



MEMORIA ANUAL 2014

EDICIÓN

Alessandro Bettini Yolanda Labarta

FOTO DE PORTADA:

Hall A, LSC

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



PRESENTACIÓN DEL DIRECTOR		
1. INTRODUCCIÓN 5		
2. UN POCO DE HISTORIA		6
3. ESTADO ACTUAL DEL LSC		8
4. INFRAESTRUCTURAS		
5. CARACTERÍSTICAS		15
6. LA CIENCIA		19
	NEUTRINOS	19
	MATERÍA OSCURA	20
	GEOLOGÍA	22
	HIDROLOGÍA	22
	BIOLOGÍA	22
7. ANAIS		23
8. ARDM		
9. NEXT		
10. BIPO		
11. SUPERKGD		35
12. GEODYN	I	
13. CUNA		42
14. GOLLUM		45
15. SOBRE EL LSC		47
	PUBLICACIONES EN PRENSA	47
	ÓRGANOS DE GOBIERNO	48
	COMITÉS ASESORES	48



Laboratorio Subterráneo de Canfranc Paseo de los Ayerbe s/n Canfranc Estación 22880 (Huesca) ESPAÑA http://www.lsc-canfranc.es Tel: +34 974 373474



PRESENTACIÓN DEL DIRECTOR

El Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) 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. La colaboración actual correspondiente y Convenio de financiación finaliza en el 2015, aunque ya se prevén los procedimientos para su renovación.

El LSC 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. Uno de los experimentos, ROSEBUD, se ha completado. Los experimentos en laboratorios subterráneos transcurren a lo largo de varios años y van evolucionando a través de distintas fases. El progreso de los experimentos en el LSC será descrito detalladamente en los capítulos destinados a ello. Hacemos una breve mención aquí a que: el LSC pidió en Noviembre un nuevo prototipo de detector Nal, que pretende reducir el K y ²¹⁰Pb más bajo que los anteriores, a una empresa especializada y que se prestará al experimento ANAIS; ArDM ha pasado a la fase de toma de datos, en la fase de gas, en Mayo y comenzó en Noviembre con el llenado del detector con Ar liquido; en NEXT se completaron la parte central de la plataforma de asilamiento sísmico,

que sujetará el detector, su blindaje y el "castillo" que alberga el blindaje y la vasija de acero inoxidable fue entregada en el LSC y en cuanto a GEODYN, BiPo y SUPERKGD siguieron con su toma de datos habitual.

Una nueva propuesta sobre biología a gran profundidad, GOLLUM, se presentó en el 2014 y se encuentra bajo examen. Además, se está estudiando un proyecto, CUNA, de ampliación para albergar una instalación de astrofísica.

El Consejo de Política Científica, Tecnológica y de Innovación aprobó el 7 de octubre de 2014 la actualización del Mapa de Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS). El nuevo Mapa está integrado por 29 ICTS que aglutinan un total de 59 infraestructuras (56 operativas y 3 en construcción). Esta actuación está recogida en la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación como herramienta de planificación y desarrollo de estas infraestructuras en coordinación con las Comunidades autónomas. Para la actualización del Mapa se han tenido en cuenta criterios de máxima calidad científica, tecnológica y de innovación, sometiendo a las infraestructuras candidatas a un riguroso proceso de evaluación independiente. Además, estas infraestructuras deben tener garantizada su sostenibilidad económica.



El Laboratorio Subterráneo de Canfranc, habiendo conseguido una evaluación excelente, se mantiene en el Mapa de ICTS Como infraestructura de localización única, dentro del área de Astronomía y Astrofísica.

Laboratorios, oficinas y salas de reuniones se encuentran 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 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, Marzo 2015

$\left(1\right)$

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. En el 2015 el LHC se reiniciará con casi el doble de energía. 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. Ambas localizaciones han sido ahora renovadas e integradas al nuevo LSC y se les denomina Lab 780 L y Lab 780 R. Cada uno de



Fig. 2.1. La Estación de Canfranc

ellos consiste en una pequeña sala (12 m²) 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 m² 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. Esta 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.

Los trabajos se habían completado para el verano del 2010. Paralelamente un edificio para los servicios externos fue diseñado y construido, siendo este completado en Enero del 2011.



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



Figs. 2.3. Trabajos de excavación

B ESTADO ACTUAL DEL LSC

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, 9 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 y ArDM 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 LSM cerca 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. También la propuesta GOLLUM dedicada a estudios de ecología en extremófilos.

El número total de usuarios en el 2014 ha sido de 258, de 19 países distintos.



Un total de 258 usuarios de 19 países distintos

Fig. 3.1. Usuarios del LSC por país en el 2014

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.

Los principales servicios subterráneos generales (Servicio de Radiopureza y de Servicio de Sala Blanca) y su evolución en el 2014 serán descritos en el siguiente capítulo. Otras inversiones importantes durante este año han sido dedicadas a:

• El pedido por el LSC de un nuevo prototipo de detector Nal con características mejoradas de radio-pureza a la empresa Alpha Spectra en noviembre que será entregado en préstamo al experimento ANAIS. Este pedido llegó tras conversaciones en profundidad con la empresa, siguiendo el trabajo de la Colaboración de ANAIS en dos prototipos producidos por Alpha Spectra en el 2012, que no habían alcanzado los altos niveles de pureza necesarios para el experimento.

• La construcción de la plataforma sísmica y el "castillo" para el blindaje de Pb que sujeta, para NEXT, la adquisición de Pb en préstamo otorgado por el INFN de Italia, y la producción de ladrillos de Pb para el blindaje.

• La instalación de las infraestructuras derivadas del análisis de riesgos del experimento ArDM (limitación de la evaporación del Ar líquido, sistema de extracción de gas Ar, sistemas de monitorización de temperatura y oxígeno, etc.).

• La culminación del diseño e instalación del sistema de "slow control" para monitorizar los parámetros relevantes para mantener la integridad de las infraestructuras.

• La adquisición de un detector gamma de ioduro de sodio portátil.

• La renovación del sistema de bombeo de los interferómetros de GEODYN.

Los experimentos subterráneos a menudo requieren que diferentes fases de su evolución se desarrollen en una atmosfera "libre de Radón". Para poder cumplir este requisito, el LSC desarrolló y presentó un proyecto para un "Sistema de Reducción de Radon" y cuya financiación fue aprobada en el marco de la financiación FEDER.

El LSC es uno de los cuatro laboratorios subterráneos a gran profundidad en la Union Europea, junto con el Laboratorio Nazionale del Gran Sasso en Italia, el Laboratoire Subterraine de Modane en Francia y el Boulby Underground Laboratory en el Reino Unido. Se ha continuado con las actividades de coordinación en el 2014, con el objetivo de optimizar el uso de los recursos existentes en los cuatro laboratorios. En el marco del Horizon 2020, el proyecto DULIA para la integración de los laboratorios, bajo la acción INFRAIA, y el "Multi-Deep Multidisciplinary and Innovative Training in Deep Underground Labs", bajo las acciones "Marie Skłodowska Curie'', fueron desarrollados y presentados. Además, el LSC representa a España en el APPEC (AstroParticle European Consortium), el Consorcio Europeo que coordina la investigación en física de astropartículas y tiene la responsabilidad específica de la gestión de su página web.

Desde el verano del 2014 la estación sísmica GEODYN está plenamente integrada en el modelo EIDA albergada en la central de datos ORFEUS (Observatories and Research Facilities for European Seismology) proporcionado acceso abierto a datos sísmicos en un tiempo casi real a la comunidad sísmica. (http://www.orfeus-eu.org/eida).

El edificio histórico conocido como "Casa forestal de los abetos", propiedad del Gobierno de Aragón, se encuentra situado junto al edificio externo del LSC. En Abril del 2014 la casa se puso a disponibilidad del LSC por parte del Gobierno de Aragón para sus actividades complementarias, incluyendo reuniones científicas y conferencias,



Fig. 3.2. Impresión artística de la casa de los abetos rehabilitada

actividades de alcance y demás. Con este objetivo, teniendo en cuenta también el mal estado de conservación del edificio, se desarrolló un proyecto de rehabilitación. Los trabajos de rehabilitación se prevén para el 2015. La Fig. 3.2 es una vista artística de la casa de los abetos rehabilitada.

En el LSC se organizan diversos Talleres y Conferencias. Durante el 2014 el LSC organizó o albergó los siguientes:

- Ier Meeting en Axion Dark Matter con la proyección del documental: "Neutrino, measuring the unexpected" featuring the LSC director.
- Reunión anual de RENATA: "La Física de Astropartículas en España a la vista del Horizon 2020".
- VII Curso sobre infecciones y tratamiento de soporte en el paciente oncohematológico.



Fig. 3.3. Posters de Eventos en el LSC en el 2014

El LSC tiene un programa de visitas, con 1090 visitantes en el 2014.



Fig. 3.4. Visitas al LSC

Casi 4000 personas han visitado ya el laboratorio desde que comenzaron a realizarse las visitas en el año 2010.



Fig. 3.5. Número de visitas al LSC en los distintos años



Fig. 4.1. Muestra un mapa de las infraestructuras subterráneas en el Lab 2400.

La Fig. 4.1 muestra el mapa de las infraestructuras subterráneas. El Hall A, con unas dimensiones de $40 \times 15 \times 12$ m³, 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 se está instalando NEXT a la izquierda.

El Hall B, de 15×10×8 m³, alberga a ANAIS en la caseta de la derecha que se muestra en la Fig. 4.3. La caseta de la izquierda, que tiene una jaula de Faraday en su interior, albergó el experimento ROSEBUD que ha finalizado.



Fig 4.3. Casetas de ANAIS y el finalizado ROSEBUD en Hall B



Fig. 4.2. Vista panorámica del Hall A



Fig. 4.4. Hall C con detectores de Germanio



Fig. 4.5. Izquierda: Interior de un detector durante su montaje en su blindaje de cobre y plomo. Derecha: Apertura del blindaje mediante la elevación de la tapa

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. Durante el 2014 tres de los detectores fueron mejorados con una nueva estructura del blindaje. Los blindajes nuevos tienen 5 cm de Cu adicional que se suman a un total de 10 cm de Cu y 20 cm de Pb. Este blindaje adicional ha contribuido a reducir el fondo de los detectores a bajas energías. También se diseñó e instaló una tapa que se puede levantar con la ayuda de una grúa eléctrica (ver Fig. 4.5 derecha). Este sistema de apertura reduce considerablemente el tiempo necesario para el cambio de la muestra, minimizando de esta manera la exposición de la región de detección al Rn que se encuentra en el aire en el exterior de la caja

anti-radón hecha de metacrilato. El Servicio de radiopureza se ofrece también a usuarios externos (servicio RMS).

El Servicio de Sala Blanca consta de un ambiente limpio de unos 45 m² de clasificación ISO 7 e ISO 6 en el sector y se ofrece tanto para los experimentos del LSC como a 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 m² y un volumen total de 10 000 m³.

El edificio sede en el exterior tiene aproximadamente 1800 m² 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

4 www.lsc-canfranc.es

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. Recientemente, se ha efectuado la instalación y la puesta en marcha del Servicio de Electroformación de Cobre en el Laboratorio de Química del Edificio Sede del LSC. La técnica de electroformación permite obtener, mediante un proceso electrolítico, piezas de cobre de geometría desmoldeable, con excelente homogeneidad y calidad superficial, y elevados niveles de pureza, de gran utilidad en este tipo de aplicaciones científicas del LSC al ser aislados del fondo radiactivo gamma.

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).





Pieza de cobre durante el proceso de electroformación y pieza final tras su rectificado.

Instalación de electroformación

CARACTERÍSTICAS

Existe un número de características de un laboratorio subterráneo 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. Además, se toman medidas de convergencia periódicamente en las localizaciones más críticas.

En el 2014 se ha instalado un completo sistema de monitorización. Monitoriza tanto los parámetros medioambientales del laboratorio (temperatura, humedad, calidad de aire, actividad de radón en el aire, etc...) como los parámetros de funcionamiento de los dispositivos. Dicho sistema se usa también para aumentar la seguridad y preservar la integridad del laboratorio mediante el aviso de alarmas o malfuncionamiento por medio del envío de mensajes a los teléfonos de guardia y a la cuenta de soporte técnico.

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. 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.

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 fotones 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).



Fig. 5.1. Imagen del sistema de monitorización de alarmas

5 www.lsc-canfranc.es

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/m³ en Rioseta y 38 Bq/m³ 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 del LSC fue de 70 Bq/m³. 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 m³/h. La actividad específica varía entre 50 and 80 Bq/m³.

Aunque este nivel de actividad de Rn no es peligroso para la salud del ser humano, puede contribuir considerablemente al fondo radioactivo de alguno de los experimentos o de sus medidas, como aquellas llevadas a cabo por los servicios de radiopureza (RMS) a través de los detectores de Germanio de alta pureza y por



Fig. 5.2. Seis detectores proporcionales de ³He en el Hall A (Colaboración CUNA)

BiPo al contaminarse las superficies. En estos casos, los aparatos se encuentran contenidos en un ceñido contenedor en el cual se aplica un flujo de gas puro N2 o de aire limpio de Rn. Ambos métodos son de alguna forma complementarios puesto que, como ejemplo, el primero no puede ser utilizado si las personas tienen que trabajar en el espacio libre de Rn.

La reducción de Radón en el aire puede ser obtenida utilizando aparatos industrialmente disponibles que comprimen, almacenan y empujan el aire a través de filtros que absorben el Rn de manera selectiva. El resultado es una reducción de la actividad de Rn de una magnitud de tres órdenes. El 10.12.2014 ha sido aprobada una propuesta por la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación, dentro del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia en el marco del Plan Estatal de Investigación Cientí-

Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC)

5

fica y Técnica y de Innovación 2013-2016, para una cofinanciación del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) al 50% (nivel contemplado en Aragón) para la adquisición de un aparato de estas características y las modificaciones necesarias a las infraestructuras del laboratorio (principalmente al sistema de enfriado).

La licitación para el sistema de reducción de Rn ha sido lanzada y se prevé su instalación para finales del 2015.

El nivel de fondo de neutrones bajo tierra es también menor que el de la superficie, donde toma valores en torno a 100 n/(m²s) 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 ³He, del montaje que se explicará en el apartado dedicado a CUNA, dentro de matrices de polietileno de diferentes grosores. De esta manera el



Fig. 5.3. Detector de muones

fondo de neutrones se midió simultáneamente a niveles de energía diferentes. El flujo total en el centro del hall A resulto ser de (3.44 ± 0.35) $\times10^{-2}$ n/(m²s), cuatro órdenes de magnitud menor 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/(m²s). Es pequeño pero, una vez más, los experimentos deben de construir blindajes para estar protegidos.

El flujo total de muones integrado sobre los ángulos se midió en $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en el Hall B y $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en el Hall A, ambos con un 10% de incertidumbre en el 2006, por la Universidad de Zaragoza. La diferencia se debe a la forma de la montaña sobre el laboratorio.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 (Nal). 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.



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 (v_{e}) , .el neutrino-muónico (v_{1}) y el neutrino-tauónico (v_{2}) . Decimos que el par de leptones de cada familia tiene sabor electrónico, sabor muónico y sabor tauónico respectivamente. Cada partícula, guarks, 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 Majorana en 1937.



Fig. 6.1. a) Beta decay, b) $2\nu\beta\beta$), c) $0\nu\beta\beta$

6 www.lsc-canfranc.es

¿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 $e^-\overline{v}_e$ (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 $e^-\overline{v}_e$. Las desintegraciones doble beta tienen una larga vida media, 10¹⁹-10²¹ 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 10²⁵ años, esto es 10¹⁵ 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 1025 años, los núcleos se desintegrarán en un tiempo del orden de un año. Los experimentos de la generación actual pretenden explorar hasta 10²⁶ 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 ¹³⁶Xe.

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 energía 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 objeto



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

Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) 6



Fig. 6.3. Principios de detección de las WIMP

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" y 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 I 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 (fotones), 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 componentes del experimento, antes de su montaje, y

6 www.lsc-canfranc.es

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 se produzca 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.

El tunel de Somport atraviesa diferentes tipos de roca de la época del Paleozoico lejano, e incluye diversas Facies. Su longitud, profundidad y diversidad ecológica lo hacen un lugar ideal para estudios ecológicos de extremófilos. En ambientes extremos, las bacterias tienden a ser los organismos vivos principales. Los microorganismos subterráneos se han descrito detalladamente, pero casi todos los informes hacen referencia a muestras tomadas desde centímetros a unos pocos metros bajo la superficie. En el túnel de Somport esto puede realizarse a mucha más profundidad.

(22



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 materia oscura si se utilizan detectores similares a los suyos, es decir centelleadores de Nal, en condiciones de extremadamente bajo fondo radiactivo y bajo umbral. ANAIS tiene como objetivo usar una matriz de detectores de Nal, 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.

Durante 2013 dos cristales de 12.5 kg, crecidos y encapsulados por la empresa Alpha Spectra Inc. estuvieron en operación en el LSC, tras ser



Fig. 7.1. Montando uno de los detectores de ANAIS-25 en la sala blanca del LSC, junio de 2014

acoplados a dos PMTs de Hamamatsu en la sala blanca del LSC por el personal de ANAIS. Nos referiremos a este montaje como ANAIS-25. Estos cristales fueron crecidos con el polvo de Nal que probó tener el menor contenido en potasio de todos los analizados en el servicio de medida de radiopureza de materiales del LSC. El objetivo de ANAIS era conseguir un contenido en potasio del orden de 20 ppb. En los primeros meses de 2013 se determinó con precisión el contenido de potasio de los cristales mediante la identificación de la desintegración del 40K por el método de 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. 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 próximo al objetivo de ANAIS de 20 ppb de potasio aunque todavía no allí.

Otras trazas radiactivas, que se desintegran emitiendo partículas alfa, también contribuyen al fondo radiactivo del experimento. Durante 2013 se estudió la contaminación alfa en los cristales de ANAIS-25: el ritmo alfa total en los dos cristales es de aproximadamente 280/ (kg día) (3,2 mBq/kg), que es mucho más alto que el que se necesita. Esto es debido a que está relacionado con fondos a bajas energías, en la zona de interés, en particular las que provienen del 210Pb, progenitor del emisor alfa, cuya desintegración genera depósitos energéticos en la región de baja energía. Este efecto se debe presumiblemente a la contaminación con 222Rn durante el crecimiento o mecanización de los detectores y, por ello, la empresa introdujo en sus procesos modificaciones adecuadas para minimizar la posible intrusión de radón. Enseguida empezaron las negociaciones con Alpha Spectra para la adquisición de un nuevo módulo de 12.5 kg de masa y similar en diseño a los anteriores que utilizara procedimientos adicionales de purificación en potasio, tratando de alcanzar el objetivo de 20 ppb de potasio, y los nuevos procedimientos de crecimiento y encapsulado, tratando de minimizar la posible contaminación de radón.

El nuevo cristal llegó al LSC EL 5 de Marzo de 2015 y que se montó lo más rápido posible en el blindaje existente de ANAIS-25 y aprove-



Fig. 7.2. Los dos detectores de ANAIS-25 durante su instalación en el blindaje, Hall B, LSC

7



Fig. 7.3. Detector de Nal fabricado por Alpha Spectra. Será recibido para su instalación en el LSC a comienzos de marzo de 2015

chando un sistema de adquisición ya diseñado para un número mucho mayor de módulos ya en funcionamiento. El objetivo fundamental de este montaje es el de evaluar el contenido del nuevo cristal tanto en isótopos emisores alfa como en 40K con la mayor precisión posible para estimar el nivel de fondo que en la región de interés.

En el 2014 los objetivos principales de ANAIS-25 han sido la comprensión del fondo radiactivo de los detectores y la reducción del umbral del experimento. En paralelo, los 42 PMTs de Hamamatsu, adquiridos en 2013, empezaron a ser caracterizados en los laboratorios de Zaragoza e instalaciones del LSC en términos de eficiencia cuántica relativa, corriente oscura y radiopureza. Este proceso se extenderá hasta los primeros meses de 2015.

Gracias al análisis de los prototipos ANAIS-0 y ANAIS-25 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 y en la construcción de un modelo de fondo capaz de reproducir las medidas experimentales. En particular se ha llevado a cabo un detallado análisis de la activación cosmogénica en cristales de Nal, que supone un fondo a tener en cuenta en la región de baja energía, en la que



Fig. 7.4. Instalación para la caracterización de los fotomultiplicadores de ANAIS en los laboratorios de Zaragoza

contribuyen isótopos de vida media larga como 22Na yTritio. Es la primera vez que este estudio se realiza para detectores de yoduro de sodio con este grado de detalle y calidad en los datos experimentales.

Durante 2014 se ha progresado de forma importante en la reducción del umbral del experimento hasta I keV, gracias a la alta eficiencia en la recogida de luz de los cristales de Alpha Spectra. En junio de 2014 se cambiaron los fotomultiplicadores de uno de los dos detectores para utilizar el modelo definitivo, de mayor eficiencia cuántica, en los dos módulos de ANAIS-25. Los trabajos desarrollados para determinar con precisión las eficiencias de los cortes aplicados hasta I keV están todavía pendientes de conclusión, prevista para los primeros meses de 2015. Sería la primera vez que con esta técnica se prueba este nivel de umbral en energía, y con un sistema de calibración específicamente diseñado para irradiar los cristales de Nal a través de una delgada ventana de Mylar con fotones de energías inferiores a 25 keV. La reducción del umbral por debajo de 2 keV es un hito importante en el campo.

Los resultados de las actividades relacionadas con ANAIS han sido publicados en revistas internacionales y presentados en los congresos más relevantes en el ámbito de la detección directa de materia oscura.



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 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). Los fotones S2, cuya intensidad es proporcional a la carga ionizante, son detectados por fotomultiplicadores (PMTs). De este modo, la señal ionizante es detectada vía S2, mientras que 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



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

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 experimentos en Materia Oscura de grandes dimensiones. Dado que tienen alto rendimiento de centelleo e ionización, esencial para la detección de estos eventos de tan baja energía, y a que 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:

- I.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 cm² 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 I 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 recubierta con paneles de aluminio contra incendio.

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



Fig. 8.2. La estructura experimental de ArDM (Noviembre 2014)



Fig. 8.3. El Sistema de control de ArDM

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 detector, suspendido de la grúa del Hall A en su instalación en la vasija del detector, junto a su dibujo y un primer plano de uno de las matrices de fotomultiplicadores (PMT). El 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 sistema de adquisición de datos de ArDM es capaz de manejar un índice de eventos a escala kHz en un blanco de argón de ~1-ton y puede grabar datos a un índice de ~300 MB/s. Se encuentra instalado un sistema de almacenamiento de datos, que incluye un disco duro de 192-TB, para la recopilación del gran volumen de datos.

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.



Fig. 8.4. Componentes de ArDM

Se ha realizado una cuidadosa evaluación del número esperado de eventos del fondo de neutrones, basada en las actividades medidas, que conducen a la sensibilidad pronosticada mostrando un alto potencial de ArDM en particular para las búsquedas de WIMP de gran masa.

En Mayo de 2014, ArDM pasó a una fase de toma de datos continua, comenzando en argón gas puro a temperatura ambiente. Tras una extenso proceso de 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, la primera operación criogénica de ArDM fue inaugurada el Septiembre 2014. El sistema criogénico completo fue enfriado desde la temperatura ambiente (25°) a la temperatura del argón líquido (-186°C) en una semana. Seguidamente la respuesta del detector fue estudiada en gas argón "frio", aproximadamente tres veces más denso que a temperatura ambiente, utilizando fuentes de calibración radioactivas. La cantidad de datos tomada desde Noviembre 2014 alcanzó ~80 TB.

Mientras tanto, se ha instalado en el CERN el centro de control de ArDM. El sistema de con-

trol de ArDM tal y como se describe anteriormente terminará permitiendo una operatividad remota completa del sistema vía internet. Esta característica es particularmente importante para una toma de datos físicos a largo plazo en el laboratorio subterráneo que continuará a lo largo de varios años. En la actualidad, un empleado local está operando el sistema junto con un operario a turnos del Centro de Control.

Desde Noviembre del 2014, ArDM se encuentra en fase de llenado, es decir condensando el gas argón puro en la vasija del detector con la ayuda de tres crio-refrigeradores de 300-W. Se espera que la vasija se encuentre llena de sus ~2 t de argón líquido a principios del 2015. Tras una exitosa puesta en marcha y plena caracterización del sistema durante la primera toma de daos en argón líquido, se espera comenzar en el 2015 con la toma de datos físicos para la búsqueda de Materia Oscura.

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



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

El experimento NEXT tiene el objetivo de detectar la desintegración doble beta sin neutrinos ($0\nu\beta\beta$) en gas xenón, enriquecido en el isótopo 136Xe. 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.

La desintegración doble beta sin neutrinos, si existe, es un evento extremadamente raro, con una vida media mayor que 1025 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.

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 9.1. 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



Fig. 9.1. El principio de detección de NEXT



Fig. 9.2. El prototipo NEXT-DEMO en el IFIC de Valencia

Fig. 9.3. La traza de un electrón, reconstruida con NEXT-DEMO

campo eléctrico. Sabiendo el momento en que 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. 9.2 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. 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 $0V\beta\beta$.
- c. capacidad de reconstruir trazas. (Fig. 9.3).

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. 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) empezaron en 2014 y finalizarán en los primeros meses de 2015. Por lo tanto, está previsto poner en marcha NEW



Fig. 9.4. La vasija de NEW con el blindaje de cobre ultrapuro en el interior

y tomar datos durante 2015 y 2016, paralelamente a la construcción del detector NEXT-100. En la Fig 9.4 se muestra una foto de la vasija de NEW, con la capa de cobre ultrapuro en su interior.

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. En 2014 se ha completado la construcción de la parte central de la plataforma, aislada sísmicamente, que soportará el detector y su protección, a la vez que la estructura que aloja la protección. La protección consiste 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).



http://nemo.in2p3.fr/nemow3/

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 gaseosos 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 ²⁰⁸Tl y ²¹⁴Bi, isótopos que se producen en la desintegración de las cadenas naturales del 232Th y el ²³⁸U respectivamente. Los niveles de radiopureza requeridos para las láminas de ⁸²Se son de 2 µBq/kg en ²⁰⁸TI (lo que representa menos de 5 desintegraciones de ²⁰⁸TI al mes por cada kilo de selenio) y 10 µBq/kg para el ²¹⁴Bi. 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



Fig. 10.1. Vista general de BiPo-3

medir y seleccionar estas fuentes de selenio. BiPo debe ser operado en un laboratorio subterráneo. La instalación y operación del detector en el LSC fue aprobada 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 ²⁰⁸Tl y ²¹⁴Bi mediante la detección del denominado proceso BiPo. El ²¹⁴Bi sufre una desintegración β emitiendo un electrón y decae al ²¹⁴Po, que es un emisor α con una vida media de 164 µs. La actividad en ²⁰⁸Tl se evalúa mediante la medida de su padre, el ²¹²Bi, que sufre una desintegración β (en el 64% de los casos) y decae al ²¹²Po, un emisor α con una vida media de

0.3 µs. En ambos casos, el electrón y, más tarde, la particula α 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 particula 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 × 300 mm2 y un espesor de 2 mm, lo que implica una superficie total de detección de 3.6 m2. Cada uno de los módulos está cerrado herméticamente



Fig. 10.2. Montaje de uno de los módulos de BiPo-3 modules en la sala blanca subterránea

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 (1.0 \pm 0.2) µBq/m2 en ²⁰⁸Tl y (1.8 \pm 0.4) µBq/m2 en ²¹⁴Bi.

Estos niveles de fondo se pueden traducir en niveles de sensibilidad para la medida de fuentes de ⁸²Se de SuperNEMO, de aproximadamente 3 μ Bq/kg en ²⁰⁸Tl y 30 μ Bq/kg en ²¹⁴Bi, utilizando todo el detector BiPo y tras 6 meses de medida.

Las fuentes para SuperNEMO se componen de una mezcla que contiene el ⁸²Se colocado entre láminas de un material de baja densidad. Diferentes muestras de estos componentes se han medido durante 2013 y 2014 en los dos

Fig. 10.3. Dos láminas de fuentes de Se para SuperNemo, instaladas en uno de los módulos de BiPo.

módulos de BiPo para controlar la radiopureza antes del montaje completo de las fuentes. La medida de las fuentes de Se que se utilizarán finalmente en SuperNemo ha comenzado en Agosto 2014, con la instalación de dos láminas cubriendo un cuarto de la superficie total del detector (Fig. 10.3). Un primer análisis de estas láminas mostró que no se detectó ningún evento tipo BiPo durante 3 meses de medida. Esto significa que la actividad en ²⁰⁸Tl y ²¹⁴Bi es inferior a 18 µBg/kg y 1015 µBg/kg respectivamente Otras dos nuevas láminas se instalaron en Diciembre del 2014, y se están midiendo en la actualidad, junto con las primeras dos hojas, cubriendo la mitad de la superficie del detector. Actualmente, BiPo es un detector único por su alta sensibilidad para medir niveles de radioactividad extremamente bajos en muestras con una geometría de finas láminas. Por ejemplo, se ha medido substratos de Si usados en microelecrónica, ya que los contaminantes radioactivos presentes en ellos, aun en cantidades muy bajas, son responsables de errores lógicos de las memorias electrónicas. Se han medido también muestras de diferentes experimentos de doble desintegracion beta, incluyendo polietileno de CUORE, micromegas de Zaragoza u hojas reflectoras de LUMINEU.

11

11 SUPERKGd

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html

Super-Kamiokande es un detector con 50000 toneladas de agua ultra pura como material activo. En ellas se crean las trazas de los leptones cargados (electrones y muones) producidos por las interacciones de neutrinos, mediante la luz que generan en el líquido debido al llamado efecto Cherenkov, Sus dimensiones son enormes; su tamaño es similar al de un edificio de 10 plantas. Se encuentra en el Observatorio de Kamioka (ICRR, U.Tokio), bajo los Alpes Japoneses. Es el sucesor de Kamiokande, un detector mucho más pequeño pero que fue el primer telescopio de neutrinos. Kamiokande detectó neutrinos solares, atmosféricos y, en 1987, neutrinos cósmicos provenientes de una explosión supernova localizada en la Gran Nube de Magallanes, distante 169000 años luz. Debido a este descubrimiento, Prof. M. Koshiba, artífice y director de Kamiokande, recibió el Premio Nobel de Física 2002.

Super-Kamiokande entró en operación en 1996. Con los datos de los primeros años descubrió las oscilaciones de neutrinos (1998), manifestación inequívoca del carácter masivo de estas partículas. Super-Kamiokande sigue siendo el experimento de neutrinos de referencia, produciendo de forma regular muy importantes resultados en Física (por ejemplo evidencia de aparición de neutrinos tau atmosféricos, análisis precisos de oscilaciones de neutrinos solares, los límites más restrictivos a nivel mundial para la desintegración del protón, otros) y Astrofísica (búsquedas indirectas de Materia Oscura en el Sol y en el centro de nuestra Galaxia, límites mundiales sobre el fondo difuso de neutrinos de supernova, otros).

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 (y antineutrinos) de supernovas reliquia es constante, uniforme, pero relativamente pequeño; al contrario que el caso de explosiones supernova cercanas no vienen cómo una ráfaga en un intervalo de sólo varios segundos. Son por ello y por su baja energía (predicha), mucho más difíciles de distinguir de los fondos del experimento.

Se puede mejorar la sensibilidad del detector mediante la identificación 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, $Gd_{2}(SO_{4})_{3}$, a muy poca concentración. El núcleo de Gd tiene una sección eficaz (probabilidad) muy grande para la captura de neutrones, emitiendo el nuevo núcleo en su fase de estabilización rayos gamma observables. Ahora bien, esta sal de Gd debe tener una contaminación radioactiva muy baja, de otra manera las desintegraciones radioactivas producirían nuevas reacciones que no sólo dificultarían el descubrimiento y medida de los neutrinos reliquia sino que, llegando a un caso extremo, podrían saturar Super-Kamiokande haciéndolo ciego.

Super-Kamiokande ha establecido un programa específico de I+D para la implantación de la técnica Gd en el detector. El programa incluye un detector de prueba (200 toneladas) con todo el sistema de purificación del agua y tratamiento

11 www.lsc-canfranc.es

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 Germanio 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, fue aprobado 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, con resultados positivos: se ha identificado al menos una fábrica capaz de producir, al menos una vez, sal de Gd con una contaminación radioactiva suficientemente pequeña y a otro proveedor cuyos lotes, espaciados en producción meses e incluso años, presentan una contaminación razonablemente parecida.

La actividad de la UAM en este proyecto tiene todavía un largo camino por recorrer en el LSC. Estamos trabajando en establecer un procedimiento rutinario para controlar las 200 toneladas de sal de Gd que serán disueltas en Super-Kamiokande en el estadio final del proyecto, esperado para 2016, en el que el servicio de radio-pureza del LSC es instalación clave. El objetivo es asegurar una baja contaminación radioactiva residual y monitorizar su reproducibilidad a lo largo de la producción en masa de tal enorme cantidad de material. Esto es una parte crucial del proyecto Gd.

GEODYN

12

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 extensómetros/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 equipo y la visualización de las tres componentes es accesible online en la dirección:

http://193.146.122.114:8083/pages/taurus/ status.page.

Durante 2014, la actividad técnica relacionada con la component sísmica de GEODYN se ha focalizado en la implementación del protocolo de comunicación SeedLink que permite acceder remotamente a los datos en tiempo casi real. Esto ha permitido integrar completamente la estación en el nodo EIDA situado en el Orfeus Datacenter (http://www.orfeus-eu. org/eida/eida.html), el cual recibe los datos en tiempo casi real y los hace accesibles a la comunidad sismológica. El acceso a los seis canales sísmicos (3 componentes del sensor broad-band y del acelerómetro) se realiza usando los códigos propios de red y estación (LC, CANF).

La componente sísmica de GEODYN ha continuado registrando de forma regular la actividad local, regional y telesísmica durante 2014. La Figura 12.1 muestra los registros de la componente vertical del sensor broad-band para el día 1 de Marzo de 2014, que incluye



Fig. 12.1. Registro sísmico del episodio de sismicidad localizado en la vecindad de Lourdes el día 1 de Marzo de 2014.

un episodio de sismicidad local con epicentros cerca de Lourdes, a unos 35 km del LSC. El evento principal alcanzó una magnitud de 3.5 según la red francesa Rénass. Es interesante destacar que la estación LSC ha detectado durante este episodio un número de eventos sensiblemente mayor a los incluidos en el catálogo sísmico de referencia.

En lo relativo a la actividad telesísmica, podemos destacar los dos eventos de magnitud 8.2 y 7.7 con epicentro en el norte de Chile (Figura 12.2) ocurridos los días 2 y 3 de Abril. La figura adjunta permite observar cómo los paquetes con más energía en la banda de frecuencias entre 0.04 y 0.08 Hz (colores rojizos) corresponden a réplicas (eventos de magnitud menor) que no pueden ser identificadas en a esta escala en la serie temporal, dado que su amplitud es mucho menor que la de los eventos principales. Las frecuencias más bajas del espectrograma permiten identificar también las ondas de superficie que se propagan alrededor del planeta y que se pasan por la estación cada 3 horas aproximadamente.



Fig. 12.2: Componente vertical y espectrograma de los dos terremotos con epicentro en el norte de Chile (2-3 Abril de 2014).



Fig. 12.3. Registro sísmico de terremotos asociados a la erupción del Bárdarbunga crisis. Cada línea corresponde a 1 día completo.

Vemos pues cómo la sensibilidad del equipo de registro permite registrar ondas que han circunvalado el planeta hasta 4 veces.

Otro hecho relevante a señalar ha sido el registro de la actividad sísmica asociada a la erupción del volcán Bárðarbunga en Islandia, iniciada en Agosto de 2014. Durante el periodo de máxima actividad volcánica, una gran cantidad de terremotos con epicentro en la zona eruptiva se han registrado en las componentes sísmicas de GEODYN (Figura 12.3).

Interferómetros laser. Un interferómetro láser permite medir las deformaciones que experimenta una roca en la dirección en la que está orientado el láser, actuando pues como un extensómetro. Para tener información en dos direcciones perpendiculares, se han instalado dos interferómetros en la galería 16 y en el Lab780L, que encuentran operativos desde Diciembre de 2011 (Fig.12.3). Los extensómetros miden cambios de distancia entre los dos extremos del instrumento, anclados en la roca y separados unos 70 m, mediante interferómetros ópticos de tipo Michelson. Dos foto-diodos miden la intensidad de la componentes polarizadas vertical y horizontalmente de una de las dos salidas de cada interferómetro.

Los interferómetros han sufrido cortes de adquisición importantes durante el segundo semestre de 2014, debido a fallos en las bombas de vacío y en los ordenadores PC que actúan como controladores. Adicionalmente, la óptica y la electrónica del interferómetro GALI6 se ha visto afectada por el polvo levantado por el tránsito de vehículos de servicio. Los técnicos del LSC están actuando para la subsanación de estas incidencias, aún no resueltas completamente.

Durante 2014, la investigación basada en los datos de deformación se ha centrado en la validación de modelos no lineales de mareas oceánicas a gran escala. 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 es mucho más complejo, debido al efecto de las mareas de aguas someras. La sinteracciones no lineales entre las diversas ondas de marea provican la aparición de nuevas frecuencias en el espectro. Además, respuestas de resonancia o cuasi-resonancia se añaden o la complejidad del patrón de marea, y tienden a intensificar los efectos no lineales. La relación señal/ruido obtenida en el LSC es incluso supe-



Fig. 12.4. El interferómetro en el Lab 780

rior a la conseguida el sensores gravimétricos de gran precisión. Esto permite observar claramente en el espectro de las medidas de deformación frecuencias asociadas a las diversas componentes de la marea de hasta al menos 8 ciclos por día (cpd). Los picos con frecuencias superiores a 2 cpd se atribuyen a efectos de carga no lineales originados por las masas de agua someras y su interpretación es compleja. Durante este año se han comparado nuestras observaciones con los resultados sintéticos obtenidos utilizando programas de referencia (paquete SPOTL; Agnew, 2013) y dos modelos distintos de mareas oceánicas, TPX08-atlas y FES2012. TPXO8-atlas incluye solamente las components M4, MS4, and MN4, mientras que FES2012 incluye además M6, M8, MKS2, N4, and S4 (Figura 12.5). La representación detallada de estas mareas no-lineales y de sus efectos de carga es un reto que deberá afrontarse en los próximos años.

Señales Hidrológicas. Tal y como se ha descrito en informes anteriores, durante el procesado rutinario de los datos sísmicos se detectó una signatura espectral inusual, que no se correspondía con las fuentes típicas de ruido sísmico y que fue finalmente asociada 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.

El desarrollo de esta línea de investigación ha llevado a la publicación durante el año 2014 de un artículo científico en el Journal of Geophysical Research – Solid Earth, una revista de primer nivel editada por la American Geophysical Union. (Díaz, J., Ruíz, M., Crescentini, L., Amoruso, A., Gallart, J., 2014. Seismic monitoring of an

@AGU PUBLICATIONS



Journal of Geophysical Research: Solid Earth

RESEARCH ARTICLE 10.1002/2014/B010955

Key Points:

- Identification of the seismic signal
- generated by typical mountain rivers • Distinct spectral pattern for different
- hydrological events (snowmelt, flood)

 Real-time monitoring of river discharge may allow flashflood alerts

Seismic monitoring of an Alpine mountain river

J. Díaz¹, M. Ruíz¹, L. Crescentini², A. Amoruso², and J. Gallart¹

¹Institute of Earth Sciences J. Almera, ICTJA-CSIC, Barcelona, Spain, ²Dipartimento di Fisica, Università di Salerno, Fisciano, Italy

Abstract The Canfranc underground laboratory (LSC), excavated under the Central Pyrenees, is mainly devoted to the study of phenomena which needs "cosmic silence." It also hosts a geodynamical facility, named Geodyn, which holds an accelerometer, a broadband seismometer, and two high-resolution laser strainmeters. During the routine processing of the seismic data, we detected an unusual spectral signature.



Fig. 12.5. Panel superio: Amplitud de las maras oceánicas (izq., M2; derecha, M4) según el modelo TPXO8. Panel inferio: representación de los "phasors" correspondientes a la carga mareal observada (negro) y sintética (rojo; TPXO8; verde, FES2012).

Alpine mountain river. J. Geophys. Res., SE, 119, 3276-3289).

Componente GPS. El proyecto GEODYN incluye la instalación de dos estaciones continuas GPS para monitorizar desde el exterior las deformaciones en el entorno del área del túnel. 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.

En Junio de 2014 se fijaron definitivamente las ubicaciones de estas dos estaciones GPS, situadas respectivamente en el Fuerte de Rapitén, en los alrededores de Jaca, a unos 18 km al sur del LSC y en la zona de Candanchú, dentro de las instalaciones de la Escuela Militar de Montaña, a unos 4 km al norte del LSC

En colaboración con la Universitat de Barcelona (UB) durante el mes de Junio de 2014 se llevaron a cabo medidas de control en las ubicaciones previstas para las dos estaciones permanentes, utilizando equipos GPS de alta precisión. El objetivo de estas mediciones es asegurar la buena recepción de las señales de los satélites GPS y GLONASS. El equipo UB ha realizado guías de trabajo describiendo pasa a paso los procedimientos a seguir para la construcción de los monumentos GPS. Se ha elaborado así mismo un presupuesto para la instalación definitiva de los equipos (baterías, paneles solares, materiales de construcción, etc.).



Fig. 12.6. Ubicación de las dos estaciones CGPS.

4 I



El hidrógeno y el helio, formados durante la nucleosíntesis del Big Bang, son los constituyentes de la primera generación de estrellas. La síntesis de las especies más pesadas tiene lugar a través de procesos nucleares en el interior de las estrellas. La mayoría de los isótopos conocidos más allá del hierro se producen por reacciones de captura de neutrones que ocurren en muy diferentes entornos astrofísicos. Por un lado, la captura de neutrones rápidos (el proceso r) se cree que tiene lugar en el colapso del núcleo de las supernovas, mientras que la captura de neutrones lentos (el proceso s) tiene lugar por un lado en las estrellas gigantes rojas en la fase de la rama asintótica de las gigantes (AGB) para la llamada componente principal y en las estrellas masivas para la componente débil.

El proceso s se cree que produce cerca de la mitad de los isótopos más pesados que el hierro. Sin embargo, una cuestión abierta sigue siendo la fuente del flujo de neutrones estelar requerida para producir estas reacciones. Los neutrones se pueden producir a través de procesos (α ,n), siendo los candidatos más probables las reacciones 22Ne(α ,n)25Mg y 13C(α ,n)16O, dependiendo del escenario específico del procesos.

La probabilidad de que suceda una reacción viene dada por de la sección eficaz de reacción, y se requiere que las mediciones de la sección eficaz de este modo precisos para evaluar tanto el flujo de neutrones esperada y la eficiencia proceso s. Estas reacciones se deben conocer con precisión a la temperatura en que se producen las reacciones en las estrellas, que define las energías cinéticas de los núcleos atómicos, y se denomina pico de Gamow. Las secciones eficaces dependen de la energía y disminuyen muy rápidamente con la energía, llegando a ser extremadamente pequeña en el pico de Gamow. La medición 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 interacciones fondo a tasas mucho mayores que los que se buscan. Por eso hay que trabajar en un laboratorio subterráneo. Desde hace muchos años existe una instalación de ese tipo, LUNA en LNGS-INFN en Italia. Sin embargo, se requieren intensidades de haz todavía mayores y un rango de energía más grande para hacer las mediciones de interés. Por otra parte, una sola instalación no es suficiente para cubrir todo el programa científico en un plazo razonable, teniendo en cuenta que la medida de una sola sección eficaz lleva varios años de trabajo, y que los resultados deben ser contrastados para su coherencia científica. Por eso se desarrolló el proyecto Canfranc Underground Nuclear Astrophysics (CUNA).

El proyecto CUNA propone un laboratorio subterráneo de astrofísica nuclear en el LSC basado en un acelerador de última generación de alta corriente y baja energía. 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 varios grupos españoles y socios internacionales. A su vez, una "Carta de Intenciones" completa se presentó en octubre de 2012. La profundidad del LSC ofrece las condiciones de bajo fondo necesarias para hacer posible que las medidas se extiendan a muy bajas energías, donde las tasas de conteo son del orden de un suceso por hora o incluso menos. Aparte de la alta corriente, la operación controlada con muy bajo rizado de la tensión del acelerador

es de importancia clave, ya que permite el uso eficiente del tiempo de haz y el conocimiento preciso de la energía del haz. Se ha previsto la instalación de dos estaciones experimentales con dos líneas de haz, a fin de poder llevar a cabo los preparativos en una de ellas, mientras que se llevan a cabo mediadas en la otra.

El LSC ha efectuado los estudios preliminares para una nueva sala experimental que se excavaría cerca de las instalaciones subterráneas existentes. La nave subterránea acogería tanto el acelerador lineal de iones como los detectores de los diversos experimentos que utilizarían la instalación a lo largo de los años.

Dado que el haz de partículas alfa (y de protones) tiene energía suficiente para producir neutrones a través de reacciones nucleares, la colaboración CUNA ha realizado simulaciones numéricas para evaluar la atenuación fondo de neutrones en la roca. Los resultados muestran que un metro de roca reduce el flujo en tres órdenes de magnitud, y, en consecuencia, los neutrones no afectará experimentos instalados en otras naves experimentales. Por otra parte, haciendo uso de un modelo completo del LSC, incluyendo la sala adicional para CUNA, las simulaciones numéricas muestran que los neutrones que escapen la nave CUNA a través de los puntos de acceso no pueden llegar a otras áreas experimentales.

Las secciones eficaces extremadamente bajas de las reacciones nucleares que han de estudiarse en CUNA dictan los requisitos de los dispositivos de detección correspondientes: alta eficiencia de detección y buena capacidad de discriminación para el canal de reacción de interés. El núcleo del programa experimental propuesto en CUNA son las reacciones (α ,n). Un contador de neutrones basado en contadores proporcionales 3He embebidos en una matriz de polietileno que actúa como moderador de neutrones es el mejor candidato. Reúne una eficiencia de detección del orden de 50%, una señal muy nítida de los sucesos de neutrones y bastante insensibilidad a otros tipos de radiación. Un detector de estas características, que consta de 20 tubos dispuestos en dos anillos alrededor de un agujero longitudinal central de radio 5,5 cm, se ha construido ya por una colaboración española para experimentos con neutrones emitidos tras la desintegración β , y podría ser fácilmente adaptado a las medidas en CUNA.

Seis de los tubos han sido ya utilizado para medir el fondo de neutrones en la sala A del LSC. La media ponderada del flujo integral en el centro de la sala en el intervalo de 1 eV a 10 MeV es de $(3,44 \pm 0,35) \times 10-6$ cm-2s-1, donde la incertidumbre está dominada por el 10% de error sistemático en la normalización debida a calibración. Una nueva medida del fondo de neutrones está en marcha en el laboratorio de bajo fondo de Felsenkeller (Dresde, Alemania), utilizando ocho contadores neutrones de 3He moderados en polietileno. Además de la caracterización del fondo en Felsenkeller, interesante de por sí, la medida permitirá la comparación entre el fondo en un laboratorio de poca profundidad (Felsenkeller) y un laboratorio profundo (Canfranc) y por lo tanto una mejor comprensión de las condiciones de medida para llevar a cabo con éxito las medidas de reacciones (α ,n).

Las señales debido a la radiactividad α presente en las paredes y otros materiales de los tubos de 3He pueden enmascarar las muy escasas señales de neutrones originadas en las reacciones (α ,n) propuestas. La colaboración CUNA está investigando este fondo intrínseco. Se han realizado mediciones en el LSC utilizando pequeños tubos 3He recubiertos internamente por una fina capa de carbono para evitar que la radioactividad alfa de las paredes del tubo entre en el volumen de gas, y utilizando discriminación de forma de pulso para distinguir el origen de las señales.

Otro de los objetivos del proyecto CUNA son las reacciones de captura radiativa de interés astrofísico del tipo (X, γ). Para estas medidas se están desarrollando sistemas de detección



basados en materiales centelladores de altas prestaciones. Se están realizando estudios encaminados a la optimización de fondo inducido por el haz de iones, un punto clave para medidas subterráneas. Además se están investigando materiales de centelleo de alta sensibilidad, como CeBr3, con especial énfasis en la evaluación de la radiopureza, la resolución en energía y la eficiencia. También se ha puesto en marcha el estudio de la sensibilidad de detectores de centelleo inorgánicos a neutrones. Los neutrones se producen fácilmente por aceleradores e inducirán señales en los centelleadores mediante captura o dispersión inelástica, lo que podría limitar las medidas (α, γ) o (p, γ) . Se ha terminado el estudio para un cristal de LaBr3(Ce), como se muestra en la figura. La conclusión principal es que los generadores de cascadas de captura nativa en el código Monte Carlo Geant4 han de ser sustituidos por generadores mejorados para reproducir adecuadamente las medidas.

Se han venido organizando varios talleres y reuniones para debatir la viabilidad, el programa de la física y las perspectivas de futuro de la instalación CUNA. La primera reunión "Nuclear Astrophysics Opportunities at the Underground Laboratory in Canfranc" tuvo lugar en Barcelona en 2009, seguida por "Background and simulations for CUNA" en diciembre de 2010 en Zaragoza, y finalmente "Nuclear Astrophysics at the Canfranc Underground Laboratory" en marzo 2012, en el propio LSC. Este taller internacional es el último de una serie de reuniones dedicadas a la exploración de las perspectivas de los experimentos en astrofísica nuclear en laboratorios subterráneos existentes y en planificación. Un objetivo fundamental era profundizar CUNA en un contexto internacional recabando la opinión de astrofísicos nucleares de peso fuera de España. La justificación de la necesidad de varias instalaciones ya se había señalado en la "Carta de Intenciones" pero, lo que es más importante, también por los principales investigadores mundiales en astrofísica nuclear que escribieron cartas de apoyo, así como por organismos internacionales como NuPECC: "En la actualidad sólo hay una instalación subterránea en todo el mundo, en Gran Sasso (Italia) suficientemente sensible para medir las secciones eficaces necesarias. Dada la cantidad de tiempo que se necesita para la medida de una única reacción, así como el número de reacciones que faltan por medir, la construcción de otro centro es de importancia crucial para abordar cuestiones fundamentales en astrofísica". Además, la verificación científica independiente requiere de varias instalaciones que compitan y se complementen entre sí. El Laboratorio Subterráneo de Canfranc ofrece una oportunidad única para una instalación muy competitiva en astrofísica nuclear.

14 GOLLUM

El tunel de Somport atraviesa diferentes tipos de roca de la época del Paleozoico lejano. Su longitud, profundidad y diversidad ecológica lo hacen un lugar ideal para estudios ecológicos de extremófilos. En ambientes extremos, los principales organismos vivos pertenecen a los dominios bacteria y archaea. Se han descrito detalladamente los microorganismos subterráneos en muestras poco profundas, mayoritariamente compuestos por fotoautótrofos. Por contra, hay pocos estudios sobre los microorganismos que habitan en rocas internas, unas pocas decenas de kilogramos de muestras de un número pequeño de lugares, con datos que muestran una alta diversidad de taxones y metabolismos, incluyendo, entre otras, bacterias reductoras de azufre o hierro o productoras de metano.

Gollum propone realizar la caracterización detallada de las comunidades bacterianas residentes en varios tipos de roca a diferentes profundidades gracias a la secuenciación másiva de los genomas de las poblaciocens presentes en las rocas (secuenciación metagenómica). Se van a tomar muestras en diferentes profundidades y tipos de roca a lo largo del tunel con perforaciones de alrededor de un metro de profundidad para minimizar la contaminación externa. Se están desarrollando métodos de extracción de acido desoxirribonucleico (ADN) adaptados al escaso material genético presente en la muestro, con controles de contaminación. Las recientes avances tecnológicos en secuenciación masiva de nueva generación están permitiendo identificar multitud de nuevas especies en los dominios bacteria y archaea, que no son cultivables con las técnicas actuales.

El éxito del desarrollo tecnológico en metagenómica se debe a que viene acompañado de nuevos métodos computacionales que permiten la clasificación metagenómica de grandes conjuntos de datos, manteniendo una clasificación precisa en el caso de la presencia de nuevos organismos de virus, procariotas, hongos y protistas. El reciente Livermore Metagenomics Analysis Toolkit (LMAT) permite analizar datos de metagenómica de ADN total con alta



www.lsc-canfranc.es

precisión y con muy pequeño nivel de rechazo (típicamente menor al 0.1%). Este método computacional ha permitido nuevos descubrimientos al analizar el contenido metagenómico de muestras de importancia histórica. La visualización con Krona de una muestra control analizada en nuestro laboratorio se muestra en la figura adjunta. La versión interactiva de toda la clasificación taxonómica se puede encontrar en la pagina web http://soml.ific.uv.es/krona/kwashiorkor_ALL.html Gollum, gracias al sencillo acceso a través del túnel a muestras profundas, explora un ambiente extremo poco conocido, caracterizado por pocos nutrientes, diversos sustratos físico-químicos, bajos niveles de radiación y pequeñas fluctuaciones térmicas. El proyecto se propone analizar una compleja matriz de datos con consecuencias importantes en cuestiones fundamentales (origen de la vida, astrobiología) y aplicadas (bioprospección, descubrimiento de nuevas especies con propiedades útiles).



PUBLICACIONES 2014

ANAIS

Bulk Nal(TI) scintillation low energy events selection with the ANAIS-0 module. C. Cuesta et al. European Physical Journal **C 74** (2014) 3150

Analysis of the 40K contamination in Nal(TI) crystals from different providers in the frame of the ANAIS project . C. Cuesta et al. International Journal of Modern Physics A **29** (2014) 1443010

Study of scintillation in natural and synthetic quartz and methacrylate, J. Amaré et al.

Optical Materials 36 (2014) 1408

Preliminary results of ANAIS-25, J. Amaré et al.Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 742 (2014) 187

NEXT

The NEXT Collaboration (D. Lorca et al.), Characterisation of NEXT-DEMO using xenon Kα X-rays, JINST 9 P10007 (2014)

The NEXT Collaboration, Characterization of a medium size XeTMATPC instrumented with microbulk Micromegas, using low-energy gamma-rays, JINST 9, C04015 (2014)

The NEXT Collaboration, Description and commissioning of NEXT-MM prototype: first results from operation in a Xenon-Trimethylamine gas mixture, JINST 9 P0301 (2014)

The NEXT Collaboration, Present status and future perspectives of the NEXT experiment, Advances in High Energy Physics, vol. 2014, Article ID 907067, special issue

ArDM

Long-term operation of a double phase LAr LEM Time Projection Chamber with a simplified anode and extraction-grid design. C. Cantini et al., JINST 9:P03017, 2014.

GENERAL

A lo largo del 2014 los usuarios del LSC han realizado 19 presentaciones en Conferencias Internacionales

Además se han realizado en total 26 Tesis Doctorales relacionadas con los experimentos

ÓRGANOS DE GOBIERNO

Consejo Rector

Dña. María Luisa Castaño, Directora General de Innovación y Competitividad

Dña. Ángela Fernández Curto, Subdirectora General Adjunta de Planificación de Infraestructuras Científicas y Tecnológicas

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

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

Dña. Cristina San Román Gil, Secretaria General Técnica del Departamento de Innovación y Nuevas Tecnologías

D. Luis Miguel García Vinuesa, Vicerrector de Política Científica

Dña. Pilar Zaragoza Fernández, Vicerrectora de Transferencia e Innovación Tecnológica

Comisión Ejecutiva

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

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

Dña. Cristina San Román Gil, Secretaria General Técnica del Departamento de Innovación y Nuevas Tecnologías

D. Miguel Ángel García Muro, Director General de Investigación e Innovación

D. Luis Miguel García Vinuesa, Vicerrector de Política Científica

D. 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)

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 Corpuscular, Valencia (Spain)

Comité de Acceso

José Angel Villar Rivacoba (Presidente), Director Asociado del LSC

Andrés Gadea Raga, CSIC-Valencia

Eduardo García Abancens, Miembro de la Comisión Ejecutiva

Iulian Bandac, Responsable del servicio RMS

Silvia Borjabad Sánchez, Responsable de los servicios CES y CRS.









