

LA FÍSICA SUBTERRÁNEA EN ESPAÑA

Los laboratorios subterráneos proporcionan el bajo fondo necesario para la búsqueda de fenómenos extraordinariamente raros como las oscilaciones de neutrinos, desintegración doble beta o materia oscura. Hay sólo cuatro infraestructuras disponibles en la Unión Europea; una de ellas en España: el Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

INTRODUCCIÓN

La física subterránea nació a mediados del siglo XX para estudiar los neutrinos atmosféricos, la estabilidad del protón y los neutrinos solares. Los detectores subterráneos son necesarios para estudiar estos y otros fenómenos que de otra manera estarían totalmente ocultos por la más intensa radiación cósmica en la superficie de la tierra.

Durante la primera mitad del siglo XX la observación de los rayos cósmicos a distintas altitudes fue muy fructífera y buena prueba de ello son el descubrimiento del positrón, del muón, de los piones y de los kaones e hiperones. El estudio bajo tierra de los neutrinos atmosféricos producidos en las desintegraciones de muones y piones ha tenido su mayor éxito hace pocos años, cuando el experimento Super-Kamio-kande ha observado sin lugar a dudas oscilaciones de ν_μ al ν_τ .

El estudio de la estabilidad del protón se abordó simultáneamente al de los neutrinos atmosféricos, iniciándose una peculiar asociación que todavía perdura, ya que los detectores usados para los neutrinos atmosféricos se han dedicado antes o después a la búsqueda de la desintegración del protón. Hasta hoy ningún experimento la ha observado, lo que ha permitido descartar varios modelos de gran unificación.

El propósito de la detección de los neutrinos solares fue verificar las cadenas de reacciones nucleares de fusión que proporcionan energía al Sol. El experimento pionero de Homestake consistía en extraer unos pocos átomos radiactivos de ^{37}Ar producidos por la captura $^{37}\text{Cl}(\nu_e, e)^{37}\text{Ar}$ en 615 de toneladas de percloroetileno y contarlos en extremas condiciones de bajo fondo radiactivo. Se encontró con éste y otros experimentos un déficit de neutrinos



Jorge Puimedón Santolaria
Profesor Titular de Física Atómica,
Molecular y Nuclear
Universidad de Zaragoza

electrónicos que persistió durante décadas hasta que en el año 2001 el experimento SNO fue capaz de medir el flujo de neutrinos electrónicos y el flujo total de neutrinos de las tres familias, concluyendo que el déficit se debe al fenómeno de las oscilaciones de neutrinos. Gracias a esta evidencia sabemos ahora que algunas de las suposiciones del modelo estándar no son correctas: los neutrinos tienen masas no nulas y sus números cuánticos de familia no se conservan.

Las oscilaciones de los neutrinos dependen de las diferencias de masas y de los coeficientes de superposición lineal entre las tres familias. Un intenso programa experimental está en marcha para medir estos parámetros con detectores subterráneos aprovechando los antineutrinos electrónicos que se produce en las centrales nucleares y los neutrinos muónicos producidos con aceleradores. Resultados muy recientes de las colaboraciones KamLAND y K2K han añadido evidencia experimental nueva a las oscilaciones de neutrinos.

EL LABORATORIO SUBTERRÁNEO DE CANFRANC

El número de laboratorios subterráneos operativos a profundidades mayores que 1.000 mwe es muy escaso y en la Unión Europea sólo hay cuatro: el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (Italia), el Laboratorio Subterráneo de Modane (Francia), el Laboratorio Subterráneo de Boulby (Reino Unido) y el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (España). Los cuatro laboratorios cola-

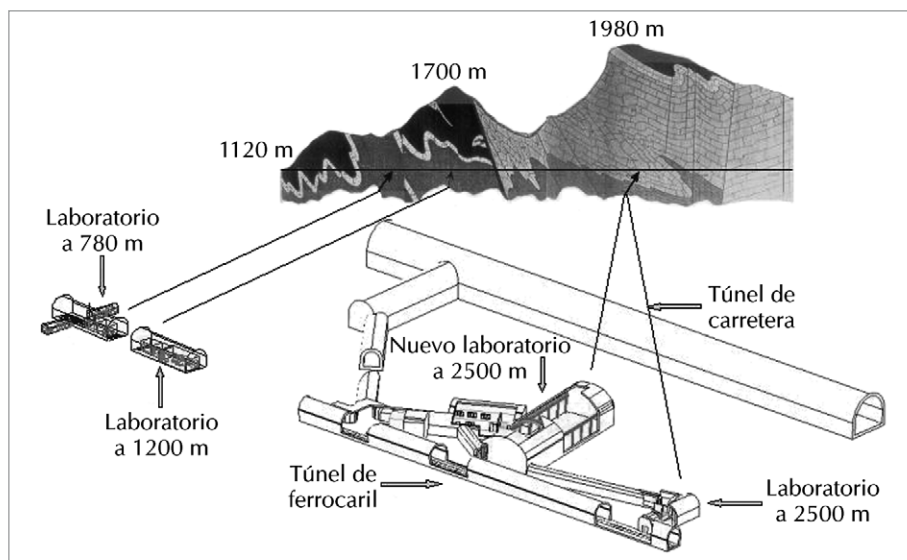
UNDERGROUND PHYSICS IN SPAIN

Underground laboratories provide the low background environment necessary to the search for extremely rare phenomena like neutrino oscillations, double beta decay or dark matter. There are only four underground infrastructures available in the European Union, one of them is in Spain: the Canfranc Underground Laboratory.

boran en el proyecto ILIAS (Integrated Large Infrastructures for Astroparticle Science) del sexto programa marco de la Unión Europea.

El Laboratorio Subterráneo de Canfranc está situado a 2.500 m de la entrada española del túnel ferroviario de Somport, cerrado al tráfico desde 1970 y que atraviesa los Pirineos por la provincia de Huesca. El acceso se hace por el túnel carretero de Somport a través de una galería que conecta ambos túneles. Bajo el blindaje de 2.450 mwe contra la radiación cósmica que le proporciona la montaña ha alojado experimentos dedicados principalmente a la búsqueda de la doble desintegración beta sin neutrinos y materia oscura. Actualmente se construye una ampliación cuya sala principal tiene una superficie de 600 m² y 10 m de altura y que ha sido orientada hacia el CERN para contemplar la posibilidad de experimentos con neutrinos producidos en aceleradores. El camino hasta alcanzar esta mayoría de edad no ha sido fácil. Basta recordar que cuando empezamos a trabajar en el año 1986 sólo disponíamos de dos estrechos corredores de 10 m² a 780 m de la entrada española del túnel y a una profundidad de 675 mwe, donde hubo que instalar la infraestructura necesaria de un laboratorio. El origen de la física subterránea en España está en las tesis doctorales, colaboraciones internacionales, publicaciones y comunicaciones a congresos que surgieron de esos escasos 20 m². En el año 1994 se aprovechó la excavación del túnel carretero para construir un laboratorio de 120 m² y en 2004 se acometió la ampliación actual.

La doble desintegración beta sin neutrinos, no contemplada en el modelo estándar y que nadie ha observado hasta la fecha, no conserva el número leptónico y sólo es posible si el neutrino



En la figura se muestra el perfil de la montaña y a lo largo del túnel de ferrocarril el primer laboratorio a 780 m de la entrada española del túnel, un laboratorio intermedio a 1.200 m y el laboratorio a 2.500 m. Al nuevo laboratorio en construcción a 2.500 m se accede por una galería que conecta el túnel de carretera con el de ferrocarril.

Un metro equivalente de agua, también conocido por sus siglas en inglés mwe, corresponde a 100 g/cm^2 de roca estándar con $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$.

Un experimento con ^{76}Ge reivindica que la ha observado, pero sus resultados no han sido confirmados por ningún otro grupo.

Contrariamente a lo que se suponía, desde 1998 se sabe que la expansión del universo es acelerada.

tiene masa y es su propia antipartícula. Su búsqueda, que requiere detectores subterráneos y muy bajo fondo radiactivo, no ha cesado nunca y adquiere un renovado interés ahora que sabemos que los neutrinos tienen masa.

La materia oscura, nombre con el que se conoce a la materia no ordinaria que no brilla es un problema central en cosmología. La medida reciente de la anisotropía de la radiación cósmica de microondas nos dice que la composición del universo es materia ordinaria (4%), materia oscura (23%) y energía oscura (73%). No se sabe de qué tipo son estas componentes oscuras; la energía oscura es responsable de la expansión acelerada del universo y la materia oscura podría ser una partícula llamada genéricamente WIMP (Weak Interacting Massive Particle) con masa entre 10 GeV y 1 TeV, que sería una reliquia estable de la Gran Explosión relacionada con alguna extensión del modelo estándar. Los WIMPs acumulados en las galaxias podrían detectarse por las colisiones elásticas con los átomos de un detector que viaja con la tierra por nuestra galaxia. El ritmo de los retrocesos sería menor que $1 \text{ día}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ de detector, con una energía del orden de 1 a 100 keV. Con estas características es obligado un laboratorio subterráneo y muy bajo fondo radiactivo.

RADIACIÓN AMBIENTAL

El éxito de un experimento subterráneo está ligado a la reducción de la ra-

diación ambiental, que incluye la radiación cósmica, los neutrones, la radiactividad del laboratorio y los radioisótopos contenidos en el detector y su blindaje. La importancia de cada una de estas fuentes de fondo depende de cada experimento.

La componente primaria de los rayos cósmicos, protones mayoritariamente, incide en la atmósfera terrestre con un flujo aproximado de $10^3 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y genera cascadas de partículas secundarias. Al nivel del mar los muones son las partículas cargadas más numerosas ($1 \text{ cm}^{-2} \text{ minuto}^{-1}$), hay una importante contribución de neutrones, fotones y electrones y pequeñas fracciones de protones y piones. El flujo de estas partículas se atenúa bajo tierra; los protones y piones no alcanzan profundidades mayores a 10 mwe, en cambio algunos muones superan los 10^4 mwe y producen a su paso un flujo terciario de fotones, electrones y neutrones. Hasta los 100 mwe el flujo terciario de neutrones es superior al producido en la fisión espontánea del ^{238}U y los producidos en reacciones (α, n) por las partículas α de las cadenas del U y del Th, que no dependen de la profundidad sino del tipo de roca y radiactividad local.

Los isótopos radiactivos más comunes de nuestro entorno son el ^{40}K y las cadenas del ^{238}U y ^{232}Th ; con concentraciones medias en roca de 850, 36 y 44 Bq kg^{-1} . La actividad del hombre ha producido algunos isótopos de vida media larga, por ejemplo ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{90}Sr y ^{85}Kr que algunas veces pueden

alcanzar décimas de Bq kg^{-1} . El mantenimiento de un laboratorio subterráneo incluye el control del ^{222}Rn , porque su vida media de 5.5 días le permite escapar de la roca donde se ha producido. Es la principal fuente de radiactividad en la atmósfera, unos 50 Bq m^{-3} aunque en lugares mal ventilados puede llegar a varios kBq m^{-3} . El plomo es el material más utilizado para reducir el fondo de la radiación gamma externa. La concentración de ^{210}Pb , responsable de la radiactividad intrínseca del plomo, es muy variable (desde decenas de mBq kg^{-1} hasta varios kBq kg^{-1}). Una regla bastante segura para seleccionar plomo es su antigüedad, ya que cada 22 años la actividad del ^{210}Pb se reduce a la mitad.

En la fase de construcción de los detectores los rayos cósmicos pueden producir trazas (entre 10 y 100 $\mu\text{Bq kg}^{-1}$) de núcleos radiactivos, que pueden aumentar dos o tres órdenes de magnitud si el material se transporta por avión. En ciertos casos se considera la posibilidad de trasladar algunas etapas de la producción de los detectores al propio laboratorio subterráneo que albergará el experimento. Es esencial comprobar todos los materiales antes de utilizarlos y en este proceso se ha desarrollado una tecnología que gracias a la selección de materiales cada vez más limpios ha permitido construir detectores cada vez más sensibles y así sucesivamente.

EPÍLOGO

El Laboratorio Subterráneo de Canfranc, nacido de la tenacidad de un reducido grupo de investigadores de la Universidad de Zaragoza, es una instalación subterránea única en España que ha permitido realizar experiencias de primer orden en física fundamental y desarrollar técnicas específicamente dedicadas a la búsqueda de sucesos muy poco probables en un entorno de muy bajo fondo radiactivo. Como ejemplo citaré el primer artículo que publicamos sobre doble desintegración beta y el último sobre materia oscura:

Results of a search of the neutrinoless decay of ^{76}Ge to the first excited state of ^{76}Se in the Canfranc tunnel.

A. Morales, J. Morales, R. Núñez-Lagos, J. Puimedón, J.A. Villar, A. Larrea, E. García, C. Sáenz.

Il Nuovo Cimento **104A** (1991)1581

Bolometric WIMP search at Canfranc with different absorbers.

S. Cebrián, N. Coron, G. Dambier, E. García, I.G. Irastorza, J. Leblanc, P. de Marcillac, A. Morales, J. Morales, A.O. de Solórzano, J. Puimedón, M.L. Sarsa, J.A. Villar.

Astroparticle Physics **21** (2004) 23.