los datos en continuo para caracterizar mejor estos episodios, que tienen un contenido frecuencial bien definido, cada uno abarcando entre 2 y 8-10 Hz. Desde principios de 2011, se han identificado 4 episodios principales, cada uno con una duración entre 1-2 días y 6-8 días. La Fig.13.4 compara los datos sísmicos y los meteorológicos. El panel superior muestra la lluvia diaria en la estación meteorológica situada cerca del LSC. El panel intermedio muestra en rojo la descarga diaria máxima registrada en la estación de medición de caudal A271. El panel inferior representa el espectro de densidad de potencia de la componente sísmica vertical del sensor de BA, en el que los colores más cálidos corresponden a intervalos de altas energías. Las cajas en punteado negro marcan los eventos hidrológicos principales y su correlación con intervalos de niveles altos de energía sísmica en la banda de 2-10 Hz.

La ocurrencia de esos episodios no es regular en el tiempo ni está relacionada con variaciones en el nivel de ruido en la banda micro-sísmica, ocurrencia de sismicidad local o regional o cambios en el nivel de ruido cultural. Tras contrastar con los datos meteorológicos e hidrológicos, incluyendo la velocidad del viento, cantidad de precipitación y descarga en el rio, hemos podido relacionar estas señales con variaciones en el nivel de descarga en el río Aragón, un río de estilo Alpino en la vertiente sur de los Pirineos, situado a unos 400 m del equipamiento de GEODYN. Este hecho muestra que la monitorización continua sísmica y de deformación en el curso alto de un río Alpino permite investigar su evolución hidrológica, aún en el caso en que las descargas del río sean modestas.

Se han identificado tres tipos de eventos sísmicos generados por un río, relacionados respectivamente con episodios de precipitación moderada, estación de deshielo y grandes eventos de inundaciones asociados con tormentas severas. Cada uno de esos tipos presenta características diferenciadas, que permiten abordar la monitorización de características hidrológicas a partir del análisis de los datos sísmicos. Los registros en continuo de los datos sísmicos y de deformación son especialmente apropiados para estudios a largo plazo de las características de la época del deshielo en cuencas montañosas, ya que dan información sobre los ciclos diarios y estacionales, y no están expuestos a cambios en la geometría del flujo del río que pueden perturbar las medi-

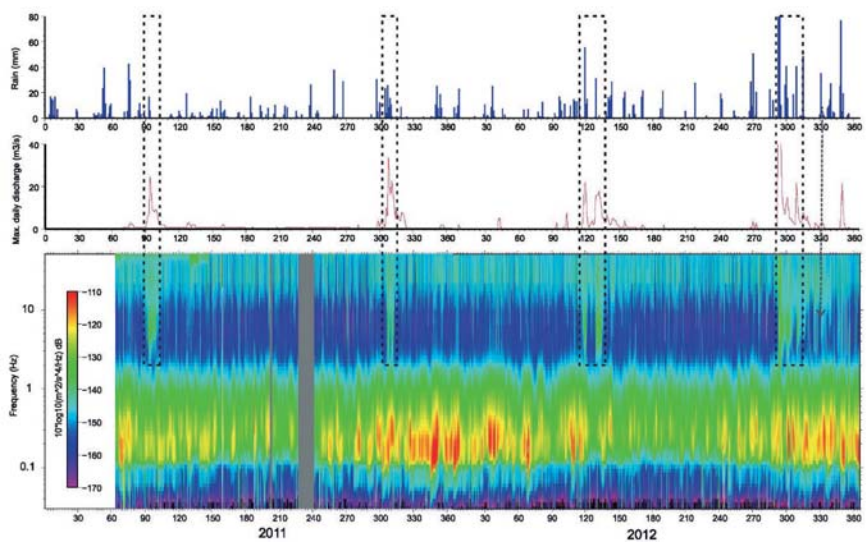


Fig. 13.4. Comparación entre datos sísmicos y meteorológicos. La escala de tiempo está expresada en días julianos

ciones de descargas en una estación de caudal hidrológico.

Las deformaciones detectadas por los interferómetros láser durante los periodos de ruido sísmico generado por un río pueden explicarse por el efecto de la infiltración del agua a través de la corteza más superficial y parecen relacionados directamente con la precipitación de lluvia. En casos de episodios fuertes o moderados de tales precipitaciones, se han detectado patrones de deformación distintos. En el primer caso, ambos instrumentos muestran extensión lo que indica que el gran volumen de agua infiltrada produce un aumento de la presión de poro y una dilatación global. En episodios moderados (menos de 50 mm de lluvia acumulada) la infiltración de agua sigue esencialmente las zones de papilla de fallas, aumentando la presión de poro en el interior de las mismas, provocando una compresión en la dirección perpendicular al trazado de la falla (interferómetro en el Lab780) y una expansión paralela a la misma (interferómetro en la galería 16).

Otros resultados recientes obtenidos por los interferómetros hacen referencia a la observación de mareas de carga no lineales. Las fuerzas de marea provienen de las fuerzas gravitatorias de la Luna y del Sol. Hasta una buena aproximación, podemos modelizar la respuesta de marea de una Tierra sin océanos, es decir, solamente de su parte sólida. Consideramos un modelo de Tierra SNREI (siglas en inglés de esférica, sin rotación, elástica e isótropa). La fuerza de marea tiene un periodo mucho más largo que cualquiera de los modos normales de oscilación de la Tierra, por lo que podemos usar una teoría cuasi-estática, asumiendo que la respuesta está en equilibrio.

Las observaciones de marea incluyen también los efectos de la marea oceánica. Incluso en una Tierra rígida la redistribución de masas en las marea oceánicas crearán señales debidas a la atracción del agua; en la Tierra real, esta redistribución provoca que la Tierra también se deforme. Tales señales inducidas se conocen como las mareas de carga, que se combinan con las mareas de cuerpo (volumen) para crear la marea total.

La Fig. 13.5 presenta el espectro de amplitud de la deformación registrada por los interferómetros instalados en la galería 16 y en el Lab 780 L. Debido a algunos 'gaps', los registros abarcan de hecho 1.5 años de duración. Las líneas de marea son visibles claramente hasta la sexta banda diur-

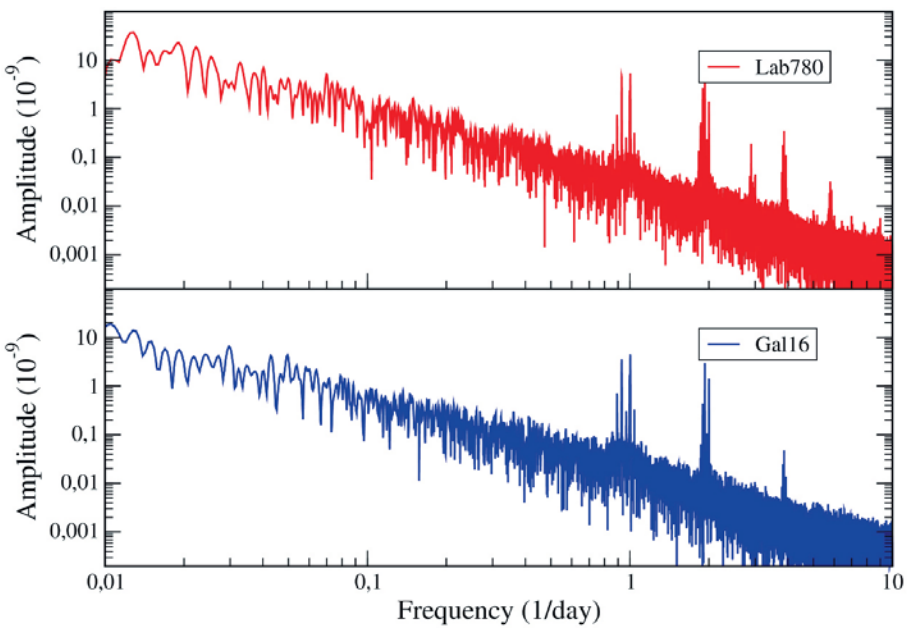


Fig. 13.5. Espectro de amplitud de la deformación registrada por los dos interferómetros

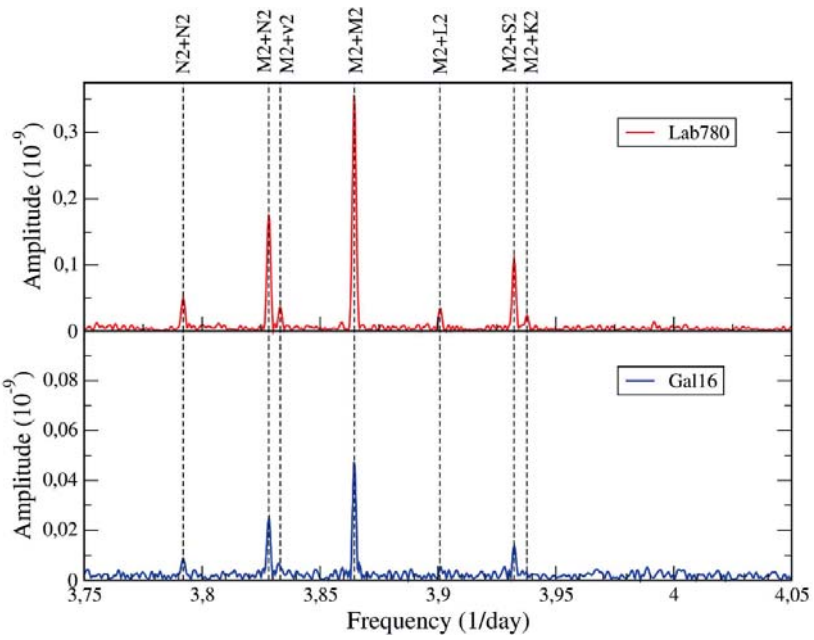


Fig. 13.6. Ampliación de una cuarta banda diurna

na (esto es, frecuencias cercanas a los 6 ciclos por día). En la Fig. 13.6 se muestra una ampliación en la cuarta banda diurna. Las mareas de volumen in la cuarta banda son muy pequeñas y las líneas visibles se relacionan con las mareas de carga. En el océano abierto, el espectro de mareas puede representarse normalmente por un número limitado de frecuencias bien definidas, primariamente en las bandas diurna y semi-diurna. No obstante, en regiones costeras, el espectro puede resultar mucho más complejo, debido a que las frecuencias diurnas y semidiurnas se entremezclan con un gran número de 'mareas de aguas someras', apareciendo frecuencias dentro de periodos largos, diurnas, semi-diurnas, ter-diurnas y de bandas superiores. Estas nuevas frecuencias son consecuencia de las interacciones no lineales entre las ondas de marea mientras se propagan en aguas someras. Además, respuestas de resonancia o cuasi-resonancia se añaden o la complejidad del patrón de marea, y tienden a intensificar los efectos no lineales. En altimetría, es muy difícil extraer otras componentes aparte de las M4. Por ello, los únicos datos oceanográficos que pueden utilizarse para validar loa modelos de mareas oceánicas no lineales a lo largo de la plataforma continental Nord-Ocidental de Europa son las mareas de caudal. No obstante, tales instrumentos están instalados normalmente en estaciones costeras y pueden ser representativos solamente de efectos muy locales. El análisis de datos de deformación registrados por los dos interferómetros geodésicos en el LSC es uno de los escasos métodos existentes para evaluar y validar los modelos no lineales de mareas oceánicas a mayores escalas espaciales. La relación señal-ruido para estos datos de deformación resulta incluso superior a la de mediciones gravitatorias de alta precisión.

La componente GPS. Se han revisto dos estaciones continuas GPS para monitorizar las deformaciones en el entorno del área del túnel desde el exterior. Los elementos básicos de cada estación son una antena 'choke-ring' de alta precisión, el receptor-registrador, sistema de alimentación, comunicación-acceso remoto al equipo y accesorios diversos. Las redes de GPS en continuo miden el desplazamiento de una serie de marcaciones respecto de una de referencia; la distancia entre marcas es del orden de kilómetros. Hasta ahora, nos encontramos en la fase de permitajes para los dos emplazamientos GPS previstos.

14 CUNA

Durante la nucleosíntesis del Big Bang se formaron el hidrógeno, el helio y otros elementos en pequeñas cantidades. Estas especies se convirtieron en los componentes de la primera generación de estrellas. A partir de aquí procesos nucleares cada vez más complejos en el interior de las estrellas son los responsables de la síntesis de especies más pesadas. Es en estos hornos nucleares donde ha tomado forma, y todavía lo hace, el patrón de la abundancia química del Universo. La mayoría de los isótopos más ligeros que el hierro se producen por reacciones de captura de neutrones, que tienen lugar en muy diferentes entornos astrofísicos. Por un lado, se piensa que la captura rápida de neutrones *(el proceso r)* ocurre en un cierto tipo de supernovas, mientras que la captura lenta de neutrones *(el proceso s)* se produce en las gigantes rojas en la rama asintótica de las gigantes (AGB) *(componente principal)* o en estrellas masivas *(componente débil)*. Se cree que el proceso de s produce cerca de la mitad de los isótopos más ligeros que el hierro. Sin embargo, una importante cuestión aún sin esclarecer es el origen del flujo de neutrones estelar requerido para producir este tipo de reacciones. Particularmente importantes son los procesos (α,n) en los que un núcleo dado N captura una partícula alfa para producir un núcleo N' con tres nucleones más, además de liberar un neutrón. Tal proceso se escribe N(α,n)N'. Las reacciones más probables de este tipo son ^{22}Ne(α,n)^{25}Mg y ^{13}C(α,n)^{16}O, dependiendo de la situación específica del proceso s. La sección eficaz de reacción es una cantidad proporcional a la probabilidad de que la reacción tenga lugar.

La energía cinética de los núcleos atómicos en las estrellas corresponden a la temperatura del entorno estelar y es muy baja para los estándares nucleares. Este rango de energía se llama pico de Gamow. Cuando dos núcleos se aproximan tienden a repelerse porque ambos tienen carga positiva, y sólo en raras ocasiones se puede alcanzar la corta distancia necesaria para que ocurra una reacción nuclear. De hecho las secciones eficaces dependen de la energía y disminuyen muy rápidamente al bajar la energía, llegando a ser extremadamente pequeñas en el pico de Gamow. La medida de la mayoría de las secciones eficaces necesarias para comprender los procesos astrofísicos no se puede realizar en los laboratorios de física nuclear habituales debido a la interferencia de los rayos cósmicos que producen radiación de fondo a tasas mucho mayores que las de las reacciones de interés. Tenemos que trabajar en un laboratorio subterráneo. Desde hace varios años existe una de estas instalaciones, la infraestructura LUNA en el laboratorio subterráneo de Gran Sasso en Italia (LNGS - INFN). Sin embargo, una sola instalación no es suficiente para cubrir todo el programa científico, teniendo en cuenta que la medida experimental de una sola sección eficaz lleva varios años de trabajo. Por eso se desarrolló el proyecto de Canfranc Underground Nuclear Astrophysics (CUNA).

Una "Expresión de Interés" titulada "Una instalación de Astrofísica Nuclear para LSC: las fuentes de neutrones en las estrellas y otras reacciones de interés astrofísico" se presentó al LSC en 2009 por grupos españoles y socios internacionales. Más tarde, en octubre de 2012, se ha presentado al comité científico una "Carta de Intenciones" respaldada por más de 50 cartas de apoyo internacional. En paralelo, la LSC ha llevado a cabo estudios preliminares para excavar una nueva nave experimental cerca de las instalaciones subterráneas ya existentes. Esta

nave acogerá un acelerador lineal de iones y los detectores de los experimentos que utilizarán la instalación a lo largo del tiempo. El acelerador ha de tener una energía máxima de unos pocos MV, para así solaparse con las medidas a altas energías, y tiene que proporcionar un haz de alta intensidad con muy alta estabilidad y fiabilidad.

El acelerador de alta corriente es el caballo de batalla de la instalación propuesta, ya que la alta intensidad del haz hace posible medir las tasas de cuentas tan bajas para las reacciones propuestas, aunque esto pueda plantear algunos desafíos en términos de operación y estabilidad de los blancos de reacción. Además, es de suma importancia lograr un funcionamiento controlado con muy bajo rizado en la tensión de operación, puesto que así se hace un uso eficiente del tiempo de haz y se tiene un conocimiento preciso de la energía del haz y de su intensidad. Se prevé la instalación de dos estaciones experimentales con dos líneas de haz independientes, con el fin de poder realizar medidas en una mientras se ponen a punto los dispositivos de medida en la otra.

Un haz de iones de energía suficiente se convierte en una fuente de neutrones originados por reacciones nucleares. Con un haz de alfas (y protones) de una energía máxima de 3 MeV los canales de producción de neutrones están abiertos sólo para un número limitado de isótopos estables. Se han realizado simulaciones numéricas para evaluar la atenuación del fondo de neutrones por la roca. Nuestros resultados muestran que un metro de roca reduce el flujo en tres órdenes de magnitud. En consecuencia, los neutrones no afectarán experimentos instalados en otras salas. Por otra parte, los neutrones no deben escapar por el acceso a la sala experimental. Para este fin, la entrada se ha diseñado como un laberinto de dos paredes con muros de 2 m de grosor. Las paredes de la sala y de los túneles están cubiertos con 40 cm de hormigón. Con esta configuración simulaciones numéricas muestran que los neutrones que podrían escapar no suponen un problema.

La colaboración CUNA también ha evaluado la instrumentación para las medidas experimentales. El valor extremadamente bajo de las secciones eficaces hace necesario tanto una alta efi-

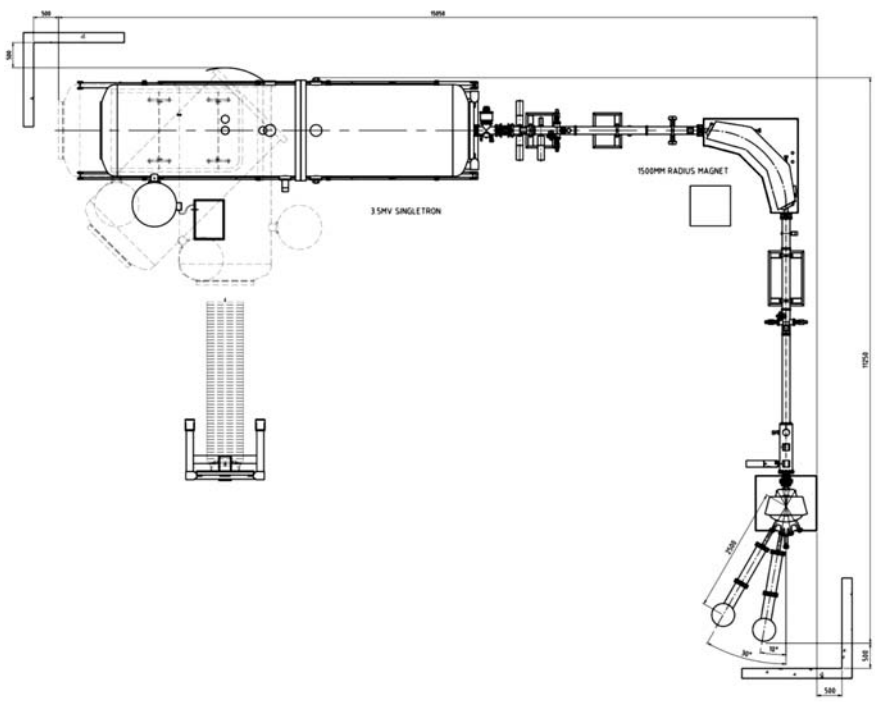


Fig. 14.1. Posible distribución de la instalación del acelerador (3.5 MeV Singletron by HVee, The Netherland)

ciencia de detección como una alta capacidad de discriminación para el canal de reacción de interés. El meollo del programa experimental propuesto en CUNA son las reacciones (α,n). Un detector de neutrones basado en contadores proporcionales de ^{3}He alojados en una matriz de polietileno, que actúa como moderador de la energía de los neutrones, es el candidato más prometedor. Este detector aúna una eficiencia de detección del orden de 50 %, una señal muy limpia de los eventos de neutrones además de relativa insensibilidad a otros tipos de radiación. Un detector parecido, con 20 tubos dispuestos en dos anillos alrededor de un agujero longitudinal central de radio de 5,5 cm, se ha construido recientemente por una colaboración española para la medición de neutrones emitidos tras la desintegración β, y podría ser fácilmente adaptado a las mediciones en CUNA. Seis de los tubos han sido ya utilizado para medir el fondo de neutrones en la sala A de la LSC, como se describe en la sección 5.

Durante el transcurso del proyecto se han organizado varias reuniones para discutir su viabilidad, el programa de la Física y las perspectivas futuras de la instalación CUNA. Comenzaron con la reunión internacional "Oportunidades para Astrofísica Nuclear en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc" (febrero de 2009) en Barcelona, seguida de "Fondo y simulaciones para CUNA " (diciembre de 2010) en Zaragoza y, finalmente, "Astrofísica Nuclear en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc", en marzo de 2012 en el propio LSC. Este congreso internacional es el último de una serie de reuniones europeas dedicadas a la exploración de las perspectivas de los experimentos en astrofísica nuclear en los laboratorios subterráneos existentes o planeados. Un objetivo fundamental era contribuir al desarrollo del proyecto CUNA para ponerlo en un contexto internacional, mediante la solicitud de los consejos y las opiniones de los principales astrofísicos nucleares de fuera de España.

PUBLICACIONES

ANAIS

J. Amaré et al., Journal of Physics (Conference Series) 203 (2010) 012044

J Amaré, PoS(IDM2010) 020

N. Coron et al. Astroparticle Physics **47** (2013) 31

C. Cuesta et al. Optical Materials **36** (2013) 316

J. Amaré et al. AIP Conf. Proc. **1549** (2013) 165

S. Cebrián et al. Astroparticle Physics **37** (2012) 60

J. Amaré et al. Journal of Physics (Conference Series) **375** (2012) 012026

J. Amaré et al, PoS (IDM2010) 020, 2011

ROSEBUD

M. Martínez et al., International Journal of Modern Physics: Conference Series **23** (2013) 324.

N. Coron et al., Journal of Physics: Conference Series 375 (2012) 012018

M. Martínez et al., Journal of Physics: Conference Series 375 (2012) 012025

N. Coron et al., Journal of Physics: Conference Series 203 (2010) 012038.

N. Coron et al., Journal of Physics: Conference Series 203 (2010) 012139.

N. Coron et al., PoS(IDM2010)054.

Y. Ortigoza et al., Astroparticle Physics 50-52 (2013) 11

N. Coron et al., Eur. Phys. J.A 48:89 (2012) 1

C. Ginestra et al., Journal of Low Temperature Physics **167** (2012) 973

Y. Ortigoza et al., Astroparticle Physics **34** (2011) 603.

BIPO

H. Gomez, AIP Conf. Proc. **1549**, 94 (2013)

J. Argyriades et al., Nucl. Inst. Meth. A **622**, (2010) 120

H. Gomez, Nucl. Inst. Meth. A (2012)

NEXT

V. Álvarez et al., AIP Conf. Proc. 1549, 46 (2013).

J.J. Gómez-Cadenas et al., JINST **7** (2012) C11007.

N. Yahlali et al., JINST **8** (2013) C01003.

T. Dafni, J. Phys.: Conf. Ser. 309 012009.

J. Martín-Albo, J. Phys.: Conf. Ser. 259 012040.

A. Tomás Alquézar, PoS (ICHEP 2010) 316.

H. Gómez Maluenda, PoS (IDM 2010) 104.

N. Yahlali, et al. Nucl. Inst. and Meth. A **628** (2011) 162

The NEXT Collaboration, JINST **8** (2013) P09011.

The NEXT Collaboration, JINST 8 P05025 (2013).

The NEXT Collaboration, JINST 8 P04002 (2013).

The NEXT Collaboration, Nuclear Inst. And Methods A (2013) 101.

The NEXT Collaboration, JINST 8 T01002 (2013).

J. J. Gómez-Cadenas et al., JCAP 02 (2012) 037.

The NEXT Collaboration, JINST **7** P02010 (2012).

J. J. Gómez-Cadenas et al., Riv. Nuovo Cim. **35** (2012) 29-98.

C.A.B. Oliveira et al. JINST 6 P05007 (2011).

J. J. Gómez-Cadenas et al., JCAP 1106 (2011) 007.

S. Cebrián et al., Astropart. Phys. **34** (2011) 354.

L. M.P. Fernandes et al., JINST 5 P09066 (2010).

E.D.C. Freitas et al., Physics Letters B 684 (2010) 205–210.

S. Cebrián et al., JCAP 10 (2010) 010.

ArDM

A. Badertscher et al., JINST 8:C09005, 2013

A. Badertscher et al., JINST 8:P04012, 2013

A. Badertscher et al.,JINST 7:P08026 (2012)

F. Resnati et al., PoS IDM2010:108 (2011)

S. Horikawa, et al.J.Phys.Conf.Ser. 308:012027 (2011)

A. Marchionni et al., J. Phys. Conf Ser. 308:012006 (2011)

C. Amsler et al. JINST 5:P11003 (2010).

P. Otyugova for the ArDM collaboration. AIP Conf. Proc. **1241** (2010) 435.

M. Haranczyk et al. Acta Phys.Polon. **B41** (2010) 1441.

C. Regenfus for ArDM the collaboration. J.Phys. Conf.Ser. **203** (2010) 012024.

CUNA

D. Jordán et al., Astroparticle Physics **42** (2013) 1–6 B. Gomez-Hornillos et al., J. Phys: Conf. Ser. 312 (2011) 052008

GENERAL

A. Bettini, in "Predicted and totally unexpected in the energy frontier opened by LHC" edited by A. Zichichi. Pag. 451-467. World Scientific 2011

A. Bettini, in "The most unexpected at LHC and the status ofthe high energy frontier" edited by A. Zichichi. World Scientific" edited by A. Zichichi. World Scientific 2012

A. Bettini , NIM A **626-627** Suppl. (2011) S1-S5

A. Bettini, NIM A **626-627** Suppl. (2011) S64-S68

A. Bettini, NIM A **626-627** Suppl. (2011) S72-S83

A. Bettini, EPJplus **127** (2012) 112

A. Bettini, EPJplus **127** (2012) 114

A lo largo del 2013 los usuarios del LSC han realizado 18 presentaciones en Conferencias Internacionales

Además se han realizado en total 22 Tesis Doctorales relacionadas con los experimentos

ÓRGANOS DE GOBIERNO

Consejo Rector

María Luisa Castaño, Directora General de Innovación y Competitividad, MINECO (Presidenta)

Ángela Fernández Curto, Subdirectora Adjunta de Planificación de Infraestructuras Científicas y Tecnológicas, MINECO

Manuel Lozano, Coordinador del Área de Ciencia y Tecnologías Físicas del CSIC, MINECO

Miguel Ángel García Muro, Director General de Investigación e Innovación, DGA (Vicepresidente)

Cristina San Román Gil, Secretaria General Técnica del Departamento de Industria e Innovación, DGA

Luis Miguel García Vinuesa, Vicerrector de Política Científica, UNIZAR

Pilar Zaragoza Fernández, Vicerrectora de Transferencia e Innovación Tecnológica, UNIZAR

Comisión Ejecutiva

Ángela Fernández Curto, Subdirectora Adjunta de Planificación de Infraestructuras Científicas y Tecnológicas, MINECO

Francisco Herrada Martín, Jefe del Área de la Subdirección General Adjunta de Planificación de Infraestructuras Científicas y Tecnológicas, MINECO

Cristina San Román Gil, Secretaria General Técnica del Departamento de Industria e Innovación, DGA

Miguel Ángel García Muro, Director General de Investigación e Innovación, DGA

Luis Miguel García Vinuesa, Vicerrector de Política Científica, UNIZAR

Eduardo García Abancéns, Investigador Universidad de Zaragoza (GIFNA)

COMITÉS ASESORES

Comité Científico Internacional

David Sinclair (Chairman) - Carleton University (Canada)

Frank T. Avignone - University of South Carolina (USA)

Concha González-García- Universidad de Barcelona (Spain); State University of Stonybrook (New York)

Ariella Cattai - CERN, Geneva (Switzerland)

Yoichiro Suzuki – ICRR, Universidad de Tokio; Director del Kamioka Observatory (Japan)

Antonio Bueno Villar- Universidad de Granada, Granada (Spain)

Cristiano Galbiati - Princeton University, New Jersey (USA)

Andrea Giuliani - CSNSM, Orsay Campus (France)

Berta Rubio Barroso - CSIC, Instituto de Física Crepuscular, Valencia (Spain)

Comité de Acceso

José Angel Villar Rivacoba (President), LSC Associated Director

Andrés Gadea Martí, Scientific Committee Member

Eduardo García Abancens, Executive Board Member

Iulian Bandac, Responsible of the RMS Service

Silvia Borjabad Sánchez, Responsible of the CES and CRS Services

LSC

Laboratorio Subterráneo de Canfranc

Universidad Zaragoza

1542

GOBIERNO DE ARAGON

Departamento de Ciencia, Tecnología y Universidad

GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD