

## Dos décadas de búsqueda de materia oscura en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc

María Luisa Sarsa

Laboratorio de Física Nuclear y Astropartículas

Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza, E-50009 Zaragoza

*Premio a la Investigación de la Academia 2008. Sección de Físicas*

### **Resumen**

El avance producido en las últimas décadas del siglo veinte en las técnicas observacionales ha proporcionado una gran variedad de datos experimentales sobre el Universo a distintas escalas de distancias y en distintas etapas de su evolución, gracias a los cuales se ha profundizado en nuestra comprensión del Universo. Apoyado sobre estos datos se ha desarrollado un modelo cosmológico consistente que requiere la existencia de una gran cantidad de materia oscura no bariónica (aproximadamente un 20% del presupuesto energético del Universo). En este trabajo se revisará brevemente el conjunto de evidencias experimentales que apoyan la existencia de la materia oscura, así como las distintas aproximaciones a su detección, para continuar con un resumen de los experimentos más relevantes en el contexto internacional. En particular, se hará hincapié en el continuado programa experimental orientado a la detección directa de materia oscura que se viene realizando en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc desde finales de los ochenta con la participación del grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la Universidad de Zaragoza. Algunos de estos experimentos fueron pioneros en el campo, tanto en el desarrollo como en la aplicación de nuevos detectores o técnicas de análisis. Se presentará un breve resumen de los experimentos más relevantes realizados en Canfranc que se completará con el estado actual de los esfuerzos experimentales que se están llevando a cabo en esta dirección: ANAIS (Annual modulation with sodium iodide detectors, NaI's) y ROSEBUD (Rare Objects SEarch with Bolometers UndergrouND).

### **Abstract**

The recent progress in observational techniques has provided a significant amount of experimental data about our Universe at different distance and time scales allowing a deeper understanding of the Universe. Supported by these data, a consistent

cosmological model has been developed, requiring a large amount of non-baryonic Dark Matter (about a 20% of the Universe matter+energy budget). In the following, the present standard framework and experimental data supporting the existence of Dark Matter will be briefly reviewed. The experimental approaches to search for this Dark Matter will be also covered, to continue with a summary of the most relevant experiments in the international context. In particular, stress will be given to the lasting Dark Matter Direct Search Program being carried out in the facilities of the Canfranc Underground Laboratory since the last eighties with the participation of the University of Zaragoza (UZ) Nuclear and Astroparticle Physics group. Some of them were pioneer in the development and application of new detectors or analysis techniques in the field. A brief summary of the most relevant experiments carried out in Canfranc will be followed by the report on the status of the present experimental efforts: ANAIS (Annual modulation with sodium iodide detectors, NaI's) and ROSEBUD (Rare Objects SEarch with Bolometers Underground).

## 1 Introducción

Existen en la actualidad un cúmulo de evidencias experimentales que apuntan hacia un contenido no inferior al 20% de la densidad crítica del Universo en forma de partículas masivas y neutras, débilmente interaccionantes y que no tienen origen bariónico. Al no emitir radiación, estas partículas constituyen la llamada materia oscura del Universo, cuya existencia se intuyó en los años 30 por sus efectos gravitatorios en la dinámica de los cúmulos de galaxias [1] y, algo más adelante, en la de las galaxias espirales [2]. El Modelo Estándar de la Física de Partículas sólo ofrece un candidato que cumpla todas estas características: el neutrino. Sin embargo, su masa es demasiado pequeña para haber permitido el desarrollo de estructuras como las que vemos en el Universo actual. Por lo tanto, para resolver la cuestión hace falta introducir por lo menos una partícula, todavía desconocida y al margen de dicho Modelo Estándar. Descubrir la naturaleza y propiedades de esta materia oscura es uno de los retos más importantes que tienen planteados hoy por hoy la Física de Partículas, la Astrofísica y la recientemente establecida Física de Astropartículas.

Este trabajo se dedica a los esfuerzos encaminados a su detección directa, en particular a aquéllos que han sido llevados a cabo en las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Se presentarán en primer lugar, y de forma resumida, el conjunto de datos y observaciones astronómicas que apoyan la existencia de la materia oscura en el contexto astrofísico y cosmológico general (sección 2) y en nuestra galaxia en particular (sección 3), lo que se puede decir sobre su naturaleza (sección 4), así como las distintas aproximaciones experimentales a su detección (sección 5) para continuar con un resumen de las técnicas utilizadas y los experimentos más relevantes en el contexto internacional (sección

6). Finalmente se hará un repaso histórico de las investigaciones realizadas en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc orientadas a la detección directa de la materia oscura galáctica fría (secciones 7 y 8).

## 2 El problema de la materia oscura

Recientes avances tecnológicos han permitido llevar a cabo durante las dos últimas décadas observaciones astronómicas de relevancia cosmológica. Los resultados de dichas observaciones no sólo apoyan el modelo de Big Bang, sino que lo extienden y completan de una forma inesperada, requiriendo la incorporación de nuevos elementos al escenario cosmológico. Este nuevo marco emergente, que denominaremos *el modelo cosmológico estándar*, permite una descripción coherente de la geometría del Universo, del origen de las estructuras y de su evolución. Aunque hay otros escenarios en los que se pueden explicar las observaciones, en este trabajo se hará fundamentalmente referencia a dicho modelo cosmológico estándar, mayoritariamente aceptado por la comunidad científica que trabaja en el campo.

En este modelo el Universo comienza su existencia con el Big Bang, una *singularidad* que queda fuera del alcance de nuestras teorías, en el que se crearon el espacio y el tiempo. A partir de entonces, el modelo requiere que en una fracción del primer segundo de vida del Universo se produjera una fase de expansión *explosiva* que se conoce como inflación, que borraría la curvatura y primeras posibles *arrugas* del espacio-tiempo, a la vez que llevaría a escalas astrofísicas las fluctuaciones cuánticas permitiendo entender el origen de las estructuras que observamos a nuestro alrededor. Además resuelve el problema de la homogeneidad del Universo observado, ya que permite que hubiera contacto causal entre todos sus contenidos antes de la etapa inflacionaria. Por el momento no hay evidencias directas de la inflación ni del campo que la genera, aunque es uno de los ingredientes imprescindibles del modelo cosmológico desde que fuera propuesta en los ochenta por A. Guth [3].

Tras la inflación, el Universo quedó en un estado que podríamos llamar de *sopa* caliente de partículas en equilibrio térmico que fue progresivamente enfriándose al tiempo que se expandía. En esta situación de equilibrio dinámico se aniquilaban y creaban pares de partícula y antipartícula de forma continua:  $a + \bar{a} \leftrightarrow b + \bar{b}$  mientras la energía disponible para el proceso ( $\propto k_B T$ ) permitía la creación de la masa en reposo del par de partículas consideradas ( $2m_b c^2$ ). A partir del momento en que una partícula determinada dejaba de ser producida, su contribución a la densidad del Universo resultaba de la competición entre los ritmos de la expansión del Universo y de la aniquilación partícula-antipartícula correspondiente. En el caso de partículas que fueran inestables irían desintegrándose,

de acuerdo con su vida media, hasta desaparecer. Las partículas que, por lo tanto, podrían haber llegado en cantidades importantes a la presente etapa de evolución del Universo, como reliquias o fósiles de su caliente pasado, tienen que ser estables o con vidas medias comparables a la edad del Universo y, además, su posible aniquilación partícula-antipartícula tiene que estar *suprimida*, bien a causa de secciones eficaces de aniquilación pequeñas, o bien debido a la existencia de asimetría entre la cantidad de partículas y antipartículas. En distintas ampliaciones del modelo estándar de la Física de Partículas existen posibles candidatos a poblar el Universo actual con densidades *reliquia* adecuadas para hacer el papel de materia oscura. Entre ellas destacan las teorías supersimétricas [4].

Para una correcta reproducción de las observaciones se requiere la incorporación al modelo cosmológico de elementos no previstos inicialmente en el mismo y, de hecho, desconocidos por la Física de Partículas en la que dicho modelo hunde sus raíces. Por un lado, la inflación requiere un campo escalar atrapado en un falso vacío, el *inflatón*. Por otro lado, la mayor parte de la materia del Universo es *fundamentalmente* diferente de la materia ordinaria de la que tenemos experiencia, los bariones (protones y neutrones, básicamente, por lo que identificaremos materia *normal* con materia bariónica). Finalmente, la mayor parte de la energía del Universo ni siquiera se encuentra en forma de materia y sus efectos *anti-gravitatorios* provocan la aceleración de la expansión del Universo desde hace algunos miles de millones de años. En resumen, en el modelo cosmológico estándar resulta desconocido más del 90% del contenido del Universo en formas de **materia y energía oscuras** al margen del modelo estándar de la Física de Partículas. No deja de ser paradójico que un modelo se considere exitoso en estas condiciones.

Este modelo se construye sobre la teoría de la Relatividad General de Einstein y el principio cosmológico: el Universo es homogéneo e isótropo. A partir de ellos se deduce la ecuación de Friedmann (1) que relaciona la geometría del Universo, determinada por su curvatura  $k$ , con el contenido en materia y energía ( $\rho$  es la densidad de materia y energía en cualquiera de sus formas<sup>1</sup>) y el ritmo de expansión,  $H$ :

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{R^2} \quad (1)$$

siendo  $R$  el factor de escala del Universo y  $G$  la constante de gravitación universal. A partir de esta ecuación se puede definir la densidad crítica del Universo (2), como aquel valor de la densidad que corresponde a un Universo plano, sin curvatura<sup>2</sup> ( $k = 0$ ):

---

<sup>1</sup>Incluyendo la energía de vacío, cuya posible contribución a veces se escribe como la *constante cosmológica* que introdujo Einstein en la ecuación (1).

<sup>2</sup>Antes de la introducción de la energía oscura en los modelos, la geometría del Universo determinaba su destino y se hablaba de Universos cerrados ( $k > 0$ ) y abiertos ( $k < 0$ ) que rekolapsaban, en el primer

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (2)$$

siendo  $H_0$  la constante de Hubble.

La evolución del factor de escala depende también de los contenidos del Universo y, en particular, de las ecuaciones de estado que relacionan la presión con la densidad de energía para cada componente:  $P = P(\rho)$ . Las componentes convencionales y conocidas del Universo, tanto materia como radiación, producen desaceleración en la expansión y, de acuerdo con (3), para producir aceleración en la expansión se requiere una componente en la que  $(\rho + 3P)$  sea negativo, a la que más adelante llamaremos de forma genérica energía oscura.

$$\ddot{R} = - \left( \frac{4\pi G R}{3} \right) (\rho + 3P) \quad (3)$$

En adelante se utilizará la siguiente notación:  $\Omega = \rho/\rho_c$  representa de forma adimensional (en unidades de la densidad crítica) la densidad total de materia-energía del Universo en cualquiera de sus formas y  $\Omega_X$  representa la contribución a la densidad total de la componente X.

A continuación se resumen brevemente los resultados más relevantes de recientes observaciones astronómicas y otras evidencias experimentales que permiten estimar los distintos parámetros cosmológicos. La convergencia de resultados procedentes de ámbitos muy distintos y derivados mediante técnicas experimentales muy diferentes apoya de una forma firme la consistencia del marco cosmológico mayoritariamente aceptado [5].

### 2.1 El fondo cósmico de microondas

Los fotones integrantes de la radiación CMB (Cosmic Microwave Background) estuvieron en equilibrio térmico con el resto de los contenidos del Universo hasta que éste alcanzó una temperatura suficientemente baja como para que a partir del plasma ionizado que llenaba el Universo se formaran átomos neutros (*recombinación*). Unos 380000 años después del Big Bang tuvo lugar la *última dispersión* de estos fotones con el plasma y a partir de ese momento los fotones de la radiación CMB han visto un Universo prácticamente transparente<sup>3</sup>. Los fotones CMB pasaron de ser, durante la era de dominio de la radiación, la parte dominante del presupuesto energético del Universo a ser una fracción despreciable del mismo en la actualidad (< 0.01%), aunque su densidad sigue siendo alta (411 fotones

---

caso, o se expandían por siempre, en el segundo. Con energía oscura esta relación se pierde ya que dependiendo de su ecuación de estado, podría haber Universos con  $k = 0$  y expansión acelerada o que recolapsaran, por ejemplo.

<sup>3</sup>Aunque se cree que hubo periodos posteriores de re-ionización cuando comenzó la formación estelar, por ejemplo.

$\text{cm}^{-3}$ ) y la información que han conservado es vital para entender el Universo: la radiación CMB es como una instantánea fotográfica del Universo cuando tenía unos 380000 años de edad y sus anisotropías (ver figura 1) nos informan del tamaño de las fluctuaciones en la densidad del Universo en el momento de la *última dispersión*.

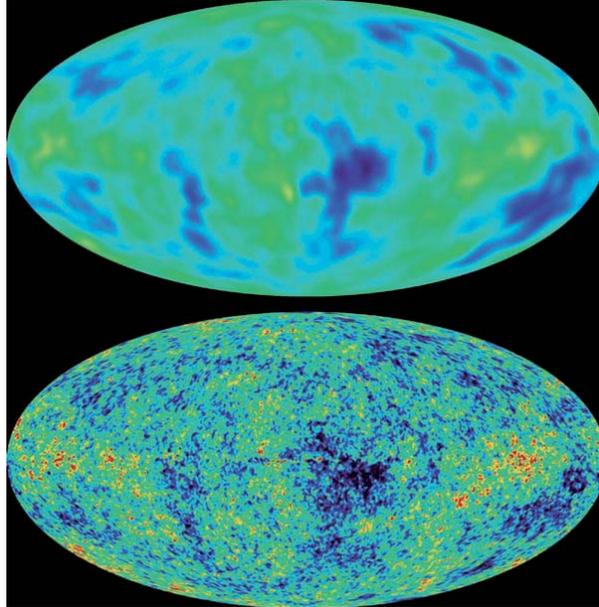


Figura 1: Anisotropías en la radiación CMB medidas por los instrumentos instalados en los satélites COBE y WMAP (este último con una resolución 30 veces mejor y mayor sensibilidad). En azul están las regiones con menor temperatura en la radiación CMB y en rojo las de mayor, correspondiendo a regiones más densas y menos densas, respectivamente, ya que el pozo de potencial gravitatorio produce como resultado un desplazamiento al rojo de las longitudes de onda de los fotones CMB. Crédito: NASA/WMAP team. (En color en la versión digital)

Desde su descubrimiento, de forma accidental, por Penzias y Wilson en 1965, la radiación CMB ha proporcionado uno de los mejores apoyos al modelo del Big Bang al informarnos de la existencia de un Universo mucho más caliente y pequeño en el pasado. Los parámetros que caracterizan a esta radiación han sido determinados con una precisión insospechada: Hitos importantes han sido las medidas llevadas a cabo desde los satélites espaciales COBE<sup>4</sup> (que midió su temperatura:  $2,725 \pm 0,001$  K y observó por primera vez anisotropías de decenas de microKelvin en su valor para distintas direcciones de la bóveda celeste) y WMAP<sup>5</sup>, cuyos resultados, añadidos a los de otros experimentos de base terrestre o en globos como MAXIMA o BOOMERANG, han permitido precisar la forma

---

<sup>4</sup>COSmic Background Explorer.

<sup>5</sup>Wilkinson Microwave Anisotropy Probe.

del espectro angular de potencias de las anisotropías en la radiación CMB, detectar las oscilaciones acústicas de los bariones en el momento del desacoplo de la radiación y de todo ello extraer información sobre la composición y curvatura del Universo. Entre los resultados más importantes derivados de estas medidas, fundamentalmente de los cinco años de datos disponibles de WMAP [6], podemos destacar: el Universo es plano (su densidad de materia-energía es compatible con la crítica,  $\Omega = 1,099_{-0,085}^{+0,100}$ ), los bariones no superan el 5% del contenido del Universo ( $\Omega_b = 0,0441 \pm 0,0030$ ), la densidad de materia oscura es del orden del 20% ( $\Omega_{dm} = 0,214 \pm 0,027$ ) y, por lo tanto, la energía oscura debe contribuir a la densidad total de materia-energía con el 75% restante ( $\Omega_\Lambda = 0,742 \pm 0,030$ ).

## 2.2 Las estructuras a gran escala

La distribución de galaxias en nuestro Universo muestra la existencia de agrupaciones jerárquicas (cúmulos, supercúmulos, vacíos, burbujas, láminas o filamentos) que son resultado de la acción de la gravedad sobre las fluctuaciones primordiales en la distribución de materia del Universo. En la actualidad se pueden medir simultáneamente corrimientos al rojo para cientos de galaxias y ello ha permitido extraer información relevante a escalas en las que ya se revela la naturaleza homogénea del Universo (al nivel que muestra también la radiación CMB en una época muy anterior de su evolución). Los dos esfuerzos experimentales más importantes hasta la fecha son *Anglo-Australian Two-degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS) y *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) (ver figura 2). Este último ya ha medido del orden de un millón de galaxias, habiendo cubierto con sus observaciones más del 25% del firmamento y creado los mayores mapas 3-D de estructuras cósmicas.

Las distribuciones de galaxias obtenidas, en función de su corrimiento al rojo<sup>6</sup>, por 2dFGRS y SDSS han puesto también en evidencia las oscilaciones acústicas de bariones, identificadas a  $z \approx 0,35$ , que había detectado WMAP en una época muy anterior ( $z \approx 1100$ ). La comparación de las amplitudes de estas oscilaciones en dos épocas tan diferentes aporta una información fundamental: las pequeñas fluctuaciones que muestran los datos de WMAP no habrían tenido tiempo de crecer y convertirse en las estructuras que observamos hoy. Es imprescindible la existencia de pozos de potencial mayores, debidos a materia no bariónica, que fuera no relativista y se hubiera desacoplado del resto del Universo antes de que lo hiciera la radiación para que pudiera haber pozos de potencial mayores que los que muestran las fluctuaciones en la radiación CMB. Esto pone de manifiesto la necesidad de la existencia de la denominada *materia oscura fría* (Cold Dark Matter, CDM).

---

<sup>6</sup>El corrimiento al rojo,  $z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e}$ , siendo  $\lambda_o$  y  $\lambda_e$  las longitudes de onda observada y emitida, respectivamente, es resultado de la expansión del Universo y, por lo tanto, se relaciona con el cambio en el factor de escala y el tiempo transcurrido,  $R(t) = \frac{R(0)}{1+z}$ , siendo  $R(0)$  el valor actual.

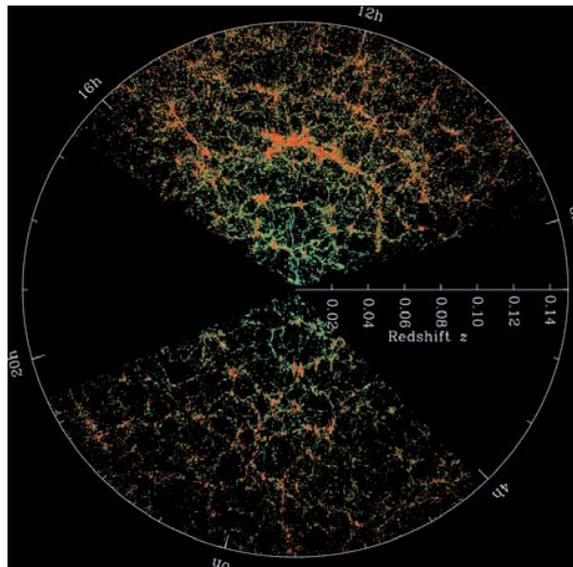


Figura 2: Corte de la distribución 3-D de galaxias obtenida por la Sloan Digital Sky Survey. Cada punto representa una galaxia y su color indica la edad de las estrellas que contiene (el rojo se utiliza para las estrellas más antiguas). Crédito: M. Blanton, the Sloan Digital Sky Survey Collaboration. (En color en la versión digital)

Las simulaciones a gran escala de la evolución de distintos modelos de Universo (con o sin materia y energía oscuras) van más allá de lo puramente cualitativo y permiten comparaciones cuantitativas con las observaciones astronómicas de la distribución de estructuras a gran escala, con la consiguiente puesta a prueba de dichos modelos. Recientemente se ha hecho pública la simulación de más alta resolución de formación de estructuras en un modelo de Universo que incluye una componente de materia oscura fría. Ha sido denominada *Millenium Run* y sólo se ha empezado a extraer parte de la información que contiene sobre la evolución del proceso de formación de estructuras y su distribución final. El acuerdo entre la simulación y los resultados observacionales es *asombroso* [7] (ver figura 3)<sup>7</sup>.

Estas observaciones, junto con los resultados de la medida de la anisotropía en la radiación CMB, han permitido establecer un modelo satisfactorio que explica la formación de estructuras en el Universo: el origen de las fluctuaciones primordiales en la densidad de materia-energía se atribuye a la expansión inflacionaria que convirtió fluctuaciones cuánticas en inhomogeneidades a escalas astrofísicas; después, la existencia de materia oscura fría (no relativista) permitiría explicar una formación de estructuras de abajo

<sup>7</sup>Se puede acceder a visualizar el resultado de la simulación en formato mpg en [8].

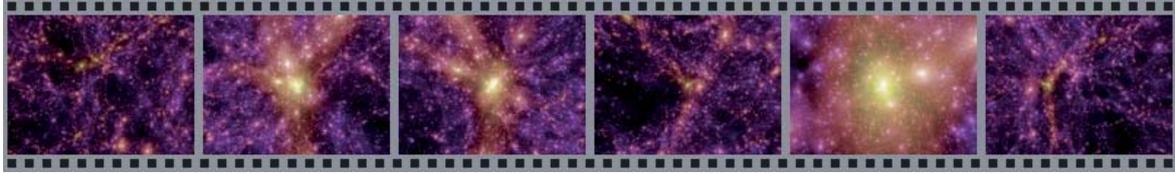


Figura 3: Fotogramas de uno de los vídeos elaborados a partir de la *Millenium Simulation* mostrando la distribución de materia oscura en el Universo en la actualidad. Esta simulación ha sido llevada a cabo con más de  $10^{10}$  partículas. Permite visualizar la morfología de las estructuras formadas a diferentes escalas (desde varios *Gpc* hasta subestructuras del orden de  $10 \text{ kpc}$ ). Crédito: Springel *et al.* [7, 8]. (En color en la versión digital)

hacia arriba como la aparentemente observada (primero se habrían formado las galaxias, luego los cúmulos y finalmente los supercúmulos). En este contexto, los neutrinos, cuya masa no nula ha sido recientemente confirmada (pero no determinada) por experimentos de oscilaciones de neutrinos [9], no pueden ser una contribución demasiado importante a la energía total del Universo. Con masas en el rango permitido por los experimentos, los neutrinos se comportarían como partículas relativistas (*materia oscura caliente*) cuyo flujo habría borrado las fluctuaciones de materia a escala galáctica y las estructuras se habrían formado preferentemente de arriba hacia abajo (primero los supercúmulos, luego los cúmulos y finalmente las galaxias).

### 2.3 La expansión del Universo y las supernovas de tipo Ia

Edwin Hubble descubrió en 1929 la expansión del Universo al establecer la correlación entre las distancias a las galaxias próximas y sus velocidades de recesión. El valor de la constante de Hubble,  $H_0$ , es el ritmo de expansión del Universo en el momento actual y se obtiene del cociente entre la velocidad de recesión de una galaxia y su distancia. Estimar su valor fue durante décadas un problema clave para la Astronomía y Cosmología. Sólo recientemente, y gracias al telescopio espacial Hubble, las medidas experimentales (utilizando cinco métodos diferentes para la determinación de la distancia) convergen a un valor único:  $H_0 = 72 \pm 2 \pm 7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  [10]. Los resultados derivados de WMAP, por ejemplo, dan un valor totalmente compatible de  $H_0 = 71,9_{-2,7}^{+2,6} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  [6].

Pero surgió una sorpresa del estudio de las supernovas de tipo Ia (SNIa), candelas extraordinarias utilizadas para determinar las distancias a galaxias de muy alto corrimiento al rojo. Cuando se esperaba observar un frenado lento del ritmo de expansión a causa de la atracción gravitatoria que experimenta toda la materia se encontró lo opuesto: las supernovas más lejanas se ven más débiles de lo que les correspondería en un Universo con

ritmo de expansión constante, indicando que la expansión se está acelerando desde hace algunos miles de millones de años. Esta conclusión se apoya en observaciones de más de 200 supernovas de tipo Ia por parte del Hubble Space Telescope (*Supernova Cosmology Project*, SCP, y *High-z Supernova Search Team*, HST) [11] y sólo puede ser explicada mediante un efecto anti-gravitatorio con origen en alguna forma desconocida de energía que llamamos *energía oscura*.

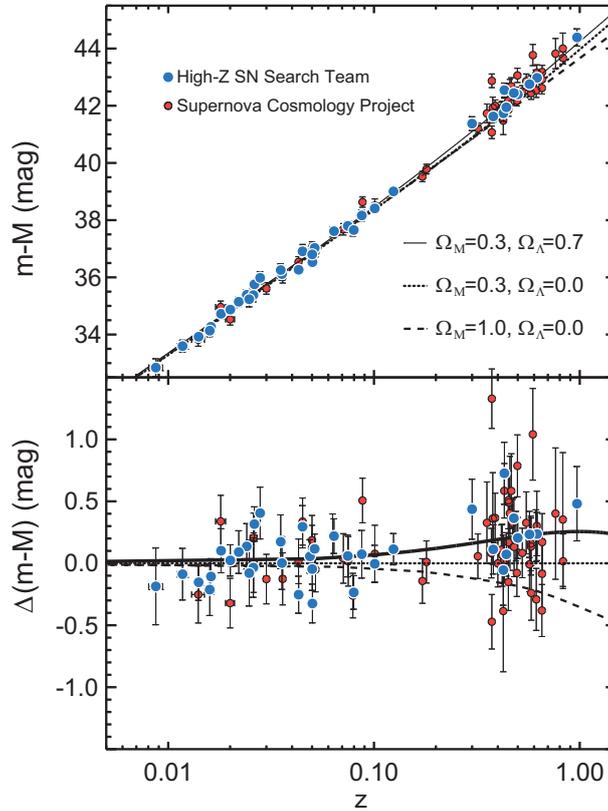


Figura 4: Diagramas de Hubble construidos con datos de supernovas a muy altos corrimientos al rojo observadas por las colaboraciones *Supernova Cosmology Project* y *High-z Supernova Search Team* [11]. Se muestran las predicciones de algunos modelos, incorporando o no energía oscura, para su comparación con las observaciones.  $\Omega_M$  representa la contribución total de materia (en todas sus formas) a la densidad del Universo. Crédito: Colaboraciones SCP/HST. (En color en la versión digital)

Aceptando un Universo plano ( $k=0$ ) los resultados derivados de las SNIa son compatibles con los modelos que incluyen  $\Omega_M = 0,25 \pm 0,07 \pm 0,04$  y  $\Omega_\Lambda = 0,75 \pm 0,07 \pm 0,04$  (ver figura 4). Su concordancia con los resultados para  $\Omega$  y  $\Omega_M$  derivados de las fluctuaciones en la radiación CMB representa un apoyo importante al marco cosmológico actual, ya que, en un caso, el resultado se deriva de observaciones del Universo reciente ( $z < 1$ ) y en el otro, del Universo primitivo ( $z \approx 1100$ ).

## 2.4 Los cúmulos de galaxias

La dinámica del cúmulo de galaxias de Coma permitió poner en evidencia en los años treinta la necesidad de grandes cantidades de materia oscura: la aplicación del teorema del virial de acuerdo con la materia luminosa observada y las velocidades de las galaxias medidas no permitía su estabilidad [1]. Desde entonces se han ido acumulando observaciones ópticas, de radio y de rayos X de numerosos cúmulos de galaxias, y se ha desarrollado el análisis de los efectos de lente gravitatoria que algunos cúmulos muy masivos producen en la luz emitida desde galaxias muy distantes en la misma línea de visión (ver figura 5). Estas observaciones han permitido determinar los cocientes entre la cantidad de materia normal y de materia oscura que contienen, indicando que aproximadamente un tercio de la materia del Universo es oscura,  $\Omega_M = 0,3 \pm 0,04$  y apenas proporcionan información sobre la posible presencia de energía oscura,  $\Omega_\Lambda = 0,75^{+0,48}_{-0,72}$  [12].

En particular, el estudio del *bullet cluster* ha aportado recientemente (agosto de 2006 [13]) datos relevantes sobre la dinámica de la materia contenida en los cúmulos al combinar la información que proporcionan las observaciones ópticas sobre la distribución de la materia luminosa, las observaciones de rayos X sobre la distribución de la materia bariónica y el análisis de los efectos de lente gravitatoria sobre la distribución de materia oscura. El *bullet cluster* es resultado de una colisión entre dos cúmulos y la distribución de materia oscura frente a materia bariónica que se observa sólo puede interpretarse si la materia oscura no se comporta en la colisión como la materia normal, no sufriendo efectos disipativos (ver figura 6).

En la figura 7 se pueden ver, en el espacio paramétrico  $(\Omega_M, \Omega_\Lambda)$ , las regiones compatibles con los resultados de las medidas en cúmulos, con los derivados del estudio de las supernovas Ia y con los de la radiación CMB. La compatibilidad de los resultados procedentes de indicadores cosmológicos tan diferentes apoya la credibilidad del marco cosmológico actual. Los resultados para los parámetros más importantes que se obtienen de la combinación de los datos de WMAP, los resultados de las supernovas de tipo Ia y las oscilaciones acústicas de bariones extraídas de la distribución de galaxias, son [6]:  $\Omega = 1,0052 \pm 0,0064$ ,  $\Omega_b = 0,0462 \pm 0,0015$ ,  $\Omega_{dm} = 0,233 \pm 0,013$ ,  $\Omega_\Lambda = 0,721 \pm 0,015$ .

## 2.5 Las abundancias de los elementos ligeros y los cálculos de la nucleosíntesis primordial

La parte visible de la materia ordinaria contribuye como mucho al 1% del balance de energía y masa del Universo. El resto de la materia es oscura y sólo detectamos su presencia por sus efectos gravitatorios. Para estimar cuánta materia ordinaria hay en nuestro Universo se utilizan diferentes métodos que proporcionan una respuesta similar. Hasta disponer de las medidas de anisotropías en la radiación cósmica de fondo y las oscilaciones acústicas de bariones, el más preciso de todos ellos era el basado en la comparación de las

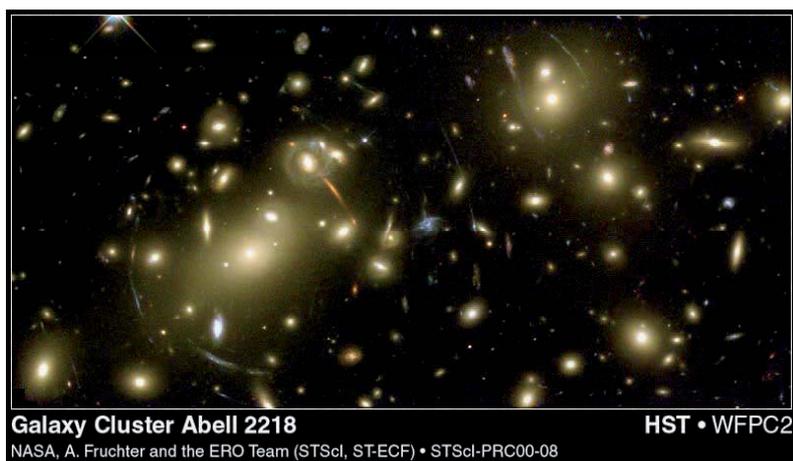


Figura 5: Fotografía tomada por el Telescopio Espacial Hubble del cúmulo de Abell 2218 en la que se pueden observar varias imágenes de la misma galaxia formadas por el efecto de lente gravitatoria. Crédito: NASA, A. Fruchter, ERO Team. (En color en la versión digital)

predicciones de las abundancias de los núcleos más ligeros, realizadas en el marco de los cálculos de la nucleosíntesis primordial, y las observadas en la actualidad para los mismos. En los primeros minutos tras el Big Bang se formaron, a partir de protones y neutrones, los elementos químicos hasta el Berilio. Las bases de los cálculos de la BBN fueron establecidas ya en 1948 [14] y sólo permiten reproducir las observaciones experimentales para valores muy acotados de la densidad de bariones, en torno a  $(3,8 \pm 0,2) 10^{-31} g cm^{-3}$  (aproximadamente el 4% de la densidad crítica) [15]. Su compatibilidad con los resultados obtenidos a partir de las medidas de la radiación CMB resulta también un refuerzo notable al marco cosmológico mayoritariamente aceptado y proporciona una prueba adicional de la consistencia del modelo cosmológico y simultáneamente de la Astrofísica Nuclear y de Partículas, requerida en los cálculos BBN.

La existencia a escala cosmológica de materia oscura no bariónica está fuertemente apoyada por evidencias observacionales de índole muy diversa. El Universo compatible con dichas observaciones consta de cinco componentes diferentes: materia ordinaria o bariónica, fotones (CMB), neutrinos (tan abundantes como los fotones de la radiación CMB), materia oscura fría (CDM) y energía oscura ( $\Lambda$ ). En la figura 8 se representa el reparto del presupuesto de materia y energía del Universo entre estas componentes que mejor reproduce las distintas evidencias experimentales interpretadas en el referido marco cosmológico estándar. A partir de aquí seguiremos tratando de la materia oscura fría y su

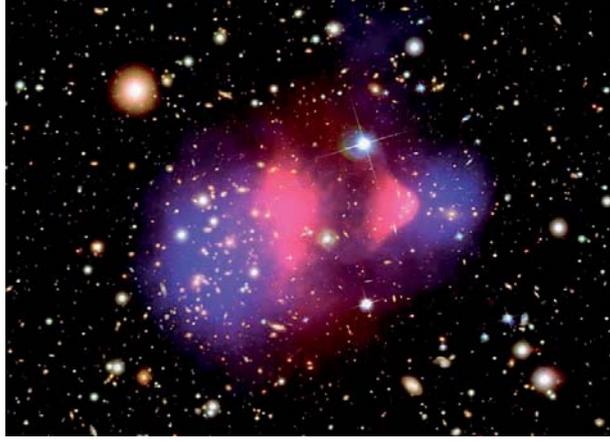


Figura 6: Imagen compuesta del cúmulo de galaxias 1E 0657-56, también conocido como *bullet cluster*, en la que se observa la distribución de materia visible (Hubble Space Telescope), la distribución de gas caliente en rosa (CHANDRA) y la distribución de materia oscura obtenida por el efecto de lente gravitatoria en azul. Crédito: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch *et al.*; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe *et al.*; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe *et al.* (En color en la versión digital)

detección; con respecto a la energía oscura, todavía hay poco que decir: su presión debe ser negativa pero ni siquiera sabemos si su densidad de energía es constante en el tiempo (*constante cosmológica*) o varía (*quintaesencia*).

Hay otras soluciones que pueden evitar la introducción de materia oscura en el modelo cosmológico. Entre ellas resulta obligado citar la posibilidad de una modificación a la dinámica newtoniana en el límite de aceleraciones débiles (del orden de  $10^{-8}$  cm  $s^{-2}$ ), teorías MOND, que produciría efectos capaces de reproducir las curvas de rotación galáctica observadas (ver sección 3) [16]. Sin embargo, parece cuestionable su capacidad para explicar el marco cosmológico completo [17], puesto que parece incompatible con los resultados de lente gravitatoria en cúmulos [18] y las recientes observaciones del *bullet cluster* [13]. Sus ecuaciones pueden ser derivadas a partir de la dinámica newtoniana clásica incluyendo la influencia gravitatoria de una componente de materia oscura [19], por lo que no se puede considerar una teoría totalmente independiente de la hipótesis de la existencia de materia oscura y es razonable que explique hechos que ella explica. En cualquier caso, no hay que descartar que estos nuevos ingredientes requeridos para encajar las observaciones en el marco cosmológico nos estén indicando que todavía no tenemos una teoría adecuada para la gravitación.

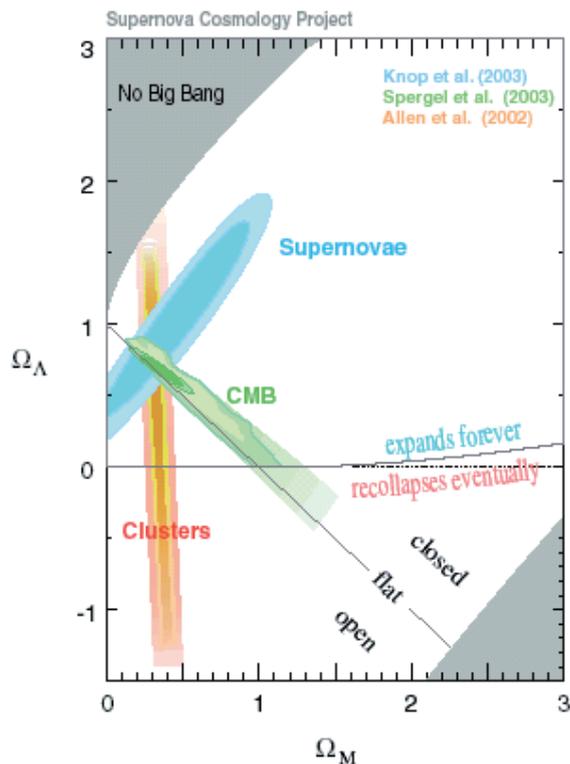


Figura 7: Límites obtenidos para las densidades de materia y de energía oscura con los datos de la radiación CMB, de las SNIa y de los cúmulos. La compatibilidad entre los resultados de tan diferentes indicadores cosmológicos resulta un apoyo importantísimo para el modelo cosmológico mayoritariamente aceptado. Crédito: Supernova Cosmology Project (SCP) Collaboration. (En color en la versión digital)

### 3 La materia oscura en las galaxias

Con respecto a la materia oscura, aparte de los argumentos que apoyan su existencia en base a las numerosas evidencias experimentales, es poco lo que podemos decir de ella y, en cambio, son numerosas las incógnitas que quedan planteadas, y que afectan de una forma fundamental a los esfuerzos encaminados a su detección directa en el laboratorio (a los que haremos referencia en la sección 5). Se van a considerar en esta sección y la siguiente dos de las más importantes: cuánta materia oscura se encuentra en las galaxias, en particular en la nuestra, y más concretamente en el entorno del Sistema Solar, y cuál es su naturaleza.

La materia oscura galáctica ha sido cuantificada por medio de las curvas de rotación de las galaxias espirales que se fueron acumulando desde los años setenta [2] y que mostraron velocidades de rotación constantes hasta distancias del orden de 30 kpc (ver figura 9).

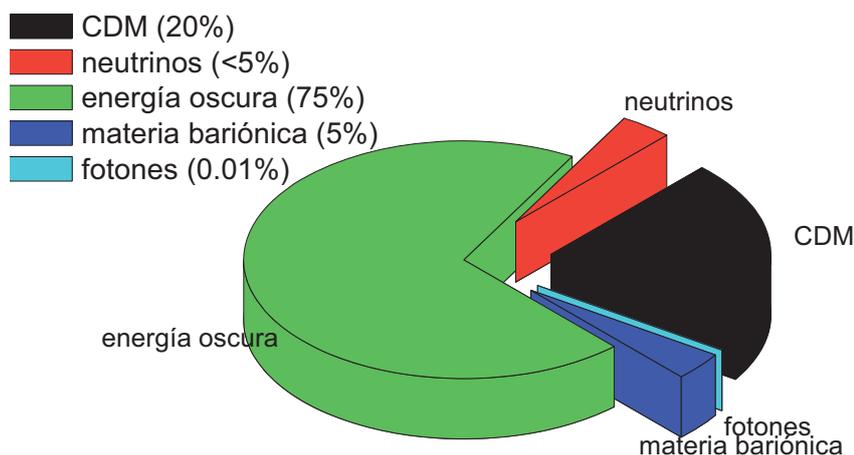


Figura 8: Posible reparto de materia y energía en el Universo entre las cinco componentes que requiere el modelo cosmológico estándar y que permite la correcta interpretación de todas las evidencias experimentales acumuladas (suponiendo  $\Omega=1$ ). (En color en la versión digital)

Inicialmente estos resultados no se relacionaron con el problema identificado por Zwicky en los cúmulos [1] y la posible existencia de materia oscura, hasta que Ostriker y Peebles publicaron sus trabajos sobre la forma de evitar la inestabilidad de los discos galácticos mediante halos esféricos y masivos y su relación con el aumento de masa observado en función del radio [20].

Tradicionalmente esta materia oscura se ha considerado, por simplicidad, distribuida en halos isotermos, esféricos y sin rotación que se extienden hasta distancias del orden de 10 veces el radio galáctico y con perfiles de densidad  $\propto r^{-2}$  para explicar las velocidades de rotación constantes fuera del radio visible de la galaxia. Sin embargo, recientemente, simulaciones mucho más completas de la evolución de las estructuras con una componente importante de materia oscura fría parecen indicar la plausibilidad de que los halos no sean esféricos ni isotermos: se plantean modelos *más reales* de halo axisimétricos, triaxiales, aplanados, con rotación, con subestructuras, etc. [21].

En el caso particular de nuestra galaxia, la Vía Láctea, la curva de rotación parece indicar que en el entorno del Sol la densidad de materia oscura se encontraría entre 0,2 y 0,4  $\text{GeV cm}^{-3}$  (en adelante consideraremos como valor para dicha densidad  $\rho_0 = 0,3 \text{ GeV cm}^{-3}$ ) y que los WIMPs gravitatoriamente ligados a la galaxia deberían moverse con velocidades del orden de las de rotación de las estrellas del disco ( $\approx 220 \text{ km s}^{-1}$ ). Usualmente se adopta, por simplicidad, una distribución de velocidades maxwelliana, con velocidad de escape en torno a  $650 \text{ km s}^{-1}$ , e isótropa en el sistema de referencia del halo. Sin embargo, no está descartado que el Sistema Solar esté atravesando en estos

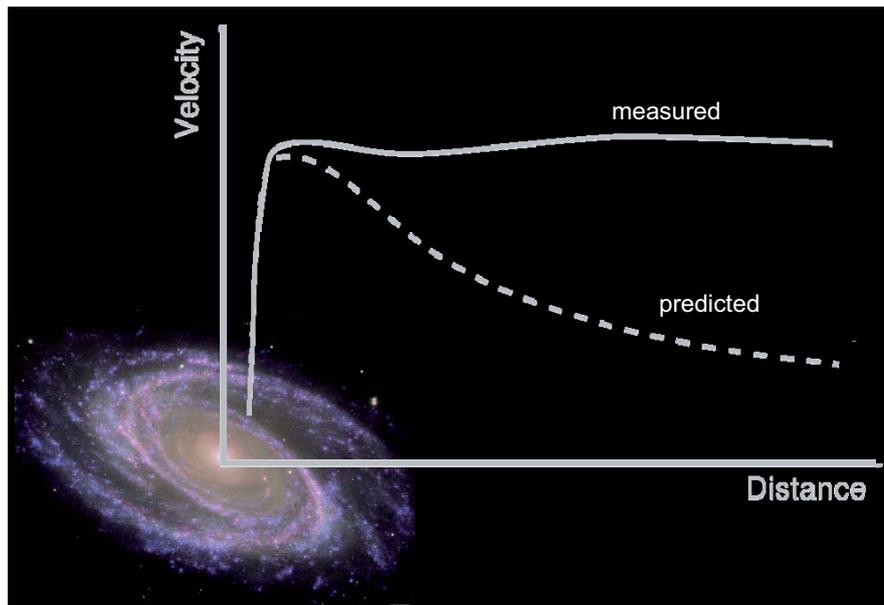


Figura 9: Representación de una curva de velocidades de rotación medida en una galaxia espiral frente a la predicha, en base a la materia visible que contiene. Las velocidades se mantienen constantes hasta distancias muy superiores al radio de la galaxia visible. (En color en la versión digital)

momentos una corriente de marea dejada atrás en su órbita por la galaxia enana SagDEG (Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy), descubierta en 1994 [22] y que está siendo destruida por el efecto de marea que le provoca la atracción gravitatoria de la Vía Láctea [23]. Dicha corriente de marea podría estar constituida mayoritariamente por materia oscura, implicando la posible existencia de subestructura en el halo galáctico y la posibilidad de que la densidad de materia oscura en nuestro entorno sea superior a la derivada de las curvas de rotación galácticas, así como que la distribución de velocidades de las partículas constituyentes de la materia oscura incluya flujos no isótropos.

#### 4 La naturaleza de la materia oscura galáctica fría

Con respecto a la naturaleza de esta materia oscura galáctica fría resulta imprescindible buscar fuera del Modelo Estándar de la Física de Partículas para encontrar candidatos satisfactorios: masivos, débilmente interaccionantes, no bariónicos y estables (al menos con tiempos de vida del orden de la edad del Universo). Entre los candidatos preferidos debemos mencionar dos partículas hipotéticas propuestas en un contexto muy diferente del cosmológico, por lo que se consideran sólidamente fundamentadas desde el punto de vista teórico: el axión (que resolvería el problema de CP en la interacción fuerte) y el

neutralino (que en muchos de los modelos supersimétricos es la partícula supersimétrica más ligera, LSP<sup>8</sup>, estable si se conserva la R-paridad). La Supersimetría es una de las ampliaciones del Modelo Estándar de la Física de Partículas más atractivas [4]. Requiere la introducción de un amplio espectro de *nuevas* partículas, alguna(s) de las cuales podrían resolver el problema de la materia oscura. Como ejemplo, para los modelos supersimétricos CMSSM<sup>9</sup> considerados en [24] se ha representado en la figura 10 la región de masas y secciones eficaces que corresponderían al neutralino.

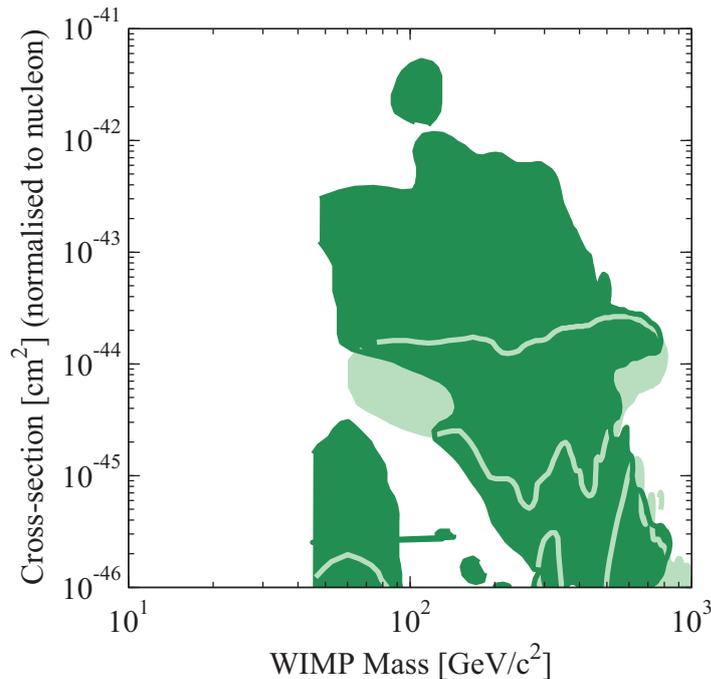


Figura 10: Diagrama  $(m, \sigma)$  para neutralinos en el marco de modelos CMSSM considerados en [24]. Crédito: R. Gaitskell, V. Mandic and J. Filippini (<http://dmttools.berkeley.edu/limitplots/>). (En color en la versión digital)

En caso de existir, estas hipotéticas partículas se habrían producido en los primeros momentos de vida del Universo en grandes cantidades y en muchos de los modelos teóricos habrían podido sobrevivir en número suficiente para explicar la materia oscura. Sus interacciones garantizan que en los procesos de formación de estructuras actuarían, en ambos casos, como materia oscura fría, no relativista, pese al rango tan diferente de masas que abarcan: los axiones desde unos meV hasta del orden del eV y los neutralinos de unos pocos a cientos de GeV.

---

<sup>8</sup>Lightest Supersymmetric Particle.

<sup>9</sup>Constrained Minimal Supersymmetric Standard Model.

A partir de aquí hablaremos de una forma genérica de WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) para referirnos a aquellos candidatos a la materia oscura fría similares al neutralino (con masas en el rango de 1 a 1000 GeV): masivos, neutros y débilmente interaccionantes, aunque no tienen por qué estar sujetos a las ligaduras que el marco supersimétrico impone a los neutralinos. Los esfuerzos experimentales dedicados a la búsqueda de los hipotéticos axiones galácticos y solares, que requieren técnicas diferentes de las utilizadas en la detección de WIMPs y que no van a ser revisadas en este trabajo, se pueden consultar, por ejemplo, en [25].

## 5 La detección de los WIMPs

Para la detección de los WIMPs supuestamente integrantes del halo galáctico se utilizan tanto métodos directos (mediante el retroceso nuclear que producen en su dispersión elástica con los núcleos de un detector utilizado como *blanco* en el laboratorio) como métodos indirectos (a través de los productos emitidos en su aniquilación en el halo galáctico o en el interior del Sol y la Tierra donde podrían quedar atrapados gravitacionalmente. En dicha aniquilación se emitirían fotones de alta energía, neutrinos, pares electrón-positrón, pares protón-antiprotón, etc.).

En el ámbito de la detección indirecta se están alcanzando sensibilidades competitivas frente a las posibilidades que ofrece la detección directa, tanto en búsquedas de neutrinos de unos GeV procedentes del centro del Sol o la Tierra en los telescopios de neutrinos (ANTARES, ICECUBE, etc.), como en búsquedas de rayos gamma y rayos cósmicos procedentes del centro o el halo galáctico. En concreto, recientes observaciones de una línea gamma de 511 keV intensa procedente del *bulge* galáctico con el satélite INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) sugieren la existencia de una fuente desconocida de positrones en la galaxia [26]. Entre las potenciales explicaciones para el origen de estos positrones hay que mencionar como posibilidad la aniquilación de partículas de materia oscura ligeras (1-100 MeV) en pares electrón-positrón [27]. Análogamente, medidas del experimento HEAT (realizadas en globos) del espectro de positrones cósmicos muestran un exceso en la región de 7-8 GeV que sería también compatible con la aniquilación de neutralinos en el halo galáctico [28]. Los experimentos en satélites que medirán con precisión los flujos de antiprotones y positrones en los rayos cósmicos pueden aportar nuevos datos relevantes para la resolución de este problema en el próximo futuro. En particular, el experimento PAMELA (en operación en un satélite ruso desde su lanzamiento en junio de 2006) y GLAST (Gamma Large Area Space Telescope)<sup>10</sup>, puesto en órbita en junio de 2008, se espera que aporten en los próximos años nuevos indicios de una posible señal indirecta de la existencia de la materia

---

<sup>10</sup>Recientemente renombrado como Fermi Gamma-ray Space Telescope.

oscura.

Por supuesto, en caso de existir, estas partículas podrían producirse en los grandes aceleradores para energías de colisión suficientemente elevadas. Hasta el momento no se ha observado ningún indicio de la producción de WIMPs en aceleradores, y, aunque de una forma fuertemente dependiente del modelo de WIMP considerado, con los datos existentes se pueden excluir, por ejemplo, neutralinos de masa inferior a 47 GeV [29]. En este aspecto, la reciente puesta en funcionamiento de LHC puede cambiar drásticamente el escenario que afrontamos, ya que la puesta a prueba de algunos modelos supersimétricos, por ejemplo, está entre sus objetivos principales.

En la detección directa los WIMPs depositan solamente unos pocos keV en un proceso de dispersión elástica que tenga lugar con uno de los núcleos del detector y el ritmo de interacción correspondiente es extremadamente bajo por lo que su observación experimental requiere detectores con muy bajos tanto fondo radiactivo como umbral en energías. Dado que la señal buscada no presenta un espectro con rasgos identificables frente al fondo radiactivo natural, la mayor parte de los experimentos sólo pueden dar resultados *negativos*, es decir, excluir candidatos para los que la señal debiera haber resultado visible por encima del fondo. Para una detección *positiva* los experimentos deben enfocarse hacia la búsqueda de señales distintivas (como son la modulación de periodo anual en los ritmos de interacción que corresponde a la variación de la velocidad relativa WIMP-detector como consecuencia del movimiento de la Tierra en torno al Sol o dependencias direccionales en los ritmos de retrocesos nucleares). Éste es un tema de gran actualidad debido a los resultados del experimento DAMA-LIBRA, en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, que observa una señal positiva en el análisis de modulación anual en sus datos que solamente la materia oscura parece capaz de explicar [30, 31].

### 5.1 Características de la interacción y ritmos esperados

El flujo de WIMPs que atraviesa la Tierra, de acuerdo con los valores usuales para parámetros como la densidad y las velocidades cuadráticas medias de los WIMPs en el halo, depende de la masa del WIMP, siendo del orden de  $10^8$  a  $10^{10}$  WIMPs  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , para masas en el rango de 1 TeV a 10 GeV. A pesar de este elevado flujo, el ritmo de interacción esperado en un detector es muy pequeño, ya que la sección eficaz WIMP-nucleón debería ser inferior a  $10^{-5}$  pb (ver figura 10) y generar ritmos inferiores a 1 cuenta  $\text{kg}^{-1} \text{día}^{-1}$ .

Para velocidades de los WIMPs en el rango considerado, el depósito energético se produce principalmente por dispersión elástica con los núcleos del detector y, de una forma general, la interacción del WIMP puede descomponerse en dos términos. Uno de ellos corresponde a interacciones independientes del espín (SI), para las que las amplitudes

de dispersión con los nucleones individuales se suman coherentemente y la sección eficaz nuclear es  $\propto A^2$ , siendo  $A$  el número másico del núcleo. El otro término, dependiente del espín (SD), corresponde a interacciones en las que el WIMP se acopla de forma efectiva al espín nuclear total. Dependiendo de la naturaleza del WIMP, por ejemplo de la composición del neutralino, puede predominar uno de los dos tipos de interacción o ser comparables ambas contribuciones. Debido a que en muchos modelos supersimétricos domina la interacción SI, se suele preferir como blancos núcleos con  $A$  grande, que incrementan la sensibilidad. En cualquier caso, resulta imprescindible explorar todas las posibilidades e interesan también aquellos blancos que incluyan núcleos con espín no nulo.

Un simple argumento cinemático indica que el máximo depósito de energía en una dispersión WIMP-núcleo resulta cuando el ángulo de dispersión en el centro de masas es igual a  $180^\circ$ . La energía de retroceso máxima impartida al núcleo en este caso es:

$$E_R^{max} = 2v^2 m_{WN}^2 / m_N \quad (4)$$

donde  $v$  es la velocidad de los WIMPs relativa al detector,  $m_N$  la masa del núcleo y  $m_{WN}$  la masa reducida del sistema WIMP-núcleo. Para una determinada masa del WIMP, esta energía máxima de retroceso, determinada mediante (4), se hace a su vez máxima cuando  $m_N = m_W$ , siendo su valor  $\frac{1}{2} m_N v^2$ . Para velocidades de los WIMPs relativas al detector de pocos cientos de  $\text{km s}^{-1}$  y masas del WIMP del orden de 100 GeV se obtienen valores para  $E_R^{max}$  inferiores a 100 keV.

El ritmo de interacción de los WIMPs en el detector en función de la energía depositada en forma de retroceso nuclear, se puede expresar como:

$$\frac{dR}{dE_R} = n_W N_N \int f(v) v \frac{d\sigma_{WN}}{dE_R} dv = \frac{\rho_0 m_{detector}}{2m_W m_{WN}^2} \int \frac{f(v)}{v} \sigma_{WN} dv \quad (5)$$

quedando en función de parámetros astrofísicos relacionados con el modelo de halo considerado (para los que existen estimaciones, aunque afectadas de importantes incertidumbres) y parámetros del modelo de WIMP, como la masa y su sección eficaz, totalmente desconocidos. En la figura 11 se pueden comparar los ritmos de detección esperados en un detector de yoduro de sodio para diferentes masas de WIMP y en distintas épocas del año (cambia la velocidad relativa WIMP-detector, como se verá más adelante).

La conversión de la energía de retroceso en energía visible depende del mecanismo de detección considerado. De una forma general, la respuesta a un determinado depósito de energía es diferente según cuál sea la partícula que ha interactuado. La señal visible (que puede ser ionización, en un detector semiconductor o fluorescencia, en un centelleador, por ejemplo) es usualmente mayor para depósitos energéticos causados por electrones que para los debidos a retrocesos nucleares de la misma energía. La calibración de los detectores se suele realizar con fuentes gamma, y los fotones al interactuar ceden su energía a

los electrones del blanco, por lo que hablaremos de la señal que producen en términos de energía equivalente de electrón ( $E_{ee}$ , que se suele expresar en keVee). Para poder convertir las energías *vistas* por el detector en energías de retroceso nuclear es preciso conocer el factor de eficiencia relativa (REF), definido como el cociente entre la señal producida por una partícula que deposita una energía  $E_{dep}$  y la señal producida por un electrón que deposita la misma energía .

$$E_R = REF \cdot E_{ee} \quad (6)$$

La mayoría de los detectores son menos eficientes en la conversión en señal visible de la energía depositada por retrocesos nucleares que por electrones de la misma energía ( $REF < 1$ ), por lo que los espectros de retrocesos producidos por los WIMPs galácticos se observan a energías equivalentes de electrón claramente inferiores a los 100 keVee, haciendo imprescindible la disponibilidad de detectores con muy bajo umbral en energías.

## 5.2 Rechazo del fondo radioactivo

Las interacciones de los WIMPs son tan poco probables que los experimentos dedicados a búsqueda de materia oscura necesitan detectores masivos y/o largas exposiciones (suele utilizarse como parámetro el producto de la masa por el tiempo de medida, expresado en kg·día). Además resulta imprescindible la operación de dichos experimentos en condiciones de ultra-bajo fondo radioactivo. Los rayos cósmicos contribuyen en gran medida al fondo radioactivo en superficie, por tanto estos experimentos han de estar emplazados en laboratorios subterráneos, donde su flujo se reduce en varios órdenes de magnitud (ver sección 7).

Además, los detectores deben estar fabricados con materiales de la máxima radiopureza y adecuadamente apantallados de la radiactividad medioambiental mediante blindajes específicamente diseñados.

La componente mayoritaria del fondo radioactivo es la de origen  $\beta/\gamma$ , por tanto, para optimizar la sensibilidad de un experimento, es fundamental disponer de un mecanismo que permita distinguir retrocesos nucleares (como los producidos por neutrones o WIMPs) de retrocesos electrónicos (debidos a interacciones de electrones o fotones). Las técnicas de rechazo del fondo con más éxito en la actualidad se basan en detectores con un doble mecanismo de conversión de la energía depositada en señal visible. Cuando el factor de eficiencia relativa de cada uno de los sistemas de conversión es suficientemente distinto, la discriminación es muy eficiente incluso en la región de baja energía. Este sistema ha producido excelentes resultados con detectores criogénicos que, además de medir ionización o centelleo, detectan la energía depositada en forma de calor y en detectores que hacen uso de líquidos *nobles* (ver secciones 6.3, 6.4 y 8.3). El uso de estas técnicas ha permitido

reducir el fondo en estos experimentos en varios órdenes de magnitud y ha posibilitado alcanzar hoy en día las mejores sensibilidades en la detección directa de materia oscura.

### 5.3 Diagramas de exclusión y estudio de señales distintivas

El método utilizado normalmente para la obtención de resultados en los experimentos de detección directa es la comparación del espectro experimental con el espectro calculado para una población de WIMPs galácticos (en el marco de un determinado modelo del WIMP y del halo, haciendo uso de (5)). De esta comparación se deriva la exclusión de aquellos candidatos que hubiesen producido una señal superior al fondo observado, y se representan en el plano  $(m_W, \sigma)$  las regiones de parámetros compatibles con el fondo observado y las que pueden ser excluidas.

Para conseguir una identificación positiva de la presencia de materia oscura en los datos de un experimento es preciso buscar señales distintivas características de los WIMPs y que no compartan los posibles fondos radiactivos. En la literatura se han propuesto varias:

- La modulación diaria de la señal de WIMPs es ocasionada por el eclipse que produce la Tierra, en su rotación, al interponerse entre el detector y el viento de WIMPs. El flujo que llega al detector resulta atenuado con una periodicidad diaria y por lo tanto, los ritmos de detección deberían mostrar la correspondiente modulación. Se trata de un efecto muy pequeño para las secciones eficaces de los WIMPs viables [32].
- Los ritmos de interacción correspondientes a un determinado modelo de WIMP dependen del blanco utilizado y, por tanto, el uso de diferentes materiales en el mismo montaje experimental puede producir una identificación positiva [33], aunque las diferencias en los fondos intrínsecos de cada material pueden complicar el análisis. En particular, este análisis será muy útil para comprender el fondo de neutrones del experimento ya que las secciones eficaces de neutrones y WIMPs escalan de forma diferente con el núcleo blanco [34].
- La modulación anual en los ritmos de interacción de los WIMPs se basa en la variación de la velocidad relativa Tierra-halo (con periodicidad anual) debido al movimiento de traslación de la Tierra en torno al Sol. El efecto es pequeño, del orden del 7% (ver figura 11). Esta técnica fue propuesta por primera vez en los ochenta [35] y las primeras búsquedas de este efecto se realizaron en paralelo en el LSC y en Gran Sasso. El único experimento de búsqueda directa con una señal positiva hasta la fecha (DAMA-LIBRA [30], ver sección 6) está basado en esta técnica.

- Otra señal distintiva con origen galáctico que puede producir buenos resultados en el futuro es la direccionalidad del retroceso nuclear. La distribución de velocidades de los WIMPs en el sistema de referencia laboratorio no es isótropa, sino que tiene una dirección preferida, la correspondiente al movimiento del detector a través del halo, posibilitando la distinción entre la señal y los fondos si se dispone de un detector capaz de medir las direcciones de los retrocesos nucleares para energías  $< 100$  keV (ver siguiente sección).

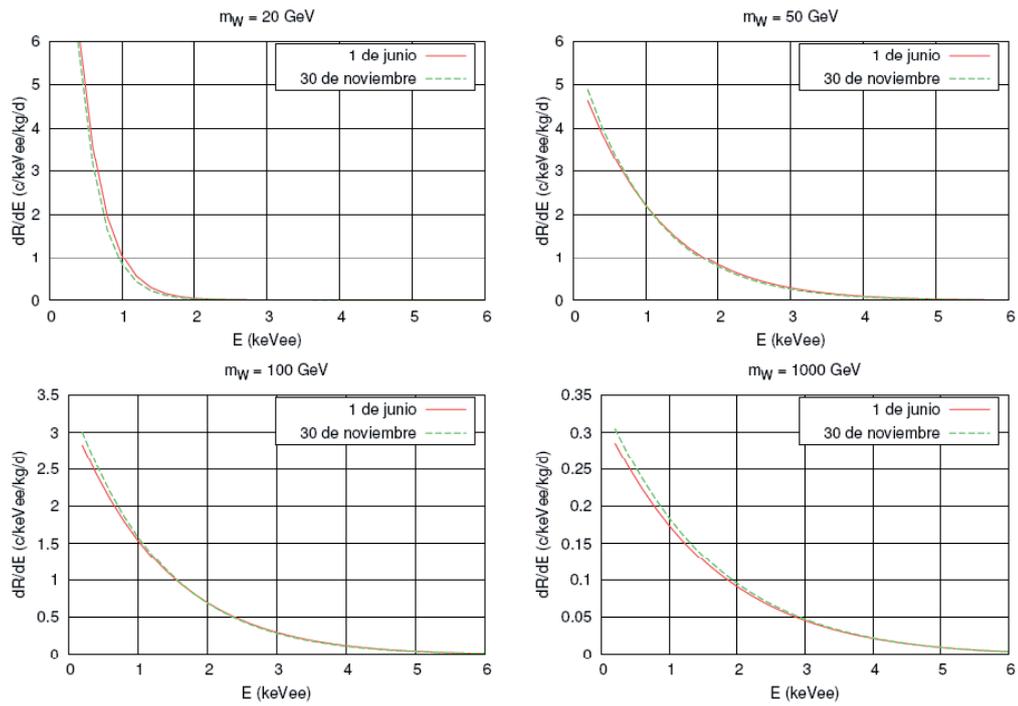


Figura 11: Ritmos de interacción de WIMPs de diferentes masas en un detector de NaI. Se puede observar la diferencia entre los ritmos esperados en junio y diciembre, a causa de la variación de la velocidad relativa WIMP-detector. Crédito: M. Martínez, Tesis Doctoral [36]. (En color en la versión digital)

## 6 Estado actual de la detección directa de WIMPs en el contexto internacional

Los primeros esfuerzos experimentales orientados a la detección directa de la materia oscura se remontan a la década de los ochenta, utilizando la tecnología de bajo fondo que había sido desarrollada para experimentos de búsqueda de la desintegración doble beta sin neutrinos en  $^{76}\text{Ge}$ . Con detectores semiconductores de Germanio, en 1987, se excluyeron como candidatos a la materia oscura los neutrinos pesados de Dirac en uno de los primeros experimentos dedicados [37]. En la década de 1990 comenzaron a utilizarse los detectores centelleadores de NaI con el objetivo de buscar el efecto de modulación anual, gracias a la disponibilidad de detectores de gran masa. A finales de los 90 se incorporaron los detectores criogénicos a la detección directa de la materia oscura, para aprovechar su capacidad de discriminación del tipo de partícula para rechazar los fondos de origen  $\beta/\gamma$  y mejorar las sensibilidades alcanzadas. En esta primera década del siglo XXI han comenzado a utilizarse detectores basados en elementos nobles líquidos (Xe y Ar, principalmente) que conjugan la capacidad de discriminación y la gran masa de detección. Mirando hacia el futuro ofrecen grandes expectativas los detectores gaseosos (tipo TPC) con sensibilidad a la dirección del retroceso nuclear.

A continuación se hará una breve revisión de algunos de los experimentos más relevantes, agrupados según la tecnología que utilizan. En la figura 12 se han representado, con la única finalidad de permitir una mera comparación de sensibilidades, algunos de los experimentos más destacados de cada tipo. Hay que enfatizar que esta comparación es *dependiente de los modelos considerados para el WIMP y el halo* y que por lo tanto debe ser interpretada con precaución.

### 6.1 Detectores de ionización

El germanio natural fue el primer material utilizado en los experimentos de búsqueda de la materia oscura del Universo a causa de las altas prestaciones alcanzadas por los detectores semiconductores fabricados con este material. Originalmente, la motivación para la mejora continuada de la tecnología de los detectores semiconductores de germanio hiperpuro hay que buscarla en su aplicación a la investigación de la desintegración doble beta del  $^{76}\text{Ge}$ . El progreso en las técnicas de fabricación permitió el crecimiento de cristales de gran tamaño y el desarrollo de técnicas específicas de bajo fondo aplicadas al proceso de crecimiento y a la fabricación por electroformación de los criostatos de cobre, alcanzando excelentes cotas de radiopureza.

Numerosos experimentos destinados a la búsqueda de la desintegración doble beta fueron reconvertidos a la búsqueda de materia oscura, como IGEX-DM [38, 39] (ver sección 8.1.2) y HDMS [40], otros fueron específicamente diseñados para ella, como

COSME [41, 42] (ver sección 8.1.1), otros experimentos hicieron uso de semiconductores de Silicio [43]. Durante mucho tiempo estos detectores fueron los más sensibles en la detección directa de la materia oscura<sup>11</sup>.

En la actualidad están en preparación experimentos muy masivos con detectores de Germanio cuyo objetivo principal es el estudio de la desintegración doble beta sin neutrinos del  $^{76}\text{Ge}$ , pero que también podrán colaborar en la búsqueda de la materia oscura fría, especialmente en el análisis de la modulación anual. A nivel europeo, en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (Italia), destaca el proyecto GERDA [44], que contará con 100 kg de HPGe sumergido en un líquido criogénico. En el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) se proyectó el experimento GEDEON [45], con 40 kg de HPGe. En Estados Unidos el proyecto más importante en este campo es MAJORANA [46] que utilizará detectores muy segmentados de Ge hasta una masa total de 500 kg.

## 6.2 Detectores de centelleo

El NaI(Tl) es un material especialmente interesante para la búsqueda de materia oscura que comenzó en los años 90 a utilizarse en experimentos subterráneos dedicados, entre ellos destacan DM32 [47, 48] en el LSC, la colaboración BPRS [49] en Gran Sasso (parte de la cual integraría posteriormente la colaboración DAMA) o ELEGANTS-V [50] en Otto (Japón)<sup>12</sup>. La colaboración UKDMC también instaló un experimento de NaI(Tl) en Boulby, Reino Unido: NAIAD. Después de algunos problemas de contaminación superficial en sus cristales, los últimos resultados presentados corresponden a una exposición de 44,9 kg·año, obteniendo buenas exclusiones, especialmente para interacción SD [52].

El resultado más interesante conseguido con este tipo de detectores, sin lugar a dudas, es el obtenido por los experimentos DAMA/LIBRA en Gran Sasso, siendo hasta la fecha el único resultado positivo en la detección directa de la materia oscura. Tras 7 ciclos anuales de medidas, en julio de 2002 finalizó la toma de datos de DAMA/NaI con una evidencia de modulación anual en los datos correspondientes a la región de 2 a 6 keVee, que según el modelo de halo y WIMP considerado favorece una determinada región en el espacio de parámetros  $(m, \sigma)$  [30]. En marzo de 2003 entró en operación el nuevo montaje DAMA/LIBRA, con 25 cristales de NaI(Tl) de 9,7 kg cada uno y un reacondicionamiento del montaje experimental de DAMA/NaI. En 2008 DAMA/LIBRA ha confirmado la modulación con un alto nivel de confianza y una exposición de 0,53 toneladas·año [31] (ver figura 13). Los resultados de este experimento han causado una gran controversia en el campo, al mostrarse una aparente inconsistencia con los resultados de otros experimentos que para ciertos modelos de WIMPs presentan una mayor sensibilidad. Sin embargo,

---

<sup>11</sup>Hasta la aparición de los detectores criogénicos.

<sup>12</sup>En la actualidad están trabajando en el desarrollo de centelleadores de NaI(Tl) segmentados [51].

las incertidumbres en muchos de los parámetros que intervienen en el cálculo de la señal esperada para los WIMPs hacen que la comparación de los resultados obtenidos con blancos distintos sea *dependiente del modelo*. Para un reciente análisis de la cuestión se puede consultar la referencia [53].

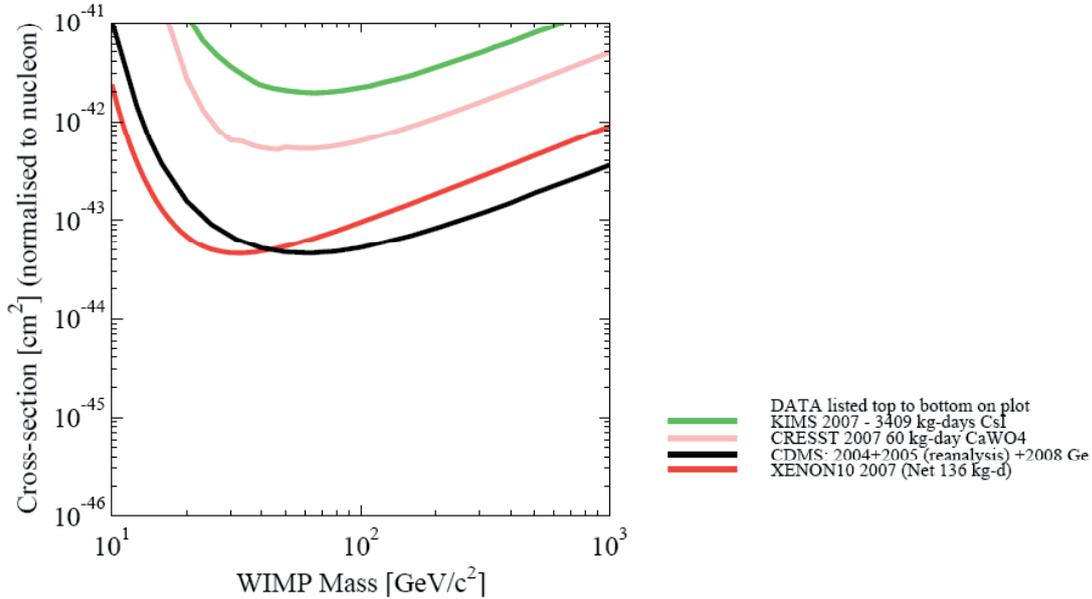


Figura 12: Comparación de las sensibilidades de diferentes experimentos dedicados a la detección directa de la materia oscura en un diagrama de exclusión  $(m, \sigma)$  para candidatos con interacciones independientes del espín. Crédito: R. Gaitskell, V. Mandic and J. Filippini, (<http://dmtools.berkeley.edu/limitplots/>). (En color en la versión digital)

Es importante destacar la reciente aplicación de centelleadores de CsI(Tl) a la detección directa de la materia oscura por parte de la colaboración KIMS [54]. Aunque este material no se usa normalmente en experimentos de bajo fondo debido a su elevada contaminación intrínseca en los isótopos  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{87}\text{Rb}$ , se están creciendo cristales con niveles adecuados de radiopureza. Además, la posibilidad de aplicar técnicas de discriminación de sucesos por la forma de los pulsos y de analizar la modulación anual, gracias a la alta masa disponible, ha aumentado enormemente la sensibilidad del experimento y lo ha colocado entre los más y relevantes del contexto internacional actual.

### 6.3 Detectores criogénicos

Los detectores criogénicos aplicados a la detección de radiación y partículas han alcanzado un alto nivel de desarrollo. Se utilizan en experimentos que requieren muy alta resolución

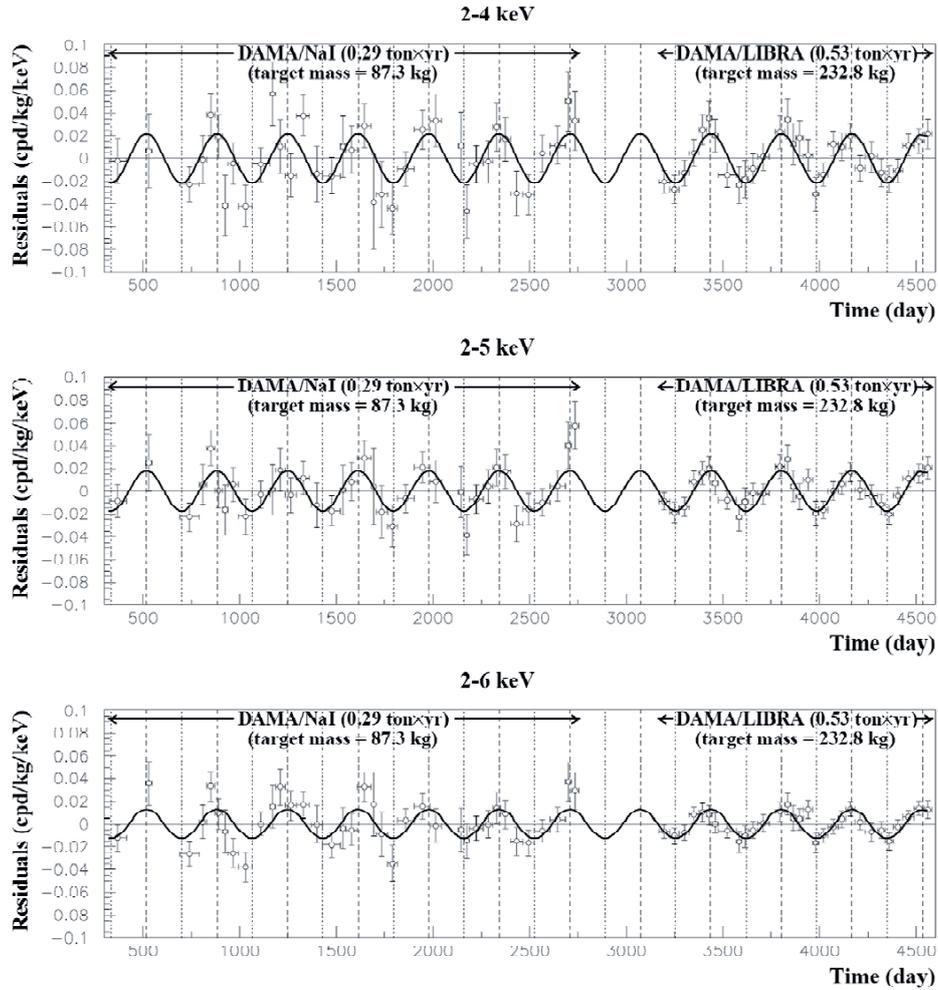


Figura 13: Modulación observada por los experimentos DAMA/LIBRA en las ventanas de baja energía, compatible con lo esperado para la señal debida a WIMPs del halo galáctico [31].

(análisis de rayos X, medidas de masas de proteínas, espectroscopia alfa, etc.), en el estudio de la desintegración doble beta de los núcleos o en búsquedas de materia oscura, por ejemplo; en muchas otras aplicaciones se está investigando su adaptación [55]. En particular, y gracias a la posibilidad de discriminación del fondo radiactivo que ofrecen, los detectores criogénicos (o bolométricos) han acaparado hasta muy recientemente los mejores límites en la búsqueda directa de materia oscura.

Un detector bolométrico consiste fundamentalmente en un absorbente, un sensor térmico y una fuga térmica a un baño a temperatura constante y se basan en la medida del incremento en la temperatura de un cristal tras un cierto depósito de energía causado por la interacción de una partícula. Un sensor adecuado medirá el incremento de temperatura,  $\Delta T = \Delta E/C_v$ , que produce en el cristal un depósito de energía  $\Delta E$ .

Siendo el incremento de temperatura producido inversamente proporcional a la capacidad calorífica del sistema,  $C_v$ , es preciso utilizar materiales dieléctricos y diamagnéticos o superconductores muy por debajo de su temperatura crítica <sup>13</sup>. Con respecto a los sensores capaces de medir tan pequeños cambios de temperatura, hoy por hoy, hay planteadas varias posibilidades: los termistores NTD de Ge o Si (que aprovechan la dependencia con la temperatura de la resistencia de materiales semiconductores fuertemente dopados por activación con neutrones, ya cercanos a la transición a conductor), los termómetros superconductores al filo de la transición de fase (que operan en medio de la transición de fase superconductor-normal aprovechando que la resistencia cae bruscamente a cero en torno a la temperatura crítica) y los sensores magnéticos (que constando de un material paramagnético en un campo magnético aprovechan la variación en magnetización que produce un cierto incremento de temperatura). Los tres proporcionan sensibilidades adecuadas para la búsqueda de materia oscura, que al requerir masas de detección grandes precisa la operación de los detectores a muy bajas temperaturas para minimizar la contribución de la capacidad calorífica. Usualmente se trabaja en el rango de 10-20 mK, lo que implica la operación del detector en el interior de un refrigerador de dilución, con el detector térmicamente acoplado a su cámara de mezcla. Por lo tanto se necesita disponer de una infraestructura de bajas temperaturas adecuada en el entorno del laboratorio (disponibilidad de líquidos criogénicos, por ejemplo). Asimismo, en el caso de experimentos que requieran ultra-bajo fondo radiactivo (por ejemplo búsqueda de sucesos raros como materia oscura o desintegración doble beta) hay que imponer condicionantes especiales relativos a la elección de los materiales utilizados en el diseño de todo el equipo empleado.

Los bolómetros ofrecen importantes ventajas frente a detectores convencionales. Los portadores de la energía son fonones (con energías del orden de  $\mu\text{eV}$  a temperaturas de unos 10 mK) que permiten alcanzar un umbral en energía muy bajo y muy buena resolución intrínseca gracias al alto número de portadores generados, al menos teóricamente<sup>14</sup>. Un amplio abanico de elementos que interesen como fuente o como blanco puede ser adecuadamente investigado en una configuración óptima fuente = detector. El único requisito será encontrar una matriz dieléctrica adecuada para dicho elemento con buenas propiedades mecánicas y térmicas. La mayor parte de la energía depositada en cualquier material se transforma en calor, lo que hace que estos detectores sean muy sensibles y

---

<sup>13</sup>En ellos, al ser  $C_v \propto T^3$ , a muy bajas temperaturas se garantizan sensibilidades a depósitos energéticos en el rango del keV, que corresponden típicamente a cambios de temperatura del orden de algunos  $\mu\text{K}$

<sup>14</sup>En la práctica la posible existencia de estados metaestables, excitados por ionización por ejemplo, puede limitar considerablemente estas prestaciones ideales. Aún así en los últimos años se han obtenido resultados espectaculares con microcalorímetros, con valores cercanos a los límites termodinámicos para la resolución en energía, y próximos también a la anchura natural de las líneas observadas [56].

puedan alcanzar bajos umbrales energéticos. En particular, son mucho más eficientes que los detectores convencionales en la detección de retrocesos nucleares, ya que al tratarse de radiación no ionizante la mayor parte de la energía se convierte directamente en calor y, por lo tanto, es detectable<sup>15</sup>. Además, en ocasiones, permiten medir simultáneamente el incremento de temperatura en el cristal y otra magnitud proporcional a la energía depositada que haga uso de otra forma de excitación (como la ionización producida o la luz emitida); en este modo de operación *híbrido* se puede discriminar el tipo de partícula que ha depositado la energía comparando las dos señales registradas<sup>16</sup>. La detección híbrida ha permitido reducir los fondos radiactivos en varios órdenes de magnitud, discriminando el origen de cada depósito energético. Por todas estas ventajas los bolómetros se han incorporado rápidamente a la investigación en Física Nuclear y de Partículas, tanto en la búsqueda de materia oscura [58, 59, 60], como de la desintegración doble beta [61] y en otras aplicaciones como medidas de precisión, como por ejemplo, de la vida media y masa del neutrino en espectros beta [62].

Los bolómetros también tienen limitaciones en su aplicación: no resulta sencillo fabricar cristales de grandes dimensiones con buenas propiedades térmicas, resulta complicado garantizar la estabilidad en largos periodos de medida de un sistema criogénico completo (rellenado con líquidos criogénicos, vibraciones, etc.), se complica el diseño de un blindaje adecuado para un experimento de ultra-bajo fondo porque los refrigeradores tienen numerosos componentes imprescindibles y no radiopuros que deben ser adecuadamente apantallados y/o alejados de la parte sensible del detector, entre otras. Pese a estas limitaciones, hoy en día los bolómetros están empezando a alcanzar fondos comparables a los de los mejores detectores convencionales y se está invirtiendo mucho esfuerzo en su continuo desarrollo y mejora.

El experimento CDMS-II [58] en Soudan, U.S.A., mide simultáneamente ionización y calor con bolómetros de Ge y Si. Los datos acumulados por CDMS proporcionan una cota para WIMPs con interacciones independientes del espín de  $4,6 \times 10^{-44} \text{cm}^2$  para masas de 60 GeV y dan la mejor sensibilidad por encima de 42 GeV. La colaboración CDMS planea trasladarse al Laboratorio Subterráneo de Sudbury, Canadá, e instalar allí SuperCDMS [63], con más masa de detección y mejores blindajes. Otro experimento basado en la adquisición simultánea de calor e ionización es EDELWEISS, en Modane, Francia [59].

Otra posibilidad para discriminar el fondo es la medida simultánea de luz y calor, ha-

---

<sup>15</sup>El factor de eficiencia relativa entre retrocesos nucleares como los producidos por WIMPs y sucesos con origen  $\beta/\gamma$ , a diferencia de lo que sucede para los detectores convencionales, resulta compatible con  $Q = 1$  en detectores bolométricos [57].

<sup>16</sup>Aprovechando que según el poder de frenado de la partícula incidente serán muy diferentes las fracciones de energía invertidas en ionización o centelleo, mientras que la señal calorimétrica (aparentemente) es la misma.

ciendo uso de bolómetros centelleadores como se lleva a cabo en el marco del experimento ROSEBUD en el LSC [64] y se detallará en la sección 8. Como ya se ha comentado, este experimento utiliza varios materiales blanco distintos en un mismo montaje experimental y está llevando a cabo una interesante labor de I+D con bolómetros centelleadores de LiF, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrF<sub>2</sub> y BGO, por ejemplo. Esta misma tecnología es la que utiliza el experimento CRESST [60], en Gran Sasso, que ha logrado unos límites muy competitivos tras dos meses de medidas con un cristal de CaWO<sub>4</sub> de 300 g y con 12 keVee de umbral energético. Recientemente se ha planteado la posibilidad de realizar un gran proyecto europeo que combine la tecnología de EDELWEISS y la de CRESST: EURECA (EUROPEAN Calorimeter Array) [65].

Dentro de los experimentos criogénicos también hay que mencionar el proyecto CUORE, en Gran Sasso, [61] que aún siendo su objetivo la búsqueda de desintegración doble beta, también puede contribuir a la detección directa de la materia oscura si consigue un buen umbral en energía. Actualmente se encuentra en fase de prototipo (CUORICINO), pero cuando complete su montaje contará con 1000 bolómetros de TeO<sub>2</sub> de 760 g cada uno.

#### 6.4 Elementos nobles líquidos

El Xe líquido (LXe) es un material atractivo como blanco para la detección directa de WIMPs: es un centelleador intrínseco, de elevado número másico (favorable para candidatos con interacciones independientes del espín) y que no cuenta con isótopos radioactivos de larga vida media (se pueden conseguir blancos de alta radiopureza). Hay varios experimentos que, en la actualidad, hacen uso del LXe como blanco. ZEPLIN, en Boulby, utiliza 3,2 kg de LXe, tiene su umbral en 2 keVee y REF para retrocesos nucleares de 0,20. Tras una exposición de 293 kg·día y haciendo uso de una discriminación estadística de sucesos por la forma de los pulsos, ZEPLIN ha alcanzado buena sensibilidad a candidatos a la materia oscura, aunque su recolección de luz es poco eficiente [66]. La colaboración DAMA cuenta con un detector de LXe en Gran Sasso [67] y la colaboración japonesa XMASS ha instalado 100 kg de LXe en Kamioka para la detección de neutrinos solares y planea ampliar su masa hasta 1 tonelada pudiendo colaborar en la búsqueda de materia oscura. Pero en la actualidad, la línea dominante en el campo se basa en la combinación de la fase líquida con una fase gaseosa (LXe/GXe), que permite la detección simultánea de centelleo e ionización y, por tanto, el rechazo del fondo  $\beta/\gamma$ . La segunda fase de ZEPLIN (ZEPLIN-II) se basa en esta técnica y ya está proyectada la tercera fase ZEPLIN-III [68]. La colaboración XENON [69] en Gran Sasso, que también utiliza LXe/GXe, ha presentado recientemente los resultados de un prototipo de 10 kg (XENON10) que, tiene previsto ampliar a 100 kg y 1 tonelada (XENON100 y XENON1T). XENON10 ha utilizado 5,4 kg de Xe y 58,6 días de datos acumulados para obtener una cota para WIMPs

con interacciones independientes del espín de  $4,5 \times 10^{-44} \text{cm}^2$  para masas de 30 GeV, siendo el experimento más sensible para masas inferiores a 42 GeV.

Este modo de operación es común a experimentos con Argón líquido como WARP [70] (100 l de LAr en el laboratorio de Gran Sasso) o ArDM [71] (que pudiera ser instalado en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc), cuyo objetivo es disponer de una masa de detección de 1 tonelada.

### 6.5 Detectores gaseosos (TPC)

La posibilidad de identificar la dirección de los retrocesos nucleares y, por lo tanto, de alguna manera reconstruir la dirección de movimiento de la partícula incidente, permite utilizar esta técnica de detección para obtener una señal característica atribuible a los WIMPs del halo que permita concluir su presencia en los datos al no resultar fácilmente enmascarada por efectos debidos al fondo radiactivo. Estos detectores permiten además una discriminación uno a uno de sucesos de origen  $\beta/\gamma$  frente a retrocesos nucleares gracias a la diferencia en las trazas que cada uno de ellos genera. La colaboración DRIFT está desarrollando un detector de estas características, cuyo primer prototipo (DRIFT-I) fue instalado en Boulby, con una cámara de  $1 \text{ m}^3$  llena de gas  $\text{CS}_2$  a baja presión [72]. La segunda fase DRIFT-II está actualmente en operación [73].

En el caso de identificar la presencia de WIMPs en sus datos, esta nueva generación de detectores podrá proporcionar además información adicional sobre la distribución de velocidades de los WIMPs en el halo oscuro, por ejemplo, ya que la distribución angular de sucesos en el detector puede diferir sensiblemente según el modelo de halo considerado [74].

### 6.6 Otras técnicas

Otras técnicas están siendo aplicadas en la detección directa de la materia oscura en experimentos de menores dimensiones. Todas ellas tienen interés, complementan los esfuerzos antes mencionados y pueden dar resultados importantes para ciertos candidatos a WIMPs, como, por ejemplo, para aquellos que interactúan mediante acoplo al espín del núcleo. Así, por ejemplo, el experimento COUPP, con una exposición acumulada de  $52 \text{ kg}\cdot\text{día}$  (el detector consiste en  $1,5 \text{ kg}$  de  $\text{CF}_3\text{I}$ ) ha sido capaz de alcanzar sensibilidades competitivas con las de DAMA-LIBRA para WIMPs con interacciones dependientes del espín gracias a su elevado contenido en Flúor (el  $^{19}\text{F}$  es un blanco con una elevada figura de mérito para este tipo de interacciones). COUPP utiliza un líquido sobrecalentado en el que la interacción de un WIMP es capaz de producir la nucleación de una única burbuja de gas. El experimento puede discriminar el tipo de partícula responsable de la interacción ya que los fotones o electrones no llegan a producir la nucleación al no depositar una

densidad de energía suficientemente grande y los neutrones producirían varias burbujas debido a su sección eficaz de interacción mucho mayor [75].

En esta misma línea se pueden mencionar los detectores de gotas supercalentadas (SDD: Superheated Droplet Detectors) como SIMPLE [76] y PICASSO [77]. Otro experimento paralelo, ORPHEUS, utiliza gránulos superconductores sobrecalentados que transitan al estado normal cuando un WIMP interacciona en su interior [78].

Otro tipo de técnica novedosa, especialmente interesante también para WIMPs con interacciones dependientes del espín, se basa en utilizar como blanco  $^3\text{He}$  superfluido a una temperatura de  $100\mu\text{K}$  [79]. La energía depositada en una interacción produce excitaciones elementales (cuasipartículas) que modifican la anchura del pico de resonancia de un hilo superconductor inmerso en el seno del superfluido. ULTIMA es uno de los experimentos aprobados por el comité científico del Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

## 7 El Laboratorio Subterráneo de Canfranc

El Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) es una instalación única en España, reconocida recientemente como instalación singular, que permite la realización de experimentos de búsqueda de fenómenos poco probables gracias al entorno de ultra-bajo fondo radiactivo que ofrece. Desde finales de los años ochenta el Laboratorio de Canfranc ha desarrollado una amplia actividad en el campo de la Física Subterránea y los experimentos realizados en él han competido con los llevados a cabo en otras instalaciones similares a nivel internacional entre las que hay que destacar, a nivel europeo, el Laboratorio Nacional del Gran Sasso en Italia, el laboratorio de Boulby en el Reino Unido y el Laboratorio de Modane-Fréjus en Francia y, fuera de Europa, los laboratorios de Homestake y Soudan en los Estados Unidos, el de Kamioka en Japón y el de Sudbury en Canadá.

Hasta fechas recientes, la gestión y mantenimiento de esta instalación subterránea ha sido asumida por el grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la Universidad de Zaragoza, hecho que por supuesto ha implicado un esfuerzo añadido al puramente científico pero que, por otro lado, ha dado un especial protagonismo al papel desempeñado por el grupo de la UZ en el marco de las colaboraciones internacionales en las que ha participado para la realización de experimentos en la vanguardia de la Física Subterránea.

### 7.1 Antecedentes

En 1985 el grupo de Física Nuclear y Astropartículas (entonces llamado grupo de Física Nuclear y Altas Energías) de la Universidad de Zaragoza examinó diferentes emplazamientos subterráneos que permitieran la realización de experimentos de búsqueda de sucesos poco probables. Los dos mejores candidatos considerados fueron el túnel ferroviario del Somport, en Canfranc (Huesca), que cruza la frontera España-Francia y que desde 1970

está en desuso, y una mina de sal en Remolinos (Zaragoza), todavía en operación. Finalmente fue elegido el túnel del Somport por sus mejores condiciones ambientales (ausencia de polvo en suspensión y buena ventilación natural). A partir de este momento (1986) comenzaron las tareas de acondicionamiento ya que el emplazamiento carecía de cualquier tipo de infraestructura que permitiera su utilización como laboratorio. Se acondicionaron dos salas de apenas 10 m<sup>2</sup> cada una de ellas a 780 m de la entrada del túnel por el lado español, cubiertas por un espesor de roca equivalente a 675 m de agua (m.w.e.), denominado Laboratorio 1 en la figura 14. Posteriormente se instaló un módulo prefabricado reforzado de unos 15 m<sup>2</sup> sobre las vías al lado de las dos salas.

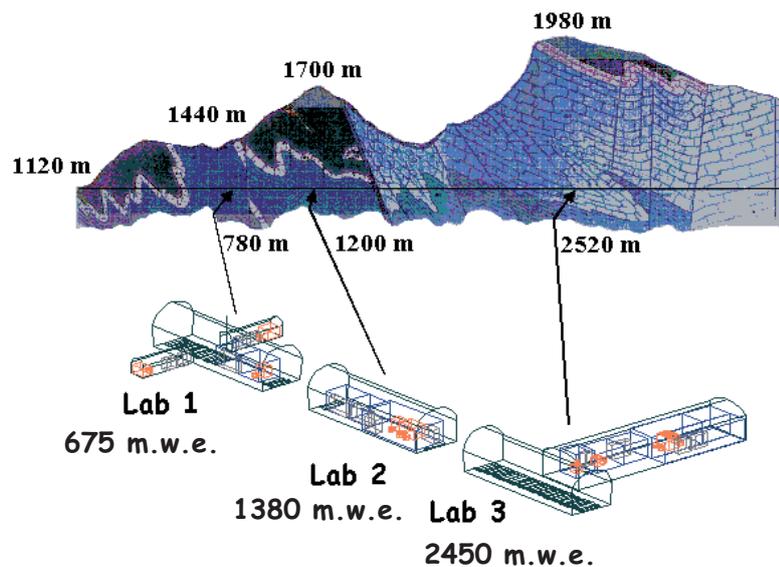


Figura 14: Esquema de localización de las distintas salas experimentales habilitadas en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc indicando las correspondientes distancias medidas desde la boca española del túnel (a la izquierda en la representación) y el recubrimiento medio de roca (en metros equivalentes de agua, m.w.e.). El Laboratorio 3 sigue en uso en la actualidad y se aprovecha del máximo recubrimiento de roca que permite el perfil orográfico. (En color en la versión digital)

En 1988, como resultado de una colaboración con la Universidad de Carolina del Sur (USC) y el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), llegó a Canfranc el primer detector de ultra-bajo fondo: un detector de germanio hiperpuro. Fue dedicado inicialmente a la medida de materiales y en 1989 fue utilizado en el primer experimento del Laboratorio Subterráneo de Canfranc: el detector de germanio rodeado por una corona de 14 centelleadores de yoduro de sodio se dedicó a la búsqueda de la desintegración doble beta

del  $^{76}\text{Ge}$ . Posteriormente se amplió la colaboración USC/PNNL/UZ a la realización de otros experimentos, orientados en dos direcciones fundamentales: estudio de los procesos doble beta en detectores de germanio y detección directa de la materia oscura galáctica.

En 1991 se instaló sobre las vías del tren un nuevo módulo prefabricado de 27 m<sup>2</sup>, que se unió al que ya estaba operativo y todo el conjunto fue desplazado a una nueva localización a 1200 m de la boca española del túnel, bajo 1380 m.w.e. (tratando de mejorar el apantallamiento de los rayos cósmicos y por lo tanto las condiciones de bajo fondo). Una vez acondicionado constituyó el denominado Laboratorio 2 (ver figura 14).

En 1994 se planteó la posibilidad de ampliar las instalaciones aprovechando la realización de las obras de perforación del túnel de carretera del Somport, en el marco del proyecto de autovía Somport-Sagunto, cuyo trazado es casi paralelo al del antiguo túnel de ferrocarril. La Dirección General de Carreteras de la Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes del Ministerio de Transporte ejecutó a su cargo las obras de excavación y adecuación de un nuevo laboratorio de 118 m<sup>2</sup> a 2520 m de la entrada española y bajo 2450 m.w.e. (el máximo cubrimiento de roca que la orografía del terreno permite a lo largo del túnel, ver figura 14). El Laboratorio 3 estuvo operativo en 1995 (ver figura 15 para el detalle de su distribución interior). Este nuevo laboratorio supuso en su día un salto cualitativo tanto en disponibilidad de espacios como en cubrimiento de roca y, por lo tanto, en apantallamiento de los rayos cósmicos. En la figura 16 se puede ver la dependencia del flujo de muones cósmicos con la profundidad, en m.w.e.; en ella se han marcado las posiciones de los más importantes laboratorios subterráneos en el contexto internacional, entre ellos el Laboratorio 3 del LSC. Los módulos prefabricados fueron dedicados a otros usos en el exterior.

Entre los experimentos que han sido llevados a cabo en el Laboratorio 3 podemos destacar: IGEX, IGEX-DM, COSME, KRIPTON, AMBAR, DM32, ROSEBUD y las fases iniciales de otros que están en preparación como ANAIS o NEXT. En la sección 8 resumiremos los objetivos y principales resultados de aquellos experimentos dedicados a la detección directa de la materia oscura galáctica en las instalaciones del LSC.

## 7.2 *Perspectivas*

El Laboratorio Subterráneo de Canfranc ha comenzado recientemente una nueva etapa y ha dado un salto realmente importante que le va a permitir superar la que ha sido su principal limitación frente a otras instalaciones subterráneas: sus reducidas dimensiones. Con motivo de la excavación de galerías de evacuación del túnel de carretera del Somport (uniendo el túnel de carretera con el túnel de ferrocarril en desuso) que han hecho del mismo uno de los túneles más seguros de Europa, se planteó un ambicioso proyecto de ampliación de las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Las obras se

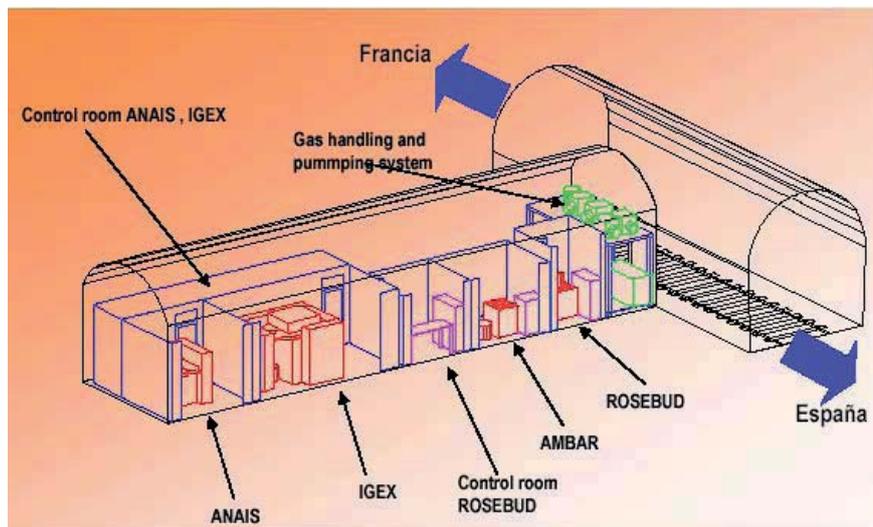


Figura 15: Localización de los diversos experimentos en el Laboratorio 3 del Laboratorio Subterráneo de Canfranc. En total dispone de unos 100 m<sup>2</sup> útiles y sigue alojando en la actualidad los experimentos de detección directa de materia oscura, ANAIS y ROSEBUD. (En color en la versión digital)

llevaron a cabo a lo largo de 2004 y se extendieron hasta finales de 2005. La financiación de la obra ha correspondido al Gobierno de Aragón y al Ministerio de Educación y Ciencia (ahora Ciencia e Innovación) haciendo uso de fondos FEDER. El Laboratorio fue inaugurado el 27 de marzo de 2006 por Dña. María José San Segundo (Ministra de Educación y Ciencia), D. Marcelino Iglesias (Presidente de la Comunidad Autónoma de Aragón) y D. Felipe Pétriz (Rector de la Universidad de Zaragoza). Sin embargo, importantes problemas estructurales detectados en marzo de 2007 han paralizado la puesta en marcha del laboratorio y, en el momento de redactar este trabajo, todavía no se han acometido las reformas requeridas, por lo que el grupo de la UZ sigue desarrollando sus actividades en las antiguas instalaciones del LSC (Laboratorio 3).

La puesta en marcha de estas nuevas instalaciones va a suponer un lógico cambio cuantitativo en espacio disponible, contará con unos 600 m<sup>2</sup> útiles en la sala experimental principal<sup>17</sup> y del orden de 1000 m<sup>2</sup> distribuidos en zonas especialmente diseñadas para talleres, sala limpia, laboratorio de ultra-bajo fondo radiactivo y almacén, por ejemplo (ver figura 17). Además, la puesta en marcha de las nuevas instalaciones conlleva un cambio sustancial en la gestión del laboratorio. Ya está nombrado un comité científico internacional que decidirá, en base a criterios científicos, los experimentos que podrán ser

<sup>17</sup>Esta sala está orientada hacia el CERN para posibilitar la operación de experimentos de detección de haces de neutrinos CERN-Canfranc.

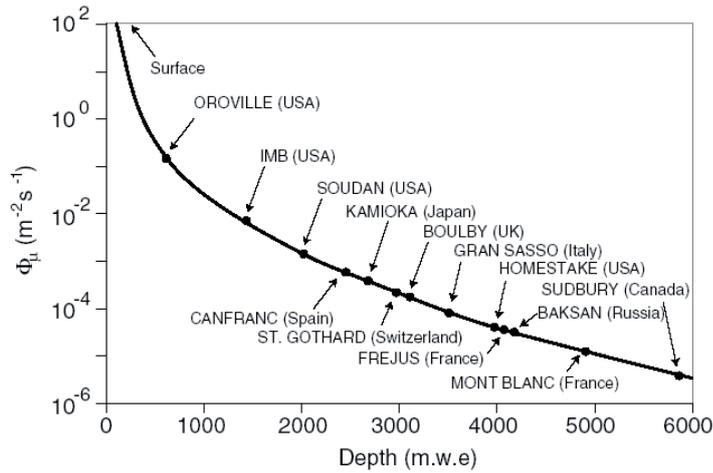


Figura 16: Dependencia del flujo de muones con la profundidad (expresada en metros equivalentes de agua). Se indica la posición del Laboratorio Subterráneo de Canfranc (Laboratorio 3) junto a las más importantes instalaciones subterráneas a nivel internacional.

instalados en él. En lo que respecta al grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la UZ, las tareas de mantenimiento del laboratorio ya no recaerán en sus miembros, sino en el personal propio del LSC, al mismo tiempo que no se garantiza espacio para sus propuestas en las nuevas instalaciones<sup>18</sup>.

## 8 Esfuerzos experimentales desarrollados en Canfranc para la detección directa de la materia oscura

En la figura 18 se muestran de forma esquemática las distintas técnicas de detección utilizadas en el LSC y los distintos materiales utilizados como blanco en la búsqueda de la materia oscura. A continuación se expondrán brevemente las principales líneas de trabajo seguidas desde finales de los años ochenta y los resultados más relevantes obtenidos.

### 8.1 Detección de materia oscura con detectores semiconductores de germanio

Como ya se ha comentado en la sección 6 el germanio natural fue el primer material utilizado en los experimentos de búsqueda de la materia oscura y a finales de los ochenta la tecnología de fabricación de detectores HPGe (High Purity Germanium) garantizaba excelentes cotas de radiopureza. En este contexto se planteó la colaboración entre la Uni-

<sup>18</sup>Excepto para aquellos experimentos en los que ya estaba comprometido el grupo en el momento de firmarse el consorcio gestor del LSC.

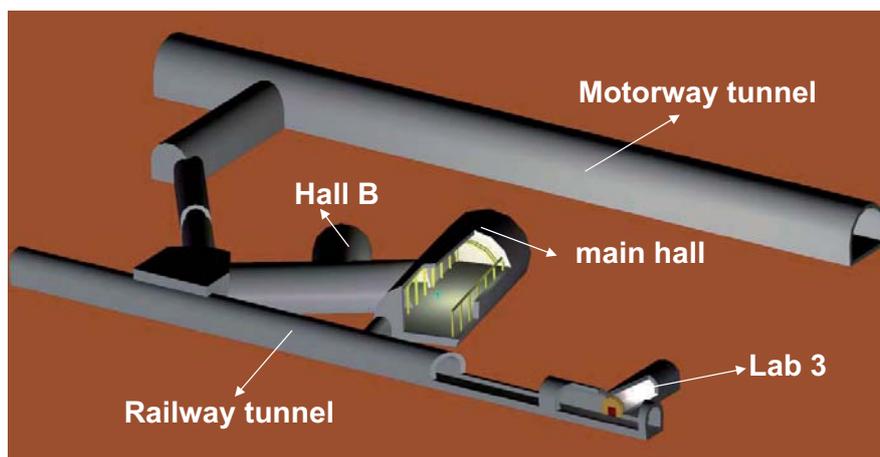


Figura 17: Croquis de las nuevas instalaciones del LSC junto al todavía en uso Laboratorio 3. (En color en la versión digital)

versidad de Zaragoza, el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) y la Universidad de Carolina del Sur (USC). En el PNNL se disponía en ese momento de la tecnología más avanzada para la fabricación de criostatos de cobre y detectores de germanio hiperpuro y, en el marco de la referida colaboración, se desarrolló un detector con muy bajo umbral en energía, específicamente diseñado para su utilización en la búsqueda de materia oscura. Además, los grupos de USC y PNNL ya tenían algunos de sus detectores de germanio en operación en el Laboratorio de Homestake (USA). La colaboración planteada debía aprovechar la disponibilidad de detectores similares en dos laboratorios diferentes (fondos diferentes, efectos sistemáticos diferentes, etc.). Esta colaboración se ha mantenido, y en ocasiones ampliado, en todos los experimentos que usan esta tecnología de detección en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc a lo largo de los años, y a los que se irá haciendo referencia a continuación.

### 8.1.1 EL EXPERIMENTO COSME

Fue el primer experimento dedicado a la búsqueda de materia oscura en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. El detector fue especialmente fabricado para este experimento y optimizado para la detección de depósitos de baja energía. Se trata de un detector de germanio natural con una masa activa de 234 g. Con un umbral de detección de 1,6 keV y 0,43 keV de resolución (FWHM) a 10,3 keV fue en su momento el detector de germanio dedicado a la detección de materia oscura con mejor umbral en energías. Se instaló en el Laboratorio 1 del Laboratorio Subterráneo de Canfranc (a 675 m.w.e.) con un blindaje de 10 cm de plomo antiguo, 20 cm de plomo de baja actividad, una funda

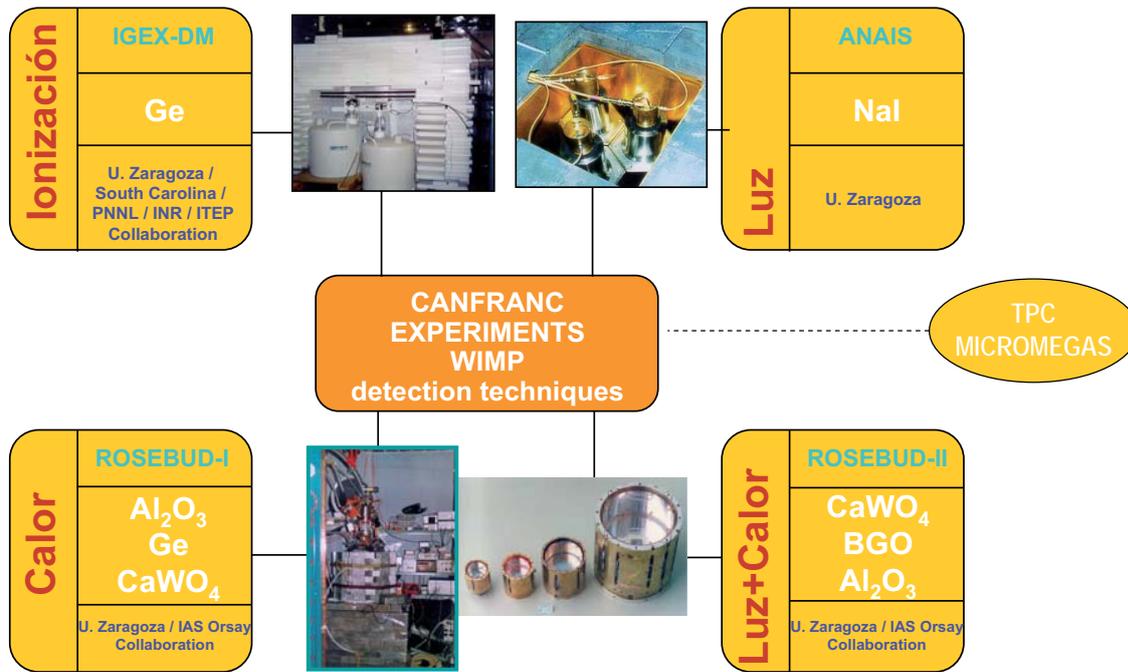


Figura 18: Resumen de las distintas técnicas de detección y materiales utilizados como blanco en la búsqueda de materia oscura en el LSC. (En color en la versión digital)

de PVC herméticamente cerrada con sobrepresión de N<sub>2</sub> gaseoso evaporado de un dewar para evitar la penetración del radón en el interior del blindaje, 1 mm de cadmio y 20 cm de parafina.

Tras una fase inicial destinada al estudio de la excitación cosmogénica de isótopos de corta vida media producida en el detector durante su fabricación (en superficie) y traslado de los E.E.U.U. a España (por avión), comenzó la toma de datos definitiva del experimento en junio de 1990 extendiéndose hasta junio de 1992. En total se contabilizaron 13404 horas efectivas de medida, que corresponden a una exposición de 130,7 kg·día. El fondo radiactivo conseguido fue de  $\approx 9$  sucesos  $\text{keV}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{día}^{-1}$  en la región entre 2 y 5 keV y de  $\approx 1$  suceso/keV/kg/día entre 15 y 20 keV. Del análisis de los datos de este experimento se extrajo importante información, no sólo para la exclusión de candidatos a la materia oscura (comparando la señal esperada con el límite superior al espectro de fondo obtenido)<sup>19</sup> que era el principal objetivo del experimento [41, 42], sino también para la estimación de las contribuciones de isótopos activados cosmogénicamente, para dar las mejores cotas en su día a la estabilidad del electrón [80] y para determinar la eficacia

<sup>19</sup> Así por ejemplo se pudieron excluir como candidatos a la materia oscura del Universo neutrinos de Dirac entre 9 GeV y 2 TeV.

del sistema de limpieza de radón empleado (y que posteriormente se aplicaría a todos los experimentos de similares características y objetivos).

Para identificar positivamente la presencia de la señal de materia oscura en los datos se requiere el análisis de señales distintivas (ver sección 5) como las modulaciones anual y diaria en los ritmos de detección. La modulación anual, debida a la variación de la velocidad relativa WIMP-detector a lo largo del periodo de revolución de la Tierra en torno al Sol, supone un efecto en la señal del orden del 5-10%. A causa de ello, se requieren experimentos de gran masa para ser sensibles a ella y el grupo se planteó utilizar otro tipo de detector que fuera más fácilmente escalable (ver sección 8.2). La modulación diaria es debida al eclipse del viento solar por la Tierra en grado variable como consecuencia de la rotación terrestre (los WIMPs pueden interactuar con los núcleos que encuentran al atravesar la Tierra, alterando su flujo y distribución de velocidades). La latitud de Canfranc no es óptima para estudiar este efecto y por eso se planteó un experimento similar a COSME en Argentina [81].

El detector COSME fue reinstalado en 1998, en mejores condiciones experimentales, en el Laboratorio 3 del LSC (bajo 2450 m.w.e. en lugar de los 675 m.w.e. del Laboratorio 1 donde estuvo instalado en un principio). El blindaje de plomo fue mejorado (se añadieron 10 cm), se minimizó el espacio interno accesible al radón (haciendo uso de una pieza de plomo antiguo especialmente diseñada para las dimensiones de detector) y se colocó un veto activo de centelleadores plásticos en anticoincidencia para minimizar la posible contribución originada por el flujo residual de muones cósmicos capaces de penetrar hasta la profundidad del laboratorio. A todas estas mejoras del entorno experimental se añadió la reducción del fondo interno del cristal (que habiendo estado almacenado en subterráneo durante todo este tiempo no sólo no sufrió activación cosmogénica sino que fue desactivándose de aquellos contaminantes excitados durante el transporte de E.E.U.U. a España). El resultado final fue una reducción de un orden de magnitud en el fondo del experimento en la región de baja energía. El umbral en energías conseguido fue de 2,5 keV.

Esta reducción en el fondo permitió, con una exposición de 72,8 kg·día, mejorar las cotas obtenidas en el espacio paramétrico ( $m, \sigma$ ) de los WIMPs [82, 83]. Sin embargo, el principal objetivo de su instalación fue otro: la búsqueda de axiones solares mediante su conversión Primakoff en fotones en el cristal de germanio de forma coherente para ciertos ángulos de incidencia [84].

### 8.1.2 EL EXPERIMENTO IGEX-DM

Aunque el objetivo del experimento IGEX (International Germanium EXperiment) fue la detección de la desintegración doble beta sin neutrinos del  $^{76}\text{Ge}$ , campo en el que fue

uno de los dos experimentos líderes a nivel mundial [85, 86], uno de sus detectores fue dedicado, en el mismo montaje en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, a la búsqueda de materia oscura. El detector denominado RG-2 con una masa activa de unos 2 kg fue utilizado con un sistema de adquisición específico para la toma de datos en la región de baja energía tratando de reducir al máximo su umbral de detección. Con una exposición de 60 kg·día, un umbral de 4 keV y una resolución de 0,8 keV en la línea de 75 keV de los rayos X del plomo, se obtuvo un fondo radiactivo de 0,3 sucesos  $\text{keV}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{día}^{-1}$  entre 4 y 10 keV y 0,07 sucesos  $\text{keV}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{día}^{-1}$  entre 10 y 20 keV. Los diagramas de exclusión derivados permitieron mejorar los de la colaboración Heidelberg-Moscow [86] en la región de masas más interesante y se convirtieron en los más restrictivos sin hacer uso de substracción de fondos [38].

A continuación se implementó en el sistema de adquisición de datos la digitalización de los pulsos en la región de baja energía y se desarrolló una técnica de discriminación entre los sucesos debidos a ruido y los ocasionados por el fondo radiactivo (o WIMPs) en el detector mediante una técnica que usa las transformadas wavelets de los pulsos digitalizados. También se completó el blindaje de neutrones hasta 40 cm con ladrillos de polietileno borado y tanques de agua borada. Debido a que los otros detectores que compartían blindaje con RG-2 (RG-1, RG-3 y COSME) fueron extraídos del blindaje (ver figura 19), se pudo completar con plomo adicional el hueco interior que antes ocupaban y se pudo cerrar mejor el blindaje de neutrones al no estar los dewars de dichos detectores impidiéndolo. Con estas modificaciones se mejoró el fondo en la región más próxima al umbral en energías, obteniéndose 0,21 sucesos  $\text{keV}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{día}^{-1}$  entre 4 y 10 keV y 0,10 sucesos  $\text{keV}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{día}^{-1}$  entre 10 y 20 keV. En estas condiciones se obtuvieron 80 kg·día de datos que permitieron mejorar sensiblemente las exclusiones en el espacio paramétrico de los WIMPs y penetrar por primera vez en la región singularizada por la evidencia de modulación anual de la colaboración DAMA sin hacer uso de substracción de fondos [39].

## 8.2 Detección de materia oscura con centelleadores de yoduro de sodio

El yoduro de sodio dopado con Talio es un material centelleador con excelentes prestaciones para su uso en la búsqueda de materia oscura: se pueden fabricar cristales de gran tamaño, la producción de luz por unidad de energía depositada es grande y permite discriminar el tipo de partícula que ha hecho el depósito de energía en el detector mediante el estudio de la forma de los pulsos. Además, tanto el yodo como el sodio (ambos con un contenido isotópico 100% de núcleos con espín no nulo) son especialmente indicados para la búsqueda de WIMPs con interacciones dependientes del espín. Por todo ello y posibilitado por la disponibilidad de 14 centelleadores de yoduro de sodio de 10,7 kg cada uno de ellos en Canfranc (y que se habían utilizado con anterioridad en otros experimen-

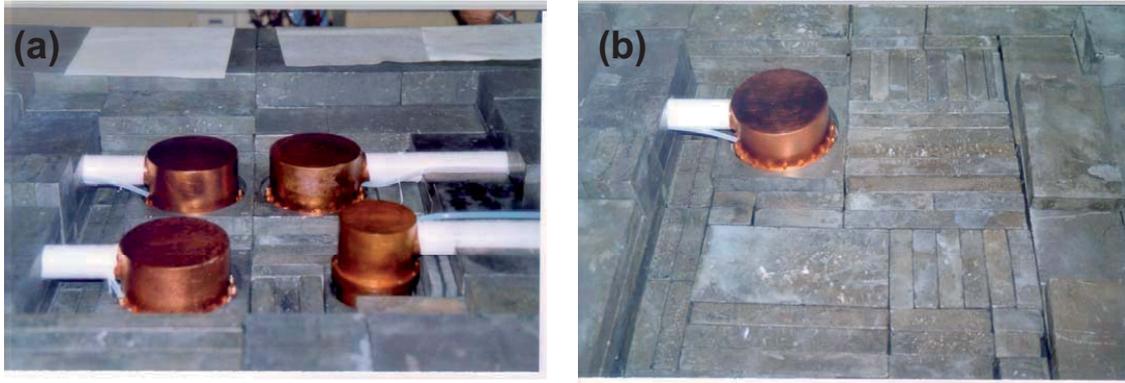


Figura 19: (a) Detalle de la parte interna del blindaje de tres de los detectores de IGEX y COSME. (b) Detalle de la parte interna del blindaje del detector RG-2 durante la toma de datos de IGEX-DM. (En color en la versión digital)

tos [87, 88]) se planteó un experimento de detección directa de materia oscura con ellos a comienzos de los noventa. El interés de este tipo de blanco para la búsqueda de materia oscura ha cobrado un mayor interés desde los primeros indicios de evidencia de modulación anual en los datos de baja energía obtenidos con este tipo de detectores por parte de la colaboración DAMA [30] en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso. Estos datos han sido recientemente confirmados por la misma colaboración (DAMA-LIBRA) [31].

### 8.2.1 EL EXPERIMENTO DM32

El experimento DM32 fue pionero en el análisis de la modulación anual en la señal de materia oscura. Utilizando 3 de los 14 detectores disponibles (32,1 kg de masa efectiva), fue planteado como experimento piloto para establecer la sensibilidad de estos detectores en la búsqueda de materia oscura y la viabilidad de un futuro experimento que permitiera aprovechar toda la masa disponible.

Los tres centelleadores estaban rodeados por un blindaje consistente (de dentro hacia fuera) de un promedio de 6 mm de cobre OFHC, 20 cm de plomo de baja actividad, una funda de PVC con sobrepresión de  $N_2$  gaseoso evaporado de un dewar, 1 mm de cadmio y 20 cm de parafina (ver figura 20). El dispositivo experimental se instaló en Canfranc, en el Laboratorio 1, a 675 m.w.e. y se almacenaron 4613,6 kg·día de datos útiles entre mayo de 1993 y diciembre de 1994, con un umbral de unos 8 keV y un fondo radiactivo promedio en la región de baja energía de unos 10 sucesos  $keV^{-1} kg^{-1} día^{-1}$ .

Los datos de este experimento fueron utilizados para excluir parte del espacio paramétrico ( $m$ ,  $\sigma$ ) de los WIMPs por el método convencional de comparar el límite superior al fondo

medido con la señal esperada para cada candidato. Se consideraron los dos escenarios límite: interacción pura independiente del espín y pura dependiente del espín, para presentar los resultados. La estabilidad de las condiciones de operación y la elevada masa de DM32 posibilitaron el análisis de la modulación anual en la señal de materia oscura. Para ello, se estudiaron los residuos Junio-Diciembre, se estudiaron parámetros estadísticos (como el significado estadístico de la modulación ) y la transformada coseno de la distribución temporal de los datos experimentales en la ventana de energías escogida, tratando de encontrar el mejor método para determinar la sensibilidad del experimento a una posible señal modulada. La ausencia de indicios de presencia de modulación en los datos llevó a mejorar en casi dos órdenes de magnitud las exclusiones obtenidas por el método convencional para interacciones tanto dependientes como independientes del espín [47, 48].



Figura 20: Blindaje del experimento DM32: tres detectores de NaI(Tl) en el Laboratorio 1 del LSC con el objetivo de estudiar la modulación anual en los ritmos de interacción. (En color en la versión digital)

### 8.2.2 EL EXPERIMENTO ANAIS

El experimento ANAIS (Annual modulation with NaIs) es un proyecto que trata de aprovechar toda la masa de yoduro de sodio disponible en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc y la experiencia acumulada por el grupo de Física Nuclear y Astropartículas en el trabajo con este tipo de detectores y en el análisis de la modulación anual en los ritmos de detección de la materia oscura galáctica. A causa del resultado positivo obtenido por el experimento DAMA-LIBRA (en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, Italia) y del escepticismo de la comunidad científica respecto al mismo, es necesario un experimento

de control con la misma técnica y el mismo material blanco para confirmar la evidencia o analizar posibles efectos sistemáticos de forma independiente al análisis realizado por DAMA-LIBRA. ANAIS cumpliría esta misión perfectamente como se refleja en el informe de ApPEC sobre el futuro de la Física de Astropartículas en Europa [89].

Partiendo de los resultados del experimento DM32 se pudo concluir que la mayor parte del fondo observado podía ser atribuido a contaminaciones de  $^{40}\text{K}$  y  $^{210}\text{Pb}$  en materiales próximos a los cristales (como la carcasa de acero, los fotomultiplicadores, soldaduras en el divisor de tensión, material reflectante, etc.) o en los propios cristales de yoduro de sodio [47]. El objetivo inmediato de ANAIS fue la reducción del fondo radiactivo junto con la mejora del umbral en energías (un punto clave para ser competitivo con el experimento DAMA-LIBRA).

En primer lugar se reemplazó la base de los fotomultiplicadores (que incluye el divisor de tensión) por otra sin soldaduras y fabricada en teflón (para reducir su contaminación) y, en la cual, todos los componentes electrónicos estuvieran alejados  $\approx 1$  m del cristal y fotomultiplicador. Asimismo se desarrolló un procedimiento de análisis de la forma de los pulsos a baja energía para discriminar los sucesos con origen en el fotomultiplicador (rápidos) de aquéllos con origen en el cristal (con las constantes de tiempo típicas de la fluorescencia en yoduro de sodio). Con estas dos mejoras implementadas se montó un dispositivo experimental consistente en un único cristal pero en las mejores condiciones de fondo posible (cambios principales con respecto a DM32 fueron el emplazamiento en el Laboratorio 3 con menor flujo residual de muones cósmicos a causa de la mayor cobertura de roca, el empleo de plomo antiguo de unos 2000 años de antigüedad con muy bajo contenido en  $^{210}\text{Pb}$  y el uso de vetos activos para eliminar sucesos debidos a la cascada que un muón podría producir en el material del blindaje). Este experimento consiguió reducir el umbral en energías de 8 a 4 keV y el fondo en la región de baja energía de unas 10 a 4 cuentas  $\text{keV}^{-1} \text{kg}^{-1} \text{día}^{-1}$  [90]. Aún así las principales contaminaciones del detector siguen presentes en el fondo (mostrando ser internas al cristal o muy próximas a él) en concordancia con la interpretación de los resultados del experimento DM32 [48].

En la actualidad ANAIS está enfocado en varias líneas de trabajo paralelas con el mismo objetivo final: alcanzar un grado de sensibilidad suficiente para llevar a cabo un experimento de control de la evidencia de DAMA sobre la observación de modulación anual en sus datos. Obviamente, se plantea como un experimento a largo plazo y que requiere una gran masa de detección en el que la estabilidad de las condiciones experimentales resulta fundamental. El estudio de la modulación anual requiere estudiar varios ciclos anuales, y exposiciones de por lo menos 500 kg·años.

Con el objetivo de comprender y reducir el fondo radiactivo del experimento se decidió modificar uno de los 14 detectores disponibles. Se han llevado a cabo modificaciones estructurales, sustituyendo algunos de los materiales por otros de bajo fondo especialmente

seleccionados y reemplazando algunos de los componentes originales por otros diseñados en Zaragoza. Se ha sustituido el fotomultiplicador por uno de bajo fondo y se ha acoplado una guía de luz, produciéndose una notable reducción en el fondo radiactivo en la región de media y alta energía. La escasa mejora conseguida en la región de baja energía es compatible con el hecho de que los contaminantes responsables de la misma se encuentran muy próximos o en el propio cristal de NaI. A continuación el detector fue abierto y despojado de su carcasa de acero inoxidable y reflectantes internos, que han sido sustituidos por otros especialmente diseñados a base de materiales de gran radiopureza: teflón y cobre OFHC. Se acoplaron dos fotomultiplicadores (con y sin guías de luz) y todo el conjunto se instaló dentro de una caja de cobre hermética para evitar que la humedad ambiente pudiera dañar el cristal de NaI, fuertemente higroscópico. A este dispositivo se le denominó el Prototipo II (ver figura 21) y permitió investigar el comportamiento del cristal a muy baja energía, caracterizándolo con fuentes gamma por debajo de 150 keV hasta 6 keV. Se ha discriminado el ruido procedente de los fotomultiplicadores, lo que ha permitido reducir el umbral hasta 2 keV (midiendo en coincidencia) [91, 36, 92]. No se pudo estudiar adecuadamente el fondo en la región de baja energía a causa de la presencia de una contaminación importante en  $^{232}\text{Th}$  en las soldaduras de la caja de cobre.

En pruebas realizadas en un tercer prototipo se puso de manifiesto la presencia de una población de sucesos a baja energía que mostraban una fluorescencia más rápida que la esperada para el yoduro de sodio. Estos sucesos, que empeoran las prestaciones de los detectores cerca del umbral, fueron identificados en un banco de pruebas en Canfranc como centelleo del cuarzo natural utilizado para las ventanas ópticas. Como consecuencia, en el Prototipo IV, en preparación, las ventanas de cuarzo natural serán sustituidas por ventanas de cuarzo sintético, que ha probado no centellear en los test realizados en el banco de pruebas.

Se ha trabajado asimismo en la puesta a punto de técnicas de discriminación del fondo radiactivo por la forma de los pulsos, ya que el tiempo de vida media asociado a la fluorescencia excitada en el proceso de interacción depende de la naturaleza de la partícula responsable del depósito energético. Por el momento, el análisis se ha llevado a cabo en la región de alta energía. Su finalidad era tanto la puesta a punto de la técnica de análisis (programas de tratamiento de los pulsos, algoritmos de selección, criterios de rechazo, parámetros de la adquisición, etc.) como una estimación de la contaminación interna de los cristales en los isótopos integrantes de las cadenas naturales mediante la discriminación de los depósitos de energía debidos a partículas alfa de aquellos ocasionados por fotones o electrones. Los resultados obtenidos son compatibles con una contaminación importante de  $^{210}\text{Pb}$  distribuido en el volumen de los cristales de NaI, que produce una contribución importante al fondo en la región de baja energía en torno a 50 keV. Se ha observado una gran variabilidad en las contaminaciones de los cristales estudiados y que las cadenas



Figura 21: Proceso de montaje de uno de los cristales de 10,7 kg de NaI como Prototipo II en los laboratorios de la Universidad de Zaragoza para su posterior instalación en el LSC. Cualquier operación que implique el contacto del cristal con la atmósfera debe ser evitada y por eso se ha trabajado en una caja de guantes especialmente diseñada para ANAIS. (En color en la versión digital)

naturales aparecen con el equilibrio roto en todos los cristales medidos hasta la fecha [93].

Por otro lado y, también en paralelo, se ha adquirido un cristal de nueva manufactura de la empresa Saint-Gobain, de 9,6 kg, en las condiciones de máxima pureza que ofrece el mercado. Con él se va a construir el Prototipo IV, especialmente diseñado con componentes de ultra-bajo fondo radiactivo: carcasa óptima, materiales reflectantes, guías de luz, ventanas de acoplo a los fotomultiplicadores, etc. El Prototipo IV tiene como objetivo la optimización de la detección en el rango de baja energía, minimizando el fondo radiactivo y mejorando el umbral en energías, así como la estimación del contenido del cristal en  $^{40}\text{K}$ . Su caracterización alfa ha probado que tiene un nivel de  $^{210}\text{Pb}$  interno aproximadamente un orden de magnitud menor que los antiguos cristales, pero sin embargo, el fondo en la región de baja energía ha resultado, en los tests preliminares de fondo, prácticamente el mismo que se midió con el Prototipo II por debajo de 30 keV. A causa de la presencia de la contaminación de Torio en la caja de cobre, cuando se hicieron estas pruebas, no se puede descartar un origen externo común de ambos fondos a baja energía.

Se han realizado simulaciones, usando el código Géant 4, del Prototipo II, colocando las distintas contaminaciones en sus lugares más plausibles. Aparte de descartar algunas localizaciones para diversos contaminantes, uno de los principales resultados de estas simulaciones ha sido identificar el  $^{40}\text{K}$  como el isótopo más peligroso de los presentes en el entorno del detector, a causa de que en la desintegración vía Captura Electrónica, en un alto porcentaje se emite la energía de ligadura de la capa K del Argon en forma de rayos X y electrones Auger, que son absorbidos con una eficiencia del 100%, suponiendo un depósito energético total de 3,2 keV, que produce un pico muy próximo al umbral (y en la ventana energética de interés para el análisis de la señal de materia oscura) cuando escapa el fotón de 1460 keV que sigue a la desintegración del potasio. Recientemente, se ha llevado a cabo la medida de la contaminación interna de potasio del Prototipo III mediante el análisis de la coincidencia entre el fotón de 1460 keV que escapa (e interacciona en otro detector contiguo) y el depósito de 3,2 keV en el detector estudiado, en este caso el Prototipo III. Los resultados del experimento han permitido determinar la contribución de este isótopo al fondo a baja energía de ANAIS, que por el momento parece ser la dominante, y han permitido verificar la linealidad de la calibración a muy baja energía, justo en la región del umbral. Ya se han medido los siete primeros detectores y está en operación en Canfranc un montaje con los siete detectores restantes en coincidencia (ver figura 22) para tratar de determinar las contaminaciones de  $^{40}\text{K}$ , resultado crucial para establecer la viabilidad del experimento ANAIS tal y como fue planteado. De acuerdo con un análisis preliminar, parece que el alto nivel observado de este isótopo puede comprometer los objetivos de fondo a baja energía de ANAIS y se han establecido contactos con diversos suministradores de NaI para intentar la adquisición de nuevos cristales de mayor radiopureza.

### *8.3 Detección de materia oscura con detectores criogénicos: el experimento ROSEBUD*

El grupo de Física Nuclear y Astropartículas de la Universidad de Zaragoza ha tenido como objetivo a largo plazo disponer de una instalación de bajas temperaturas con carácter permanente en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Con este fin se planteó la formación de miembros del grupo en este campo en pleno desarrollo desde comienzos de los 90 y se establecieron contactos con diversos grupos a nivel europeo, en la vanguardia del desarrollo de estos nuevos detectores.

Como resultado de una colaboración con el Institute d'Astrophysique Spatiale (Orsay, Francia), a finales de 1998 estaba terminada la instalación en el Laboratorio 3 de una caja de Faraday ( $2 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$ ) aislada eléctrica y acústicamente (para alojar el equipo experimental: refrigerador de dilución, detector, blindaje y primeras etapas de la electrónica), de los equipos de alto vacío necesarios, de una sala de control y de una caja de guantes para la manipulación de los detectores. En la primavera de 1999 se procedió a la instalación del

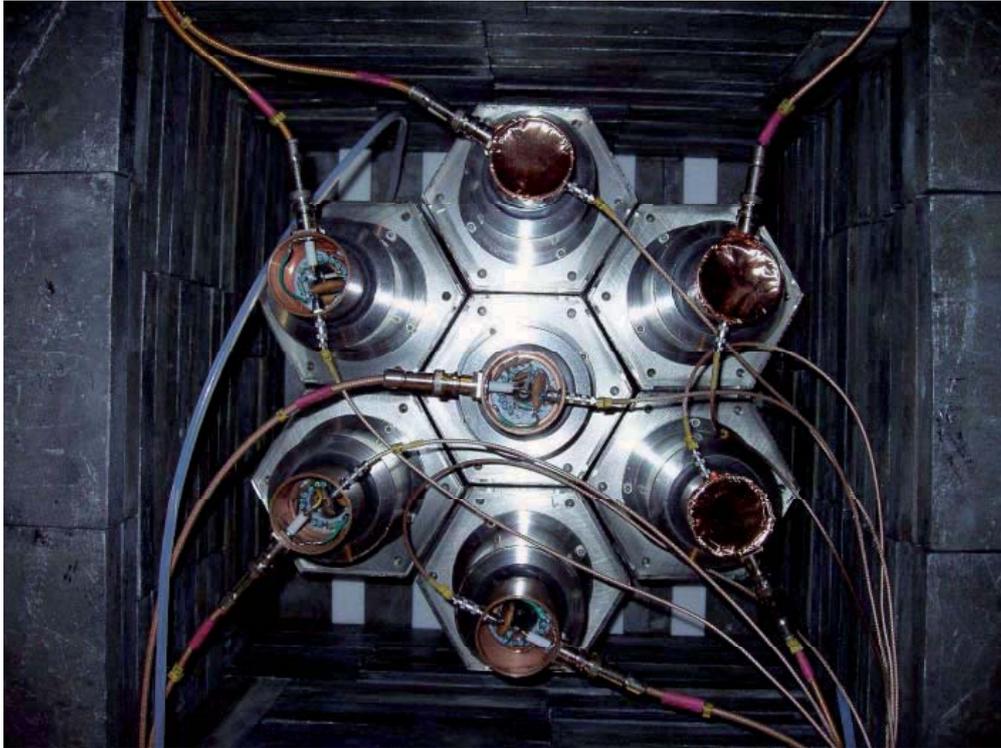


Figura 22: Montaje utilizado en Canfranc para la caracterización de los yoduros, tanto en contaminantes alfa como en potasio. (En color en la versión digital)

primer experimento con detectores de bajas temperaturas en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc: ROSEBUD. Es una colaboración entre el Institute d'Astrophysique Spatiale (IAS) y la Universidad de Zaragoza con la finalidad de buscar la materia oscura del Universo, combinando para ello la experiencia del grupo del IAS en la fabricación de bolómetros de excelentes prestaciones y la experiencia del grupo de Zaragoza en cuestiones de bajo fondo y de búsqueda de materia oscura. Desde su instalación en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, ROSEBUD ha tenido dos fases que se resumen a continuación y una tercera que está en marcha en la actualidad.

En su primera fase ROSEBUD instaló tres bolómetros de zafiro ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dos de 25 g y uno de 50 g. El zafiro es un material adecuado como absorbente en un bolómetro dada su alta temperatura de Debye, habiéndose alcanzado umbrales inferiores a 500 eV y resoluciones de 120 eV (FWHM) a 1,5 keV en pruebas preliminares en el IAS en Orsay. Fueron instalados en un pequeño refrigerador de dilución  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc y operados a una temperatura de unos 20 mK. Utilizaban como sensor térmico un termistor NTD de germanio. El blindaje, especialmente diseñado para

este experimento, consistió en un blindaje dentro del refrigerador (4 mm de plomo antiguo y 14 mm de cobre rodeando a los detectores para apantallar la contaminación posible en las distintas capas del escudo térmico y los recipientes de los líquidos criogénicos, además de 30 mm de plomo antiguo apantallando los detectores de los distintos componentes de la parte superior del refrigerador de dilución: cámara de mezclas, intercambiadores de calor, etc.) y un blindaje externo (10 cm de plomo antiguo, 15 cm de plomo de baja actividad, funda de PVC sellada herméticamente y mantenida bajo sobrepresión de  $N_2$  gaseoso evaporado de un dewar, 1 mm de cadmio y láminas de  $\mu$ -metal). Todo ello se instaló dentro de la caja de Faraday, especialmente construida para este experimento, y sobre una plataforma antivibratoria.

Durante 1999 se llevaron a cabo varios periodos de medida en Canfranc con este sistema buscando reducir el fondo radiactivo en la región de baja energía y tras sucesivas modificaciones en el refrigerador de dilución y la supresión de componentes prescindibles próximos a los detectores se consiguió un fondo de 7 sucesos  $keV^{-1} kg^{-1} día^{-1}$  en la ventana 100-150 keV y 11 sucesos  $keV^{-1} kg^{-1} día^{-1}$  en la ventana 50-100 keV. En la región de más baja energía el fondo resultó ser mucho mayor y por eso, pese al bajo umbral del experimento, las exclusiones obtenidas en el espacio paramétrico  $(m, \sigma)$  de los WIMPs fueron modestas.

En la segunda fase del experimento (2000-2001) se instalaron en Canfranc tres bolómetros distintos: uno de 50 g de zafiro (el único utilizado en la fase anterior), otro de 67 g de germanio y el tercero un bolómetro doble para la detección simultánea de luz y calor con 54 g de  $CaWO_4$  como absorbente centelleador. Para esta nueva etapa se reemplazaron ciertas partes del refrigerador y se aumentaron los blindajes internos tratando de mejorar el fondo con respecto al de la primera fase. Sin embargo el fondo observado en el bolómetro de zafiro no mostró variación alguna respecto al obtenido en la primera fase. El bolómetro de germanio, que gracias a su mayor número másico garantizaba mayor eficiencia en los picos de absorción total, dio resultados compatibles con los del de zafiro sin mostrar picos visibles que sirvieran de ayuda para la identificación o localización de los posibles contaminantes externos. Este problema se volverá a abordar con éxito más adelante con un bolómetro centelleador de BGO. El resto de los objetivos de esta fase del experimento fueron satisfactoriamente cumplidos. Por primera vez operaron en el mismo montaje, dentro del mismo blindaje y en las mismas condiciones, detectores con tres absorbentes distintos. Aunque sólo se trata de un primer paso, es importante como método para minimizar posibles errores sistemáticos e incluso para analizar la dependencia de la señal de materia oscura con el número másico del blanco empleado. Además, y sobre todo, fue la primera vez que se llevó a cabo en subterráneo la discriminación del tipo de partícula incidente mediante la detección simultánea de la luz y el calor producidos en su interacción con el material blanco. Debido a la importancia de este último punto,

se describe a continuación con un poco más de detalle el doble bolómetro: consta de un cristal cilíndrico de 54 g de  $\text{CaWO}_4$  y un pequeño disco de germanio (25 mm de diámetro y 100  $\mu\text{m}$  de espesor) que mira directamente hacia una de las caras del centelleador dentro de una cavidad reflectante (ver figura 23). Cada cristal tiene pegado su correspondiente sensor NTD para la medida de la temperatura y sus eventuales variaciones. Así el calor producido tras un depósito energético, correspondiendo a una interacción de una partícula en el cristal de  $\text{CaWO}_4$ , es visto directamente como un incremento en su temperatura y parte de la luz emitida que escapa del  $\text{CaWO}_4$  es absorbida por el germanio y convertida también en otro incremento de temperatura en este segundo bolómetro. La lectura simultánea de estos dos bolómetros permitió distinguir sin ambigüedad la presencia de contaminantes internos con emisión alfa en un fondo beta/gamma mucho más importante, así como retrocesos debidos a neutrones (en tests previos en Orsay con una fuente de calibración de  $^{252}\text{Cf}$ ). Esta discriminación resulta crucial en la búsqueda de materia oscura, como ya habíamos comentado previamente. De hecho, pese al elevado fondo interno del cristal (atribuible en buena parte a la presencia de  $^{210}\text{Pb}$  y sus descendientes de corta vida media  $^{210}\text{Bi}$  y  $^{210}\text{Po}$ ), después de aplicar los cortes adecuados en el diagrama en dos dimensiones de señal luminosa frente a señal térmica, sólo 4 sucesos no pudieron ser rechazados como originados por WIMPs o neutrones en 24,2 horas efectivas de medida y en una ventana de análisis entre 75 y 200 keV. Por supuesto para explorar regiones de interés del espacio paramétrico de los WIMPs son necesarios mejores umbrales y mayores tiempos de exposición, objetivos a medio plazo para ROSEBUD [64].



Figura 23: Bolómetro doble de BGO utilizado durante la última serie de medidas del experimento ROSEBUD en Canfranc. (En color en la versión digital)

La línea abierta con el doble bolómetro de  $\text{CaWO}_4$  pasó a ser el punto fuerte de la siguiente etapa de ROSEBUD, con el objetivo principal de mejorar las prestaciones de

los dobles bolómetros utilizados, sobre todo en lo que al umbral en energías y al fondo radiactivo se refiere. Asimismo, otros materiales centelleadores han sido y serán puestos a punto para su operación como bolómetros dobles en subterráneo y su posible aplicación en la búsqueda de materia oscura.

En concreto, la colaboración IAS-UZ dispone de nuevos bolómetros centelleadores de BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), LiF,  $\text{TeO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [95]. Entre ellos destacan los de zafiro y BGO por su excelente umbral en energías y muy buena capacidad de discriminación (ver figura 24). En 2007 se ha iniciado un nuevo periodo de medidas de ROSEBUD en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, instalando en una primera fase, un cristal de BGO (hay ya construidos dos bolómetros, uno de 46 y otro de 92 g), un cristal de zafiro y un cristal de LiF, montados todos ellos como dobles bolómetros luz-calor para disponer de la posibilidad de discriminar el tipo de partícula que interacciona en el cristal. En lo que se refiere a la discriminación de retrocesos nucleares frente a los electrónicos, estos dobles bolómetros ya han sido probados en Orsay con una fuente de neutrones ( $^{252}\text{Cf}$ ) y muestran una capacidad de discriminación del 90% por encima de 23 keV (y del 99,99% por encima de 51 keV) el BGO y de 14 keV (y 27 keV), respectivamente, el zafiro, por lo que sus prestaciones para la búsqueda de materia oscura se acercan a las necesarias (ver figura 25). Además el doble bolómetro de BGO, gracias a su alta eficiencia, actúa como espectrómetro gamma en el montaje, permitiendo monitorizar el fondo radiactivo y del análisis de los últimos resultados obtenidos en Canfranc se ha derivado una mejor comprensión del fondo radiactivo del experimento [94]. Con el detector de LiF se espera medir por primera vez el fondo de neutrones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc. En la actualidad, sólo hay dos experimentos en toda la comunidad científica internacional que trabajen con este tipo de dobles bolómetros centelleadores: la colaboración CRESST [60] y la colaboración ROSEBUD; pese a las reducidas dimensiones de los cristales empleados, ROSEBUD se encuentra en disposición de competir al ms alto nivel en la I+D de estos detectores. En cualquier caso, la posibilidad de obtener límites relevantes para los WIMPs (con bolómetros de menos de 100 g) pasa por la necesaria mejora del umbral, del fondo radiactivo y el aumento de la exposición.

Dado que este tipo de detectores son tan novedosos, de las diversas calibraciones llevadas a cabo y primeras pruebas en Canfranc se está obteniendo información muy interesante tanto sobre el comportamiento y prestaciones de este tipo de detector híbrido como de los materiales utilizados como centelleadores a tan bajas temperaturas (casi ninguno de ellos había sido caracterizado previamente en el rango de los mK). Así por ejemplo, se está estudiando una anticorrelación luz-calor observada en los datos proporcionados por el centelleador de zafiro (y después identificada también en el BGO) que ha permitido estimar la emisión absoluta de luz en el zafiro a muy baja temperatura de una forma original. Se están estudiando posibles inhomogeneidades en la emisión o recolección de

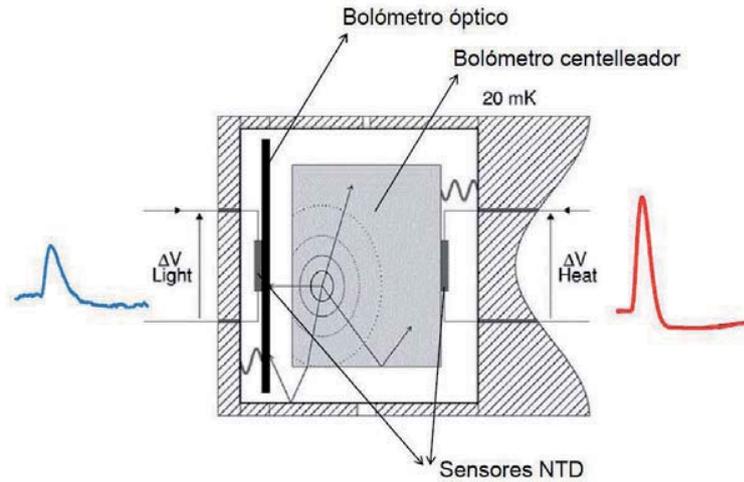


Figura 24: Esquema de un bolómetro doble similar a los utilizados en el experimento ROSE-BUD: consta de un bolómetro centelleador en el que una interacción convierte parte de la energía depositada en calor, que produce una señal en el NTD, y en luz, que escapa y es absorbida en el bolómetro óptico, convirtiéndose también en calor. (En color en la versión digital)

luz, para cuantificar su influencia en la resolución de estos detectores. Se está trabajando en la determinación del Factor de Eficiencia Relativa (REF) para retrocesos nucleares, todavía poco estudiado en detectores bolométricos y que resulta ser un factor fundamental en el análisis de datos en la búsqueda de la materia oscura. Como ya se ha comentado, se espera determinar el fondo de neutrones en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc en el próximo futuro con el bolómetro centelleador de LiF, etc.

A más largo plazo, la colaboración con el IAS sigue planteada. El desarrollo de experimentos específicos y el uso de unos materiales u otros para la fabricación de los nuevos bolómetros debe ir adaptándose a los resultados que se vayan obteniendo, manteniendo siempre como objetivos la reducción del fondo radiactivo y la mejora del umbral. Se pretende ser competitivo en la búsqueda de la materia oscura con una diversidad de posibles materiales blanco. Este último punto es importante en caso de que se encuentre una señal positiva: debería ser compatible en todos ellos y diferente de lo esperado para un fondo debido a neutrones. El uso de diferentes materiales nos proporcionará además nuevas posibilidades no previstas de antemano para explorar otros aspectos de la Física Nuclear o Subnuclear diferentes de la búsqueda de materia oscura, aunque ésta se mantenga como objetivo fundamental.

Por supuesto, la posibilidad de incrementar la masa de los bolómetros utilizados es uno

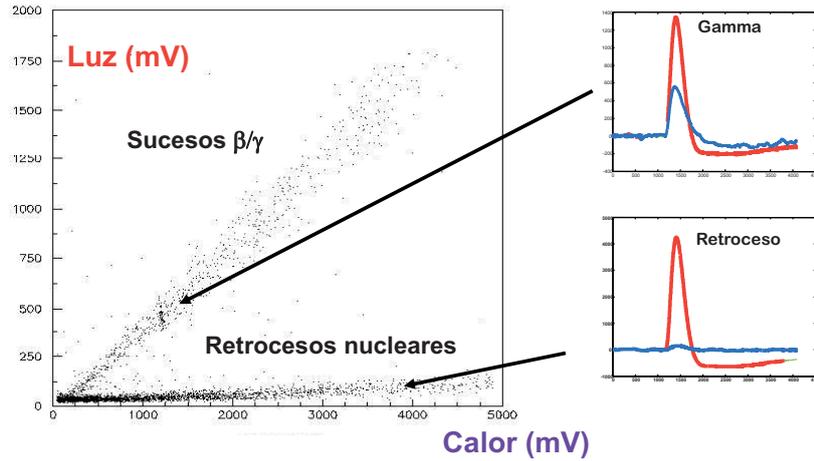


Figura 25: Diagrama de discriminación luz-calor obtenido en el IAS durante una calibración con una fuente de neutrones de un bolómetro de zafiro. El reparto de la energía depositada en la interacción entre las vías de luz y calor depende del tipo de partícula y permite discriminar sucesos  $\beta/\gamma$  de retrocesos nucleares. (En color en la versión digital)

de los puntos más importantes para el futuro de ROSEBUD. Para conseguir este objetivo, es imprescindible disponer de una instalación de bajas temperaturas permanente en el nuevo Laboratorio Subterráneo de Canfranc con capacidad para masas de detección del orden de, al menos, una decena de kilos. Así se podría pensar en un amplio programa de búsqueda de materia oscura en condiciones de ultra-bajo fondo y con discriminación luz-calor para una gran diversidad de materiales blanco. Si los factores de rechazo de fondo a baja energía se mantienen y se logra reducir el umbral en energías del experimento, estarían al alcance límites competitivos con los de los mejores experimentos de búsqueda de materia oscura actualmente en operación o en desarrollo.

La incorporación de ROSEBUD al proyecto EURECA (European Calorimeter Array), que aglutina a los principales grupos europeos en la detección de materia oscura con técnicas criogénicas, se suma a esta intensificación de la línea de trabajo asociada a los detectores de bajas temperaturas. EURECA es un ambicioso proyecto que surge de las colaboraciones CRESST y EDELWEISS y pretende operar hasta 1 tonelada de masa de detección a muy baja temperatura, con una técnica híbrida y siguiendo una estrategia basada en la utilización de múltiples blancos en un gran experimento a nivel europeo. Al proyecto inicial se han añadido algunos grupos más pequeños, entre ellos la colaboración ROSEBUD, aceptados por EURECA al considerar que aportan un valor añadido al proyecto en experiencia y conocimientos.

## 9 Conclusiones y Agradecimientos

Este trabajo ha tratado de revisar dos décadas de esfuerzos para mantener un laboratorio subterráneo competitivo a nivel internacional. Ha sido un esfuerzo compartido, al que han contribuido numerosos investigadores nacionales y extranjeros y sin el cuál habría sido imposible que un pequeño laboratorio en el Pirineo aragonés fuera conocido en el ámbito de la Física Subterránea al más alto nivel. Por eso este trabajo tiene que reconocer la tarea de los fundadores del Laboratorio, en primer lugar, Ángel Morales, Rafael Núñez-Lagos, Julio Morales, José Ángel Villar y Jorge Puimedón. Ellos creyeron en el proyecto y construyeron un laboratorio con los escasos medios con los que contaban y con mucho trabajo. Son muchos los que han contribuido a la consolidación y crecimiento del Laboratorio. En particular, me gustaría mencionar a aquellos que ya no forman parte del grupo de Física Nuclear y Astropartículas y con los que compartí muchas agradables, aunque duras, horas en Canfranc: Ángel Larrea, Carlos Sáenz, Ana Salinas, Eva Cerezo, Mercedes Fatás y David González. Por supuesto, todo el grupo de Física Nuclear y Astropartículas ha trabajado siempre por y para el Laboratorio Subterráneo de Canfranc y debe ser reconocida su contribución al éxito del mismo. Canfranc no habría llegado a ser lo que es en la actualidad sin las colaboraciones internacionales que han aportado tanto equipos como experiencia. En particular me gustaría mencionar el papel que los últimos años ha desempeñado el grupo del Institute d'Astrophysique Spatiale de Orsay (Francia).

A título personal, me gustaría agradecer especialmente a Eduardo García el apoyo que siempre me ha prestado en todas las tareas que he abordado y lo mucho que de él he aprendido y sigo aprendiendo, a Alfonso Ortiz de Solórzano, su saber hacer y su siempre buena disposición a trabajar y a hacerlo con buen humor y a María Martínez, su excelente trabajo en el experimento ANAIS, y el entusiasmo que derrochó, incluso en los momentos complicados, y que nos sirvió de estímulo a muchos.

## Referencias

- [1] F. Zwicky, *Helvetia Physics Acta* **6** (1933) 110.
- [2] V.C. Rubin and W.K. Ford, *Astrophysical Journal* **159** (1970) 379.  
M.S. Roberts, R.N. Whitehurst, *Astrophysical Journal* **201** (1975) 327.  
V. Rubin *et al.*, *Astrophysical Journal* **238** (1980) 471.
- [3] A.H. Guth, *Physical Review D* **23** (1981) 347.  
A. Linde, *Physics Letters B* **108** (1982) 389.  
A. Albrecht and P.J. Steinhard, *Physical Review Letters* **48** (1982) 1220.

- [4] K. Griest and M. Kamionkowski, *Physics Reports* **333-334** (2000) 167.  
G. Bertone, D. Hooper and J. Silk, *Physics Reports* **405** (2005) 279.
- [5] W.L. Freedman and M.S. Turner, *Reviews of Modern Physics* **75** (2003) 1433.
- [6] Los resultados mostrados en el texto se obtienen a partir de los datos de WMAP directamente, si se realiza un análisis combinado de datos de WMAP, medidas de supernovas distantes y medidas de oscilaciones acústicas en la distribución de galaxias se obtienen resultados totalmente compatibles, aunque ligeramente diferentes.  
G. Hinshaw *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0732v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.  
B. Gold *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0715v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.  
M.R.olta *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0593v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.  
J. Dunkley *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0586v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.  
E.L. Wright *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0577v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.  
R.S. Hill *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0570v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.  
E. Komatsu *et al.*, arXiv:astro-ph 0803.0547v1. Enviado para su publicación a *Astrophysical Journal Supplement Series*.
- [7] Springel *et al.*, *Nature* **435** (2005) 629.
- [8] <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>
- [9] S. Fukuda *et al.*, (SuperKamiokande Collaboration), *Physical Review Letters* **81** (1998) 1562.  
Q.R. Ahmad *et al.*, *Physical Review Letters* **87** (2001) 071301.  
Q.R. Ahmad *et al.*, *Physical Review Letters* **89** (2002) 011302.
- [10] W.L. Freedman *et al.*, *Astrophysical Journal* **553** (2001) 47.
- [11] R.A. Knop *et al.*, *The Astrophysical Journal* **598** (2003) 102.  
S. Perlmutter *et al.*, *The Astrophysical Journal* **517** (1999) 565.  
S. Perlmutter, *Physics Today* abril 2003.  
A.G. Riess *et al.*, *Astronomical Journal* **116** (1998) 1009.
- [12] S.W. Allen *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **334** (2002) L11.

- [13] [http://chandra.harvard.edu/press/06\\_releases/press\\_082106.html](http://chandra.harvard.edu/press/06_releases/press_082106.html) (Nota de prensa que hizo pública la colaboración CHANDRA el 21 de agosto de 2006 al respecto).
- [14] R. A. Alpher, H. Bethe, and G. Gamow, *Physical Review* **73** (1948) 803.
- [15] S. Burles *et al.*, *Astrophysical Journal Letters* **552** (2001) L1.
- [16] M. Milgrom, *Scientific American*, Agosto (2002).
- [17] A. Lue *et al.*, *Physical Review Letters* **92** (2004) 131102.
- [18] R. Gavazzi, *New Astronomy Reviews* **46** (2002) 783.
- [19] J. Dunkel, *The Astrophysical Journal* **604** (2004) L37.
- [20] J.P. Ostriker, P.J.E. Peebles, *Astrophysical Journal* **186** (1973) 467.
- [21] A. Helmi *et al.*, *Physical Review D* **66** (2002) 063502.  
A.M. Green, *Phys. Rev. D* **63** (2001) 043005.
- [22] R.A. Ibata *et al.*, *Nature* **370** (1994) 194.
- [23] D. Martínez-Delgado *et al.*, *Astrophysical Journal* **549** (2001) L199.  
D. Martínez-Delgado *et al.*, *Astrophysical Journal* **601** (2004) 242.
- [24] L. Roszkowski, R. Ruiz de Austri and R. Trotta, *Journal of High Energy Physics* **07** (2007) 075.
- [25] G. Raffelt, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **49** (1999) 163.  
C. Haggmann *et al.*, *Physical Review Letters* **80** (1998) 2043.  
A. Morales *et al.*, *Astroparticle Physics* **16** (2002) 325.  
S. Andriamonje *et al.*, *Physical Review Letters* **94** (2005) 121301.  
E. Zavattini *et al.*, *Physical Review Letters* **96** (2006) 110406.
- [26] P. Jean *et al.*, *Astronomy and Astrophysics* **407**(2003) L55.
- [27] C. Boehm *et al.*, *Physical Review Letters* **92** (2004) 101301-1.
- [28] S. Coutu *et al.*, *Astroparticle Physics* **11** (1999) 429.  
G.L. Kane *et al.*, *Physical Review D* **65** (2002) 057701.
- [29] C. Amsler *et al.*, *Physics Letters B* **667** (2008) 1.
- [30] R. Bernabei *et al.*, *Physics Letters B* **450** (1999) 448.  
R. Bernabei *et al.*, *Rivista Nuovo Cimento A* **112** (1999) 545.  
R. Bernabei *et al.*, *Physics Letters B* **480** (2000) 23.

- R. Bernabei *et al.*, *European Physics Journal C* **18** (2000) 283 .
- P. Belli *et al.*, *Physical Review D* **61** (2000) 023512.
- R. Bernabei *et al.*, *Physics Letters B* **509** (2001) 197.
- P. Belli *et al.*, *Physical Review C* **66** (2002) 043503 .
- [31] R. Bernabei *et al.*, arXiv:astro-ph 0804.2738v1.  
R. Bernabei *et al.*, arXiv:astro-ph 0804.2741v1.
- [32] J. I. Collar and F.T. Avignone, III. *Physical Review D* **47** (1993) 5238.
- [33] P. F. Smith and J. D. Lewin. *Physics Reports* **187** (1990) 203
- [34] P.F. Smith. *New Astronomy Review* **49** (2005) 303.
- [35] A. K. Drukier, *Physical Review D* **33** (1986) 3495.  
K. Freese, J. Frieman, and A. Gould, *Physical Review D* **37** (1988) 3388.
- [36] M. Martínez Pérez, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Diseño de un prototipo para un experimento de detección directa de materia oscura mediante modulación anual con centelleadores de yoduro de sodio*, octubre 2006.
- [37] S. P. Ahlen *et al.*, *Physics Letters B* **195** (1987) 603.
- [38] A. Morales *et al.*, *Physics Letters B* **489** (2000) 268.  
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **95** (2001) 229.
- [39] A. Morales *et al.*, *Physics Letters B* **532** (2002) 8.  
I.G. Irastorza *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **110** (2002) 55.  
J. Morales *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **118** (2003) 524.  
I.G. Irastorza *et al.*, *Astroparticle Physics* **20** (2003) 247.
- [40] H. V. Klapdor-Kleingrothaus *et al.*, *Astroparticle Physics* **18** (2003) 525.
- [41] J.I. Collar *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **31** (1993) 377.  
M.L. Sarsa *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **35** (1994) 154.  
E. García *et al.*, *Physical Review D* **51** (1995) 1458.
- [42] E. García Abancens, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Investigación sobre candidatos a la materia oscura del Universo en experiencias subterráneas con detectores de germanio*, diciembre de 1992.
- [43] D. O. Caldwell *et al.*, *Physical Review Letters* **65** (1990) 1305.
- [44] S. Schoenert *et al.*, (GERDA Collaboration). *Prog. Part. Nucl. Phys.* **57** (2006) 241.

- [45] A. Morales. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **114** (2003) 39.
- [46] D. Anderson *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **138** (2005) 217.
- [47] M.L. Sarsa *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **48** (1996) 73.  
M.L. Sarsa *et al.*, *Physics Letters B* **386** (1996) 458.  
M.L. Sarsa, *et al.*, *Physical Review D* **56** (1997) 1856.
- [48] M.L. Sarsa Sarsa, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Experimento para la detección directa de la materia oscura galáctica fría con detectores de centelleo mediante la búsqueda de señales distintivas*, diciembre de 1995.
- [49] C. Bacci *et al.*, (BPRS Collaboration), *Astroparticle Physics* **4** (1996) 195.
- [50] K. Fushimi *et al.*, *Physical Review C* **47** (1993) 425.
- [51] K. Fushimi *et al.*, *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 120.
- [52] G.J. Alner *et al.*, (UK Dark Matter Collaboration), *Physics Letters B* **616** (2005) 17.  
F. Giuliani. *Physical Review Letters* **93**(2004)161301.
- [53] C. Savage *et al.*, arXiv:astro-ph 0808.3607v1.
- [54] H. S. Lee *et al.*, (KIMS Collaboration), *Physics Letters B* **633** (2006) 201.
- [55] G. Angloher, *Nucl. Inst. Met. Phys. Res. A* **512** (2003) 401.
- [56] E. Silver *et al.*, *Nucl. Inst. Met. Phys. Res. A* **545** (2005) 683.
- [57] A. Alessandrello *et al.*, *Physics Letters B* **408** (1997) 465.  
J.W. Zhou *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **349** (1994) 225.  
N. Coron *et al.*, *Physics Letters B* **659** (2008) 113.
- [58] D. S. Akerib *et al.*, CDMS Collaboration, *Physical Review Letters* **96** (2006) 011302.  
D. S. Akerib *et al.*, CDMS Collaboration, *Physical Review D* **73** (2006) 011102.  
Z. Ahmed *et al.*, arXiv:astro-ph 0802.3530v2.
- [59] V. Sanglard *et al.*, *Physical Review D* **71** (2005) 122002 .
- [60] G. Angloher *et al.*, *Astroparticle Physics* **23** (2005) 325.
- [61] R. Ardito *et al.*, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **57** (2006) 203.  
C. Arnaboldi *et al.*, *Physics Letters B* **584** (2004) 260.  
C. Arnaboldi *et al.*, *Nucl. Inst. Met. Phys. Res. A* **518** (2004) 775.

- [62] M. Galeazzi *et al.*, *Physical Review Letters* **86** (2001) 1978.  
M. Galeazzi *et al.*, *Physical Review C* **63** (2000) 014302.  
F. Gatti *et al.*, *Nature* **397** (1999) 137.
- [63] D. S. Akerib *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **559** (2006) 411.
- [64] C. Bobin *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **70** (1999) 90.  
S. Cebrián *et al.*, *Astroparticle Physics* **10** (1999) 361.  
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Inst. and Methods in Phys. Research A* **444** (2000) 315.  
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **87** (2000) 500.  
S. Cebrián *et al.*, *Astroparticle Physics* **15** (2001) 79.  
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **110** (2002) 97.  
S. Cebrián *et al.*, *Physics Letters B* **556** (2003) 14.  
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **118** (2003) 523.  
S. Cebrián *et al.*, *Physics Letters B* **563** (2003) 48.  
S. Cebrián *et al.*, *Astroparticle Physics* **21** (2004) 23.  
S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **138** (2005) 519,  
J. Amaré *et al.*, *Applied Physics Letters* **87** (2005) 264102.
- [65] H. Kraus *et al.*, *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 139.
- [66] G.J. Alner *et al.*, (UK Dark Matter Collaboration), *Astroparticle Physics* **23** (2005) 444.
- [67] R. Bernabei *et al.*, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* **110** (2002) 88.
- [68] G.J. Alner *et al.*, (UK Dark Matter Collaboration), *Astroparticle Physics* **28** (2007) 287.  
G.J. Alner *et al.*, (UK Dark Matter Collaboration), *Physics Letters B* **653** (2007) 161.
- [69] J. Angle *et al.*, (XENON Collaboration), *Physical Review Letters* **100** (2008) 021303.
- [70] P. Benetti *et al.*, *Astroparticle Physics* **28** (2008) 495.
- [71] A. Rubbia (ArDM Collaboration), *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 129.
- [72] G. J. Alner *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **535** (2004) 644.
- [73] G. J. Alner *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **555** (2005) 173.
- [74] C.J. Copi and L.M. Krauss, *Physical Review D* **63** (2001) 043507

- [75] E. Behnke *et al.*, *Science* **319** n.5865 (2008) 933.
- [76] T. A. Girard *et al.*, *Physics Letters B* **621** (2005) 233.
- [77] M. Barnabé-Heider *et al.*, *Physics Letters B* **624** (2005) 186.
- [78] K. Borer *et al.*, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **138** (2005) 163.
- [79] Winkelmann *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **559** (2006) 384.
- [80] Y. Aharonov *et al.*, *Physics Letters B* **353** (1995) 168.  
Y. Aharonov *et al.*, *Physical Review D* **52** (1995) 3785.
- [81] D.E. Di Gregorio *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **48** (1996) 56.  
D. Abriola *et al.*, *Astroparticle Physics* **6** (1996) 63.  
D. Abriola *et al.*, *Astroparticle Physics* **10** (1999) 133.
- [82] A. Morales *et al.*, *Astroparticle Physics* **16** (2002) 325.
- [83] I. García Irastorza, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Un telescopio subterráneo de axiones y WIMPs como instrumento de investigación astrofísica y detector de materia oscura*, abril de 2001.
- [84] S. Cebrián *et al.*, *Astroparticle Physics* **10** (1999) 397.  
I.G. Irastorza *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **87** (2000) 102.  
A. Morales *et al.*, *Astroparticle Physics* **16** (2002) 325.
- [85] E. García *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **28 A** (1992) 216.  
R.L. Brodzinski *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **31** (1993) 76.  
F.T. Avignone *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **35** (1994) 354.  
H.S. Miley *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **35** (1994) 388.  
C.E. Aalseth *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **48** (1996) 223.  
C.E. Aalseth *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **70** (1999) 236.  
C.E. Aalseth *et al.*, *Physical Review C* **59** (1999) 2108.  
C.E. Aalseth *et al.*, *Physics of Atomic Nuclei* **63** (2000) 1225.  
C.E. Aalseth *et al.*, *Physical Review D* **65** (2002) 92007.  
D. González *et al.*, *Nucl. Inst. & Meth. A* **515** (2003) 634.  
C.E. Aalseth *et al.*, *Physical Review D* **70** (2004) 078302.
- [86] L. Baudis *et al.*, *Physics Letters B* **407** (1997) 219.  
M. Guenther *et al.*, *Physical Review D* **55** (1997) 54.

- [87] A. Morales *et al.*, *Journal of Physics G: Nucl. Part. Phys.* **17** (1991) S211.  
 A. Morales *et al.*, *Il Nuovo Cimento* **104 A** (1991) 1581.
- [88] V. Kuzminov *et al.*, *Atomic Energy* **73** (1992) 1010.  
 V. Kuzminov *et al.*, *Inst. and Exp. Techniques* **36** (1993) 69.  
 C. Sáenz *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **35** (1994) 363.  
 C. Sáenz *et al.*, *Physical Review C* **50** (1994) 1170.  
 C. Sáenz *et al.*, *Nucl. Inst. & Meth. A* **356** (1995) 220.  
 C. Sáenz Gamasa, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Investigación experimental sobre la conversión electrón-positrón y la doble desintegración beta en  $^{78}\text{Kr}$* , julio de 1994.
- [89] <https://ptweb.desy.de/appec/Roadmap-Phase1.pdf>
- [90] S. Cebrián Guajardo, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Estudio del fondo radiactivo en experimentos subterráneos de búsqueda de sucesos poco probables: CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events) y ANAIS (Annual Modulation with NaIs)*, enero de 2002.
- [91] S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **110** (2002) 94.  
 S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **114** (2003) 111.  
 J. Morales *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **118** (2003) 525.  
 S. Cebrián *et al.*, *Nucl. Phys. B (PS)* **138** (2005) 147.  
 J. Amaré *et al.*, *Journal of Physics: Conference Series* **39** (2006) 123.
- [92] C. Pobes Aranda, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Optimización de la respuesta de un sistema multidetector de cristales de centelleo para un experimento de materia oscura (ANAIS)*, mayo de 2006.
- [93] J. Pelegrín Mosquera, Trabajo académicamente dirigido Universidad de Zaragoza, *Técnicas de discriminación en Física Nuclear y de Partículas: aplicación al experimento ANAIS*, junio de 2008.
- [94] L.C. Torres Ferrández, Tesis doctoral Universidad de Zaragoza, *Bolómetros centelleadores para búsqueda de materia oscura*, julio de 2008.
- [95] N. Coron *et al.*, *Nucl. Instr. Met. A* **520** (2004) 159.