

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA**

HACIENDO VISIBLE LO INVISIBLE

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR LA ACADÉMICA ELECTA

Ilma. Sra. D^a. MARÍA LUISA SARSA SARSA

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 18 DE SEPTIEMBRE DEL AÑO 2024*

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. MANUEL ASOREY CARBALLEIRA

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2024

Depósito legal: Z 1545-2024

Imprime:

Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza

HACIENDO VISIBLE LO INVISIBLE

POR LA

Ilma. Sra. D^a. MARÍA LUISA SARSA SARSA

Índice

Preámbulo	7
1. Introducción: para ver lo invisible hay que mirar de otra manera	11
2. La materia invisible del Universo	18
3. La detección directa de la materia oscura	22
4. Los detectores de centelleo de NaI(Tl) aplicados a la detección directa de la materia oscura	30
4.1. Estado actual y resultados recientes de los experimentos que utilizan NaI(Tl) en la detección directa de materia oscura	32
4.1.1. DAMA/LIBRA	32
4.1.2. COSINE-100	35
4.1.3. ANAIS-112	36
4.2. Comparación independiente de los modelos de WIMP y halo	41
4.3. Otros proyectos en fase de I+D	46
5. Función respuesta de los detectores de NaI(Tl) aplicados a la detección de materia oscura	47
5.1. Emisión de luz no proporcional con la energía en NaI(Tl)	48
5.2. Factores de <i>quenching</i> del centelleo para retrocesos nucleares	49
6. Retos que afrontan los detectores de centelleo basados en NaI	59
7. Resumen y conclusiones	63
Agradecimientos	64
Referencias	64

Preámbulo

Excelentísimo Sr. Presidente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza,

Ilustrísimos Srs. Académicos e ilustrísimas Sras. Académicas,

Autoridades académicas,

Señoras y señores:

Quiero iniciar mi discurso expresando mi más profundo agradecimiento a todos los miembros de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza, que a propuesta de los miembros de la sección de Ciencias Físicas, han apoyado mi ingreso en esta institución.

Es para mí un gran honor aceptar este nombramiento y el encargo que conlleva. Ser propuesta para formar parte de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza supone un enorme reconocimiento a mi trayectoria académica que exige, en contrapartida, un correspondiente compromiso con la institución, el de contribuir y aportar con todas mis capacidades a sus actividades y objetivos. Incorporarme a la Academia implica, por tanto, asumir una gran responsabilidad, que se ve acrecentada por el hecho de que voy a ser la primera académica numeraria por la sección de Físicas, acompañando a la incomparable pionera María Josefa Yzuel Giménez, académica correspondiente desde mayo de 2002.

Creo que puedo aportar a la Academia una trayectoria académica completa en todas sus facetas: me he dedicado a la docencia con vocación, a la investigación con entusiasmo y a la gestión con espíritu de servicio. Valoro el trabajo y el compromiso, no tengo miedo a aprender cosas nuevas ni a reconocer mis errores, ya que solo cuando se reconocen, se puede aprender de ellos.

Continuando con los agradecimientos, quiero también dedicar unas palabras a todos mis maestros, desde preescolar hasta el doctorado, así como a mis colaboradores y estudiantes, que me han acompañado a lo largo de estos 30 años de trayectoria en la Universidad en la aventura que es investigar. He aprendido muchísimo de todos ellos, y por eso los considero copartícipes de este reconocimiento. En particular, me gustaría mencionar a mi director de tesis, Ángel Morales, así como a los profesores Rafael Núñez-Lagos, Julio Morales y José Ángel Villar, con quienes inicié mi formación en la investigación, así como a todos los demás compañeros que han formado parte del área de Física Atómica, Mole-

cular y Nuclear. También a María Martínez, Clara Cuesta, Patricia Villar, David Cintas, Tamara Pardo y Jaime Apilluelo, que elaboraron o están elaborando sus tesis doctorales bajo mi supervisión.

La mayor parte de mi trayectoria académica e investigadora se ha desarrollado en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza, que considero como mi segunda casa. Durante mi etapa como vicedecana y profesora secretaria he podido descubrir su increíble potencial humano. Tenemos estudiantes maravillosos, un profesorado implicado y de altísimo nivel científico, y un personal técnico profesional y dedicado, tanto de laboratorio como de administración y servicios. Ha sido un entorno privilegiado en el que he podido desarrollar mi docencia e investigación. Puedo presumir en cualquier foro de ser parte de esta Facultad y Universidad.

Y como no todo debe ser trabajo, no puedo dejar de agradecer el apoyo incondicional de mis amigas. Han estado y estarán a mi lado, para disfrutar más en los momentos buenos y para que los malos no lo sean tanto. Os quiero mucho a todas. Pero por encima de todo, no tengo palabras que puedan expresar adecuadamente mi reconocimiento y agradecimiento a mi familia. Sin este apoyo no habría podido desarrollar mi trayectoria académica e investigadora. En primer lugar y, por supuesto, a Fernando, mi compañero durante toda esta larga trayectoria, en lo bueno y en lo malo. Somos mejores juntos, compartiendo logros y fracasos, compartiendo la vida. En segundo lugar a mi padre, Jesús. Le habría encantado estar hoy aquí, acompañándonos en este acto. Me enseñó a tener ganas de aprender, a amar la lectura, a ser autodidacta cuando hace falta y a tener espíritu crítico en cualquier ámbito. Por supuesto, a Jesús y Sofía, que son lo mejor y más importante que he hecho en la vida. La maternidad me ha enseñado muchas cosas y es una experiencia vital que no cambiaría por nada. Creo que puedo hablar en nombre de Fernando también en esto, no podemos estar más orgullosos de nuestros hijos. Sin embargo, su crianza y educación ha sido un trabajo en equipo: ellos son como son, maravillosos, en buena parte gracias a sus abuelos, Marisa, Encarnita y Pepe, tíos, primos y resto de la familia, que nos ofrecieron la garantía de dejarlos siempre en buenas manos, cuando la carrera de Fernando o la mía nos exigían más dedicación o viajes.

Porque este momento tiene que servir también para admitir que mi dedicación al trabajo ha robado tiempo que les correspondía a todos ellos, a mi familia y amigos. Esta es una tarea pendiente que debemos afrontar y resolver. Tenemos que aprender a compaginar la implicación en un trabajo exigente y absorbente como el asociado con una trayectoria investigadora y académica con la vida familiar y personal. De forma paralela, los científi-

cos no debemos ser sabios encerrados en torres. Es fundamental continuar desarrollando las facetas de nuestro trabajo que nos ponen en contacto con los demás: estudiantes de distintas etapas educativas, compañeros de otros campos o del nuestro, o la sociedad en general. Es bueno para todos. Debemos transmitir nuestro conocimiento y compartirlo para que otros lo puedan desarrollar y completar, pero también para que la sociedad lo sienta suyo, parte de la cultura, patrimonio de la humanidad.

A la hora de elegir el tema de mi discurso, ciertamente no tuve muchas dudas, dado que solo hay uno en el que me puedo considerar experta: la detección directa de la materia oscura del Universo con detectores de centelleo, fundamentalmente los basados en yoduro de sodio. A él he dedicado una buena parte de mis 30 años de trayectoria investigadora. Este discurso, por tanto, se dedica a revisar el estado del arte en el desarrollo de detectores de yoduro de sodio (intrínsecos y dopados con talio) para su aplicación en la detección directa de materia oscura. Sin embargo, me gustaría aprovechar la oportunidad que este discurso de ingreso me ofrece para dedicar una pequeña parte del mismo a una cuestión diferente, pero con un nexo común, poner en valor las contribuciones desarrolladas por mujeres que no siempre han gozado de una visibilidad adecuada.

Y es que sólo aquello que somos capaces de visibilizar, poner en palabras o imágenes, existe de verdad. Las cosas que no dejan huella en nuestros cerebros, es como si nunca hubieran existido, y por este motivo tenemos que recuperar historias y nombres, redescubrir un pasado que nos habían mostrado con una mirada sesgada, sin perspectiva de género, o tal vez deberíamos decir con una única perspectiva. Solo así podremos llegar a imaginar un futuro diverso e igualitario. Estoy convencida de que la Ciencia, igual que toda la sociedad en cualquiera de sus facetas, se enriquece enormemente si incorpora distintos perfiles y visiones. Espero aportar a la sección de Físicas de esta Academia mi forma de ver la realidad, pero sobre todo, intentaré representar y ayudar a visibilizar a todas las demás.

Para terminar este preámbulo a mi discurso, como es tradición, debo y quiero dedicar unas palabras a mi antecesor en la medalla que voy a recibir hoy, el profesor Rafael Navarro Linares, quien nos dejó demasiado pronto. Sin embargo, su impronta en esta Universidad, su casa desde que llegó a Zaragoza a estudiar la licenciatura en Física desde su Teruel natal en 1967, es sobresaliente. Fue un excelente alumno de licenciatura y doctorado, contando en su haber con los correspondientes premios extraordinarios. Su tesis doctoral, aunque defendida en la Universidad de Zaragoza, fue desarrollada en la Universidad de Leiden (Países Bajos) bajo la supervisión del profesor Jos de Jongh. Fue un excelente

docente, que pasó por las figuras de profesor adjunto interino en el Departamento de Física Fundamental de la Facultad de Ciencias, agregado interino en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, profesor adjunto en dicha escuela y catedrático en el Departamento de Ciencia de Materiales y Fluidos con solo 34 años. También fue un excelente investigador, con relevantes aportaciones en aspectos tanto teóricos como experimentales de las propiedades térmicas, magnéticas y eléctricas de los materiales, siendo el responsable de la consolidación de un potente grupo de investigación en materiales superconductores de alta temperatura crítica, y parte del grupo germinal de investigadores que impulsaron la creación del Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón en 1986, centro mixto entre la Universidad de Zaragoza y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Pero además, Rafael Navarro nunca estuvo al margen de las instituciones y la sociedad y siempre intentó aportar su punto de vista, con una visión crítica pero constructiva, contundente y casi siempre, difícil de rebatir. Estas aportaciones se tradujeron en el seno de la Universidad de Zaragoza en el desempeño de cargos académicos a todos los niveles, destacando que fue tanto director del Departamento de Ciencia de Materiales y Fluidos como director del Centro Politécnico Superior, así como candidato a Rector en 2008. En el año 2009 fue nombrado académico de esta Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales y hasta su fallecimiento en 2020 tuvo en sus manos la medalla n° 40.

Escribir estas líneas me ha permitido encontrar aquellos aspectos en los que creo que puedo continuar su labor como académico. Creo que comparto con él la puesta en valor de la cultura del trabajo, el respeto a las obligaciones y compromisos adquiridos, la visión crítica de lo establecido aunque siempre desde la propuesta de alternativas y soluciones, así como la aplicación de la lógica y el diálogo en cualquier discusión.

Y ahora sí, podemos pasar ya a hablar de materia oscura y de detectores de partículas, pero también, por supuesto, de las personas que investigan en estos temas. Pero antes, quiero compartir con vosotros las cuatro *Golden Lessons* de S. Weinberg [Wei2003], que deberían ser lectura obligatoria al inicio de cualquier carrera científica. Estos consejos son la mejor carta de presentación tanto para mi trayectoria personal en la carrera investigadora y académica, como para mi discurso. Citando a J.L. Feng [Fen2023], estos consejos se resumen en:

- *No one knows everything, and you don't have to.*
- *Go for the messes - that's where the action is.*
- *Forgive yourself for wasting time [working on the wrong questions].*
- *Learn something about the history of your own branch of science.*

1. Introducción: para ver lo invisible hay que mirar de otra manera

El objetivo de la Física es comprender el Universo que nos rodea, tanto los objetos que se observan a las distancias más lejanas, como los constituyentes elementales de la materia y las leyes que gobiernan su agregación en las diferentes escalas. En el camino de avanzar en dicha comprensión se van elaborando teorías y modelos que deben ser continuamente puestos a prueba por la observación y la experimentación. Cuando las observaciones o los resultados de los experimentos no encajan en el marco teórico establecido podemos estar a las puertas de un nuevo gran descubrimiento. Estos momentos próximos a un cambio de paradigma son increíblemente excitantes porque nos conducen a territorios inexplorados, que muchas veces estamos incluso lejos de imaginar. El trabajo en la vanguardia de la Ciencia es apasionante y requiere una formación sólida en las teorías vigentes, pero libre de prejuicios y abierta a nuevas soluciones, a la exploración de vías diferentes.

Desde hace casi 100 años hemos ido acumulando evidencias observacionales que nos muestran que no podemos explicar el Universo con las teorías actuales y las formas de materia que conocemos. Si optamos por mantener el marco teórico vigente para la Dinámica y la Gravitación, se requiere introducir en el Universo unas misteriosas *energía y materia oscuras*¹, cuya investigación sigue siendo todo un reto en la frontera entre la Física de Partículas, la Astrofísica y la Cosmología.

El proceso por el que hemos aprendido a descubrir las leyes físicas, el método científico, tiene como primer paso la observación de los fenómenos naturales. Ya de entrada, por tanto, es preciso remarcar un sesgo fundamental que ha tenido durante siglos nuestro conocimiento del Universo, y es que observar es sinónimo de ver, y etimológicamente deriva de mirar con atención. El Universo que vemos con nuestros ojos es una parte muy pequeña del Universo que hay ahí afuera, sólo la que emite luz en el rango de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nanómetros. Hemos tenido que aprender a construir instrumentos mucho más sensibles que nuestro ojo. En primer lugar, para ver más lejos y poder ver objetos que emiten muy poca luz. Después, hemos aprendido a ver en otras longitudes de onda, utilizando desde las largas ondas de radio hasta las cortas ondas gamma, pasando por las microondas, el infrarrojo, el ultravioleta y los rayos X. Así hoy en día, podemos ver el Universo en todos sus *colores*, observándolo a través de todo el espectro de la radiación electromagnética.

¹ Aunque en lugar de materia oscura se debería denominar materia invisible o transparente, ya que no emite pero tampoco absorbe radiación electromagnética.

Pero ¿por qué limitarnos a observar la realidad haciendo uso de solo una de las interacciones fundamentales? Tenemos que aprender a observar de otras formas y construir representaciones de la realidad basadas en otras interacciones. Solo así podremos estar seguros de que los modelos y teorías que construimos explican de forma coherente y completa todas las facetas de los sistemas observados. Todas las imágenes o representaciones que hagamos de un mismo sistema tienen que encajar adecuadamente, como las piezas de un puzzle, si es bueno el modelo de dicho sistema. Si las piezas no encajan adecuadamente será un indicio de que algo falla en el modelo.

Por ejemplo, apliquémoslo al Sol. Tenemos a nuestra disposición fotos de alta resolución en el visible y UV obtenidas con las cámaras CCD instaladas en el *Solar Dynamics Observatory*, SDO², que desde 2010 monitoriza la actividad solar. Estas fotos nos muestran la fotosfera y la corona del Sol, de donde salen los fotones que recibimos en la Tierra. Pero el Sol emite muchas otras partículas además de los fotones. Algunas las vemos indirectamente, por ejemplo en las auroras: partículas cargadas muy energéticas que se cuelean en la atmósfera en las regiones de altas latitudes, siguiendo las líneas del campo magnético terrestre. Estas partículas se hacen visibles al interactuar con los átomos de la atmósfera generando fluorescencia. Otras partículas, como los neutrinos, son más difíciles de detectar ya que solo interactúan débilmente y atraviesan la Tierra prácticamente como si fuera transparente. Diseñar detectores (podríamos llamarlos también telescopios) de neutrinos ha sido un reto impresionante, que nos ha permitido detectar la emisión solar de neutrinos. El desarrollo de la astronomía de neutrinos nos está abriendo una nueva ventana al Universo. La foto del Sol tomada con neutrinos³ nos muestra el núcleo del Sol, donde tienen lugar las reacciones de fusión nuclear. Los neutrinos abandonan el Sol inmediatamente tras su producción y en apenas 8 minutos llegan a la Tierra, para seguir su camino hacia las profundidades del Universo. El resto de la energía producida en la fusión nuclear, sin embargo, inicia un lento proceso de termalización en el interior del Sol, hasta alcanzar las capas más externas, como la fotosfera, desde la que ya puede ser emitida al espacio en forma de fotones y otras partículas cargadas, el *viento solar*. Pero volviendo a nuestro estudio del Sol, también podemos obtener información del Sol midiendo las velocidades de rotación de los planetas en sus órbitas. Estas velocidades están determinadas por la fuerza de atracción gravitatoria del Sol, y permiten, por tanto,

² Se puede observar el Sol casi en tiempo real en: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>.

³ Se puede visualizar como *Astronomy Picture of the Day June 5, 1998* en <https://apod.nasa.gov/apod/ap980605.html>.

determinar su masa, es decir, pesar el Sol. De este modo, tenemos en nuestro haber tres fotos diferentes del Sol que debemos combinar en una sola. Tenemos una imagen electromagnética del Sol, una imagen nuclear y una imagen gravitatoria. Las tres encajan perfectamente en el marco del modelo solar vigente. Aunque el Sol fuera invisible porque no emitiera ni neutrinos, ni fotones, ni otras partículas, solo el hecho de observar a los planetas girar alrededor de un punto aparentemente vacío del Sistema Solar nos indicaría que en ese punto hay una masa invisible, cuyo valor podríamos calcular con las leyes de la dinámica y la gravitación. Hemos aprendido, por tanto, a ver el Universo con los ojos de la interacción gravitatoria, y evitar así el sesgo de creer que solo existe lo que nuestros ojos (o nuestros telescopios) ven.

Cuando se observan las galaxias espirales, los cúmulos de galaxias, o incluso el conjunto del Universo en escalas cosmológicas, las fotos electromagnética y gravitatoria no encajan: hace falta un contenido en materia mucho mayor al observado para explicar su dinámica. Este hecho lo podemos describir como un rompecabezas para el que hay dos posibles soluciones: o nuestro marco teórico es inadecuado para explicar la realidad porque la teoría que describe la gravitación y/o la dinámica es incompleta, o bien existe en el Universo una gran cantidad de materia invisible, puesta en evidencia por sus efectos gravitatorios. Esta materia no solo debe ser invisible, sino de naturaleza desconocida hasta la fecha. No puede tener carácter bariónico (es decir, consistir de protones y neutrones como la materia que conocemos) porque en ese caso no podríamos explicar ni las abundancias observadas para los núcleos ligeros en el marco de los cálculos de la nucleosíntesis primordial⁴ ni las oscilaciones acústicas observadas tanto en las anisotropías de la radiación cósmica de fondo de microondas como en la distribución de galaxias a gran escala. Además, esta materia invisible debe interactuar muy débilmente tanto con la materia normal, como con ella misma, para poder explicar las observaciones de la diferente distribución de materia y gas caliente en cúmulos de galaxias en colisión, como el *Bullet Cluster*⁵. El modelo estándar de la Física de Partículas no ofrece candidatos con las características adecuadas para explicar todas estas observaciones del Universo, que proceden de ámbitos muy diferentes.

⁴ El proceso de formación de los núcleos ligeros en los tres primeros minutos de existencia del Universo tras el Big Bang.

⁵ La imagen del *Bullet Cluster* disponible en https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2007/07/The_Bullet_Cluster2 combina información óptica del telescopio Hubble, de emisión de rayos x de Chandra y de la distribución de masas analizada por efecto de lente gravitatoria.

Se requiere, por tanto, buscar un nuevo tipo de partícula, fuera del modelo estándar, si queremos resolver el problema de la materia oscura. Revisaremos con más detalle los diferentes argumentos aquí presentados en la Sección 2.

Del mismo modo que hemos aprendido a mirar el Universo evitando sesgos, debemos aprender a identificarlos en nuestro trabajo y en nuestro entorno. A diferencia de lo que sucede en otros campos, como puede ser la Medicina, es fácil estar de acuerdo en que la Física es neutra en género y que, ni sus resultados, ni sus planteamientos, ni sus ecuaciones, ni sus experimentos requieren introducir la perspectiva de género en su análisis o diseño. Sin embargo, no podemos dejar de notar que sigue habiendo una brecha de género importante en *quiénes* se dedican a la Física en todos los países y que no parecen estar funcionando muchas de las estrategias diseñadas por instituciones, sociedades científicas, agencias de financiación, etc. para impulsar una reducción de dicha brecha. No creo poder aportar argumentos novedosos o soluciones. No pretendo tener una respuesta, pero quiero que estas líneas recojan mi visión de esta cuestión, como parte de un colectivo minoritario, que ve con preocupación el futuro de una rama de la Ciencia que no es capaz de atraer por igual a hombres y mujeres, y por lo tanto, no va a ser capaz de incorporar la riqueza y variedad de formas de pensar, representar y entender la realidad que la Física, como cualquier actividad humana, necesita.

En primer lugar, me gustaría comentar el papel de los referentes y la visibilización de las mujeres en Ciencia, en general, y en Física, en particular. Es este un tema fundamental porque, como ya se ha comentado antes, lo que no se ve es como si no existiera. Durante demasiado tiempo han estado escondidas las historias humanas de figuras, no solo femeninas sino también de otros colectivos, cuyas contribuciones a la Ciencia quedaron diluidas y no fueron puestas en valor. Creo que es nuestra obligación recuperar y poner en su sitio las contribuciones no reconocidas de todos aquellos a los que su época no hizo justicia, pero sobre todo, tenemos que contar las historias que las acompañan. No me parece tan importante discutir si las contribuciones fueron de mayor o de menor relevancia en la historia de la Ciencia, me parece imprescindible mostrar esas historias vitales y las circunstancias en las que se desarrollaron, en muchos casos en un contexto de oposición sistemática de la sociedad. Creo que este camino todavía debe ser recorrido si queremos evitar perpetuar patrones similares y volver a caer en los mismos errores.

Durante la primera mitad del siglo XX, y por supuesto en épocas anteriores, la cantidad de niñas que pudieron desarrollar estudios elementales en el mundo occidental fue muy inferior a la de niños. No digamos fuera del mundo occidental, donde todavía las

niñas tienen problemas para acceder al sistema educativo en la actualidad. Muchas mentes brillantes se han perdido por el camino por carecer de medios que les garantizaran el acceso a una formación adecuada, es cierto, pero sin duda se han perdido muchas más de niñas que de niños. Solo pudieron estudiar aquellas niñas y mujeres que contaron con un entorno familiar que apoyara fuertemente su vocación. Las pocas mujeres que a comienzos del siglo XX lograron estudiar Física en una Universidad, contaban con un apoyo familiar importante y medios económicos. En muchos casos formaron una familia con otro científico, quien no siempre entendió que su mujer siguiera con la actividad científica. Muchas de ellas solo consiguieron trabajar en puestos secundarios en los laboratorios o Universidades en los que estaban contratados sus maridos, y en muchas ocasiones sin recibir contraprestación económica por su trabajo. Algunas, con los años, llegaron a lo más alto, pero no nos dejemos engañar por el síndrome del superviviente. Figuras como Marie Curie⁶ o Maria Goeppert-Mayer⁷ son la prueba de que solo aquellas mujeres que tuvieron el apoyo incondicional de su pareja y su familia y nunca desistieron pese a los obstáculos que encontraron en su camino, lograron el éxito. Ellas fueron merecedoras de los dos únicos premios Nobel en Física concedidos a mujeres en todo el siglo XX, en 1903 y 1963. Los siguientes no llegarían hasta 2018, 2020 y 2023. Parece que las cosas están cambiando.

Para la mayoría de las mujeres, sin embargo, incluso aquellas que lograron finalizar sus estudios, la trayectoria profesional terminaba en el momento de querer formar una familia. Muchas optaron voluntariamente por abandonar la carrera científica, como Rosemary

⁶ [Marie Skłodowska Curie](#) (Polonia 1867 - Francia 1934). Primera mujer en obtener un premio Nobel (en 1903, compartido con su marido P. Curie y con H. Becquerel), la primera persona en ganar dos veces un premio Nobel (en 1903 y 1911) y la única persona que ha ganado dos premios Nobel en dos disciplinas científicas (Física y Química). Sus trabajos pioneros en radiactividad la llevaron a descubrir nuevos elementos como el polonio y el radio, pero también trabajó en el desarrollo de aplicaciones como el diseño de equipos portátiles para la realización de radiografías o el uso de isótopos radiactivos en tratamientos médicos. Una de sus hijas, [Irène Joliot-Curie](#) (Francia 1897 - 1956), también siguió la carrera científica en la Física con éxito. Recibió el premio Nobel en Química, compartido con su marido Frédéric Joliot, en 1935, por el descubrimiento de la radiactividad inducida. La familia Curie es la que acumula más galardones Nobel. Hay otras 6 parejas padre-hijo con premios Nobel ambos y 4 corresponden a parejas de premios Nobel en Física: William y Lawrence Bragg, Niels y Aage Bohr, Manne y Kai Siegbahn, y Joseph John y George Page Thomson. Parece que la Física es cosa de familia.

⁷ [María Goeppert-Mayer](#) (Alemania 1906 - Estados Unidos 1972). Sus trabajos en Física Nuclear desarrollando el modelo de capas merecieron el premio Nobel en Física en 1963. Hasta 1960 solo había podido trabajar en laboratorios y universidades en puestos no remunerados o como asistente, acompañando en sus destinos a su marido, el químico Joseph Edward Mayer.

Brown-Fowler⁸. Aquellas que intentaron continuar trabajando lo hicieron renunciando a visibilizar sus logros, y dejando que otros los rentabilizaran. No eran consideradas como *profesionales* de la Ciencia, trabajaban como si fuera un *hobby*, una distracción, ayudando a sus maridos, padres o hermanos. Estas situaciones se consideraban como algo normal, aceptadas por todas las partes, probablemente incluso considerando que era lo mejor para mantener alejadas a las mujeres de entornos competitivos o peligrosos. No es necesario buscar culpables, pero hay víctimas y les debemos, al menos, revisar la historia con otra perspectiva y poner las cosas un poco más en su sitio.

En la segunda mitad del siglo XX las mujeres pudieron acceder a la educación, incluso universitaria, y aunque no en igualdad de condiciones, al mercado laboral. Los movimientos feministas reclamaron políticas de igualdad y parecía que solo era cuestión de tiempo alcanzarla. Sin embargo, los techos de cristal es lo que tienen: son difíciles de ver, como la materia oscura, y eso hace posible que muchos nieguen su existencia. Lo que es una barrera insuperable para muchas no parece siquiera un pequeño escalón para colegas o jefes. Hay que aprender a hacer visibles los obstáculos, para así poder luchar contra ellos entre todos.

Porque educar en igualdad es mucho más difícil de lo que habitualmente se piensa. Es necesario avanzar con perspectiva de género en la comprensión de cómo se forma la personalidad y cómo nuestro cerebro responde a los estímulos externos, así como en la influencia del entorno en la toma de decisiones. Mi experiencia de ya veinticinco años con estudiantes de primer curso de licenciatura y grado, en una asignatura básica y general de Física, me sigue mostrando en el día a día ejemplos de distintas situaciones en las que el género afecta al desarrollo académico. De muchos de los sesgos que observo somos culpables y víctimas al mismo tiempo nosotras, las mujeres, sin ser siempre conscientes de ello. Pero no me hace falta hablar de mis estudiantes. Yo misma soy un buen ejemplo: fui una muy buena estudiante, con una media de 9.75 en la licenciatura. Sin embargo, nunca salí voluntariamente a la pizarra a resolver un problema, ni respondía a los profesores cuando hacían preguntas en clase. Nunca estaba totalmente segura de tener la respuesta adecuada y me bloqueaba hablar en público. No puedo asegurar lo que pensaban los

⁸ [Rosemary Brown-Fowler](#) (Reino Unido 1926 -). Trabajó en el grupo de Cecil Powell en la Universidad de Bristol en el estudio de trazas de partículas en emulsiones fotográficas expuestas a los rayos cósmicos como parte de su tesis doctoral. Su contribución fue importante en el descubrimiento de los kaones, sin embargo no llegó a defender su tesis. Se dedicó a su marido, físico de partículas en el mismo grupo, y sus tres hijas. Se puede leer su historia en [[She2024](#)]. Las emulsiones fotográficas con las que trabajó Rosemary habían sido inventadas por [Marietta Blau](#) (Austria 1894 - Austria 1970), quien las aplicó por primera vez también en el estudio de las trazas de partículas. Marietta desarrolló una larga trayectoria investigadora en Austria, México y Estados Unidos.

demás, mis profesores o mis compañeros de promoción, pero yo estaba convencida de que mi capacidad de trabajo y estudio eran responsables de mis calificaciones, no mi inteligencia. Veía a muchos otros de mis compañeros más inteligentes y brillantes que yo, aunque menos constantes y trabajadores. Es fácil dejarse impresionar por quien parece que sabe, porque cree saber, y habla con dominio y soltura. He necesitado muchos años para convencerme de que tal vez yo no era más lista que mis brillantes compañeros (muchos de ellos lo eran, sin duda), pero ninguno de ellos tampoco era más válido para la Física que yo. La seguridad en uno mismo y la puesta en valor del trabajo y la capacidad deben ser objetivos en la formación que damos a nuestros niños y jóvenes, con independencia de sexo o género, y creo que para conseguir este objetivo todavía queda mucho trabajo pendiente y todos debemos colaborar. Es imprescindible aprender a valorar y evaluar de formas variadas y complementarias el trabajo de los estudiantes, retroalimentar y dar confianza, enseñar a aprender y no solo valorar al que es capaz de aprender solo. La Física es difícil y se enseña en muchas ocasiones de modo que todavía parezca serlo más, muchas veces con el objetivo de seleccionar solo a unos pocos elegidos, los excelentes. Así se genera un sesgo de a quién se atrae y a quién se repele de estos estudios. No hay que forzar a nadie a estudiar lo que no le gusta, pero ¿estamos seguros de que no hemos estado repeliendo a muchas mujeres de los estudios de Física durante décadas?

En mi trabajo intento visibilizar unas partículas de naturaleza desconocida, que interaccionan muy débilmente con la materia convencional (Sección 2), desarrollando para ello detectores con prestaciones avanzadas (Sección 3). Los detectores de yoduro de sodio con los que trabajo convierten la energía depositada por las partículas en pequeños destellos de luz (Sección 4). La conversión en luz de las interacciones de la materia oscura en nuestros detectores es una imagen simbólicamente potente. De forma similar, a lo largo de este trabajo, voy a intentar visibilizar las contribuciones de mujeres científicas en mi campo de trabajo, como ya he empezado a hacer en esta sección: en forma de pequeñas notas biográficas a pie de página, seleccionando detalles concretos de su vida o su contribución a la Ciencia. Intentaré mostrar que incluso siendo menos, lideramos esfuerzos experimentales importantes. Como se verá, los experimentos de detección directa de materia oscura con centelleadores de yoduro de sodio están en su mayoría liderados por mujeres.

2. La materia invisible del Universo

Durante casi un siglo se han ido acumulando evidencias observacionales que indican que el Universo tiene una componente dominante en su contenido en materia que es invisible, a la que se ha denominado *materia oscura* [Ber2018]. Esta materia no se puede observar de forma directa en ninguna de las imágenes que tomamos del Universo con todo tipo de instrumentos sensibles a la radiación electromagnética. Sin embargo, resulta imprescindible para explicar la dinámica de las estrellas y nubes de gas y polvo en las galaxias espirales⁹ [Rub1970, Rub1980, Rub2001] y de las galaxias dentro de los cúmulos de galaxias [Zwi1933], el efecto de lente gravitatoria que *deforma* las imágenes de las galaxias que tienen algún gran cúmulo interpuesto, las anisotropías en la radiación cósmica de fondo de microondas [Pla2020] y su evolución hacia la distribución actualmente observada de galaxias y cúmulos de galaxias, la denominada estructura del Universo a gran escala [Ala2021, Abb2022].

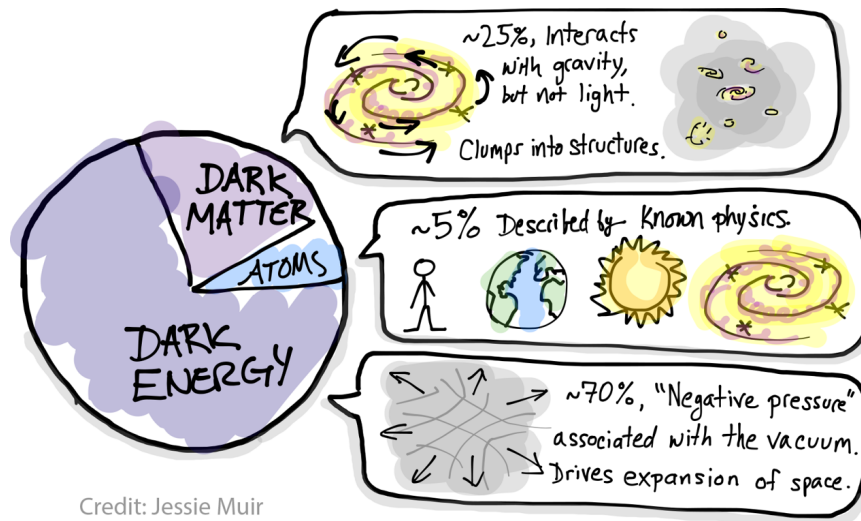
Además, desde hace 25 años se acumulan evidencias de que el Universo experimenta una aceleración en su ritmo de expansión que requiere la introducción de un nuevo tipo de energía, cuyo origen es desconocido, y se ha denominado *energía oscura*. Es todavía poco lo que se puede decir en la actualidad sobre su naturaleza. Podría ser una energía asociada al espacio-tiempo, en la línea de la propuesta de la constante cosmológica que hizo Albert Einstein en su momento, o bien estar causada por un campo cuántico en un estado de falso vacío que inyecta energía en el Universo con un cierto patrón temporal a lo largo de su evolución.

El modelo cosmológico estándar (Λ CDM) explica las observaciones del Universo en las diferentes escalas espacio-temporales en el marco de las teorías vigentes [Wor2022]. Está basado en el principio cosmológico (la suposición de que el Universo es homogéneo e isótropo) y se enmarca en la teoría de la relatividad general. Es un modelo enormemente exitoso, que sin embargo requiere que el 95 % de la materia-energía del Universo se encuentre en formas desconocidas: un 68 % de energía oscura (Λ) y un 27 % de materia oscura fría (CDM). Sólo el 5 % del Universo consistiría en materia bariónica, la que podríamos

⁹ Vera Cooper Rubin (Estados Unidos 1928 - 2016). Sus estudios sobre las curvas de rotación de las galaxias espirales fueron pioneros para establecer la existencia de la materia oscura. Intentó hacer su tesis doctoral en Princeton, pero no aceptaban mujeres en su programa de posgrado en Astronomía, ni entonces, ni hasta 1975 (27 años después de que Vera lo intentara). Obtuvo un máster en Astronomía en Cornell en 1951 e inició su tesis en Georgetown, ya casada con Robert Joshua Rubin, siendo ya padres de un niño y estando Vera embarazada de nuevo. Logró compaginar la vida familiar y una trayectoria académica en la que tuvo que afrontar en muchas ocasiones actitudes sexistas.

denominar *materia convencional*. Sin embargo, hay que tener presente que ninguna teoría es definitiva y nuestro análisis de los datos recabados debe ponerla continuamente a prueba. Nuevas teorías o marcos teóricos tal vez puedan explicar las observaciones del Universo sin requerir materia o energía oscura, pero por el momento, aunque se trabaja de forma intensa en su desarrollo, no se han encontrado.

Uno de los grandes pilares del modelo cosmológico Λ CDM es su capacidad para explicar observaciones tan variadas, basadas en técnicas de observación muy diferentes, y correspondientes a escalas espacio-temporales de la evolución del Universo tan dispares. Así, por ejemplo, los grandes cartografiados de galaxias no solo nos indican la posición de las galaxias en la esfera celeste, sino que la medida de su desplazamiento al rojo nos aporta información temporal al proporcionarnos una estimación de su distancia y, por tanto, nos informa de la evolución de la expansión del Universo. A partir de la distribución de las separaciones entre pares de galaxias se han podido medir las oscilaciones acústicas de bariones [Eis2005, Col2005]: una escala *preferida* de la distancia entre galaxias que se corresponde con la observada en las anisotropías del fondo cósmico de microondas. Los fotones estuvieron fuertemente acoplados a los bariones en el Universo primitivo y, por tanto, propagaron las fluctuaciones primordiales de densidad del Universo, probablemente iniciadas en su etapa inflacionaria. 380 000 años tras el Big Bang los fotones se desacoplaron de los bariones porque el Universo dejó de ser un plasma, y esas fluctuaciones, en forma de anisotropías en la temperatura de los fotones, quedaron *congeladas*, y se observan en la actualidad en la radiación cósmica de fondo de microondas, desplazadas al rojo, a causa de la expansión del Universo. En paralelo, la evolución gravitatoria de dichas fluctuaciones solo puede producir las estructuras que observamos en la actualidad si se introduce en el Universo una cantidad precisa de materia diferente, desacoplada de bariones y fotones: la materia oscura. De forma totalmente independiente, los cálculos de la nucleosíntesis primordial predicen las abundancias de los núcleos ligeros que se formaron en los tres primeros minutos tras el Big Bang en función del contenido bariónico del Universo. Para reproducir las abundancias observadas para dichos núcleos se requiere un bajo contenido bariónico, compatible con el necesario para explicar las anisotropías en la radiación cósmica de fondo de microondas y totalmente insuficiente para explicar la materia oscura. Todo encaja si aceptamos que el 95 % del Universo tiene naturaleza desconocida, con un reparto entre componentes como el que muestra la Figura 1.



Credit: Jessie Muir

Figura 1: Reparto del presupuesto energético del Universo entre las diferentes componentes en el modelo cosmológico estándar. Crédito: Jessie Muir, <https://www.jessiemuir.com/2019-09-02-piechart/>. Jessie Muir es investigadora postdoctoral en el Perimeter Institute en Canadá. Forma parte de la colaboración *Dark Energy Survey*, DES, y utiliza las observaciones cosmológicas para acotar modelos físicos. Colabora en numerosas iniciativas para la divulgación de la Ciencia.

Este trabajo se centra en las investigaciones llevadas a cabo para intentar detectar la materia oscura de nuestra galaxia de forma directa que se iniciaron en la década de los 80 del siglo pasado. Avanzar en la comprensión de la energía oscura es el objetivo de numerosos esfuerzos observacionales que se están desarrollando en paralelo en la actualidad. Descubrir la naturaleza de ambas, la materia y la energía oscuras, se encuentra entre los mayores retos que afronta la Física actual, en la frontera entre la Cosmología, la Astrofísica y la Física de Partículas.

La materia oscura no puede ser explicada con ninguna de las partículas que constituyen el modelo estándar de la Física de Partículas. Ninguna de ellas, ni sus posibles estados agregados, tiene las características adecuadas para reproducir las observaciones del Universo. Hacen falta partículas que sean masivas y que se hayan podido producir en el Universo primitivo en cantidad suficiente para dominarlo gravitatoriamente, estables en escalas de tiempos del orden de la edad del Universo, que interaccionen muy débilmente entre sí y con la materia convencional, y finalmente, que no fueran relativistas cuando se empezaron a formar las estructuras en el Universo primitivo¹⁰. Hace falta proponer nuevas partículas elementales en el marco de nuevas teorías, extensiones del modelo estándar, que lo engloben y completen. A fecha de hoy, sin embargo, el modelo estándar de la Física de Partículas sigue siendo validado por los datos que proporcionan los grandes

¹⁰ De ahí el nombre de materia oscura fría (CDM).

aceleradores de partículas, aunque hay convincentes indicios que apuntan hacia la necesidad de su ampliación. En el contexto de estas extensiones del modelo estándar surgen distintas categorías de partículas hipotéticas, muchas de las cuales son buenas candidatas a constituir la materia oscura. Aquí debo mencionar, para evitar sesgos, que como física de partículas, me dedico al estudio de partículas elementales que pueden explicar la materia oscura, pero existen también otros candidatos diferentes que, aunque con ciertas limitaciones, todavía podrían ser una parte importante de la solución al problema de la materia oscura, como los agujeros negros primordiales, cuya formación previa a la nucleosíntesis, evita los límites que esta supone.

La Figura 2 muestra las categorías de candidatos viables más relevantes para explicar la materia oscura, que cubren un rango de masas entre 10^{-21} eV y 10^{15} eV, y si consideramos también agregados de partículas podemos llegar a 50 órdenes de magnitud. Por otro lado, en cuanto a sus posibles secciones eficaces de interacción, también abarcan muchos órdenes de magnitud. Esta plétora de candidatos con propiedades tan variadas dificulta afrontar la detección de la materia oscura con una estrategia unificada. Hay que adaptar la detección al tipo de candidato investigado. Como ya he comentado, en este trabajo me centraré en los candidatos *particle-like*. Entre ellos se encuentran algunos de los mejores candidatos para explicar la materia oscura: los axiones y partículas similares al axión (*axion-like particles*, ALPs) [Ira2022] y las partículas masivas que interactúan débilmente, WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) [Fen2023]. Ambas familias de partículas son buenas candidatas a la materia oscura porque se han podido producir en el Universo primitivo en las cantidades adecuadas, son estables y poco interactuantes con el resto de partículas, y pueden seguir dominando la dinámica de las galaxias y los cúmulos de galaxias en la actualidad, habiendo dejado también su huella en las oscilaciones acústicas que se observan tanto en la radiación cósmica del fondo de microondas como en la distribución de galaxias a gran escala.

Descubrir la partícula responsable de la materia oscura o simplemente desvelar más detalles de su naturaleza es una tarea compleja que requiere combinar estrategias variadas y complementarias: las búsquedas de nuevas partículas y nueva física en los grandes aceleradores de partículas [Buc2017], la detección indirecta de la materia oscura a través de los productos de su aniquilación [Con2017], y su detección directa, identificando los depósitos energéticos que pudiera producir en su interacción con un detector adecuado [Liu2017, Sch2019, Bil2021]. A pesar del gran esfuerzo experimental y la impresionante

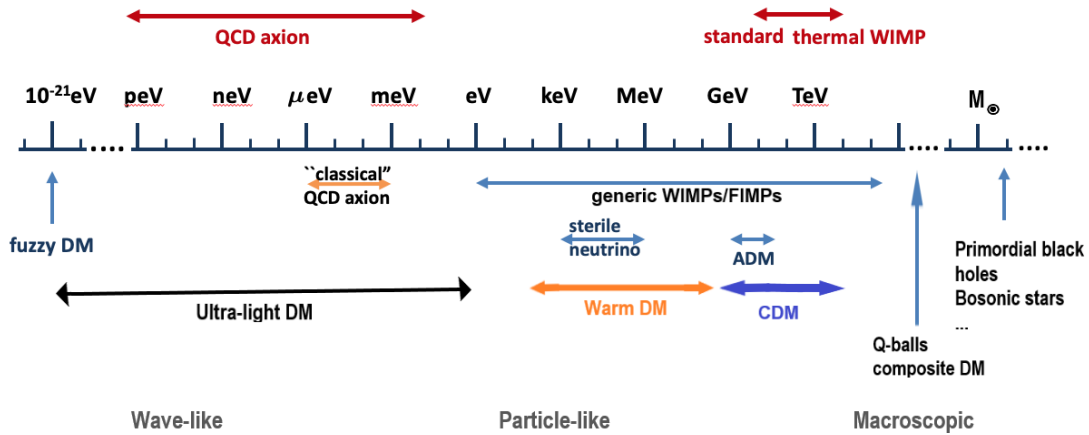


Figura 2: Rangos típicos de las masas de diferentes categorías de candidatos a materia oscura. La figura no pretende ser exhaustiva. Figura adaptada de [Bil2021].

mejora en sensibilidad que se ha conseguido durante las últimas décadas, ninguna de estas estrategias ha logrado progresar en este objetivo, aunque muchos candidatos propuestos para explicar la materia oscura del Universo han podido ser descartados por el camino.

Este trabajo se centra en la detección directa de las partículas de materia oscura, tratando de medir la energía que estas partículas transfieren a los átomos de un detector adecuado, capaz de convertir dicha energía en una señal visible. La interacción de estas partículas es muy poco probable y la energía que pueden depositar en los detectores es pequeña. Además, esta interacción depende de las propiedades de la partícula (masa y/o tipo de acoplamiento con la materia convencional) y de su distribución dentro de nuestra galaxia (tanto de la densidad de materia oscura en las proximidades del Sistema Solar como de la distribución de velocidades de las partículas que la componen), que o bien son desconocidas, o están fuertemente afectadas por grandes incertidumbres. En la Sección 3 vamos a analizar en mayor detalle la forma de afrontar esta detección directa de la materia oscura, focalizando el interés en una de las categorías de partículas candidatas, los WIMPs.

3. La detección directa de la materia oscura

Las partículas de materia oscura tienen que ser masivas e interactuar gravitatoriamente, pero adicionalmente, otros acoplamientos de tipo débil con la materia convencional les están permitidos. Este hecho resulta fundamental para establecer procedimientos para

su detección directa en el laboratorio, que deben apoyarse necesariamente en la naturaleza de estos otros mecanismos de interacción no gravitatoria. Entre las partículas preferidas como candidatos a materia oscura destacan los axiones y los WIMPs, ya introducidos en la Sección 2.

Así, por ejemplo, los axiones interactúan electromagnéticamente, aunque su acoplamiento con la materia convencional es extremadamente débil. Existen diferentes modelos de axión, con masas que aun siendo muy pequeñas, cubren muchos órdenes de magnitud. El axión fue propuesto [Pec1977]¹¹ como una forma sencilla de resolver el denominado problema fuerte de CP: se observa experimentalmente la conservación de la simetría carga-paridad (CP) en la interacción fuerte mientras que la correspondiente teoría, la cromodinámica cuántica, permite su violación. Los axiones tienen una fenomenología muy interesante, con importante repercusión en distintas cuestiones astrofísicas y cosmológicas. En caso de probarse su existencia, tanto los axiones como las partículas similares al axión (ALPs), cumplirían con todos los requisitos asociados a la materia oscura. Su acoplo con la materia es tan pequeño que no se generaron térmicamente en el Universo primitivo, pero sí pudieron ser producidos mediante otros mecanismos en cantidades suficientes como para explicar la cantidad de materia oscura observada, y pese a su pequeña masa, nunca fueron relativistas, por lo que se comportan como CDM. Hay en curso importantes esfuerzos experimentales con el objetivo de detectar estas partículas, axiones y ALPS, de origen tanto solar como cosmológico, con técnicas muy variadas [Jae2010, Ira2018].

En este trabajo, sin embargo, me centraré en la detección directa de WIMPs, que han sido durante mucho tiempo los candidatos mejor posicionados para explicar la materia oscura. No hay una definición clara de WIMP [Fen2023], en esta categoría se engloban muchos tipos de partículas que comparten tener el acoplo débil del modelo estándar y un rango de masas comprendido entre ≈ 10 GeV y 10 TeV. El éxito de las partículas de tipo WIMP como candidatas a CDM se explica por la coincidencia de tres importantes e independientes razones, coincidencia que ha sido denominada *WIMP-miracle*. En primer lugar, en las teorías propuestas para ir más allá del modelo estándar aparecen de forma natural partículas con estas características, por ejemplo en las teorías supersimétricas. En segundo lugar, desde el punto de vista cosmológico resulta sencillo producir térmicamente

¹¹ [Helen Rhoda Arnold Quinn](#) (Australia 1943 -). Sus contribuciones en Física Teórica son de gran relevancia, en particular, la teoría Peccei-Quinn que propone la existencia del axión. Además, ha desempeñado un gran papel como presidenta del panel para educación de la Ciencia (*Board on Science Education*) de la National Academy of Sciences, siendo responsable de muchos estudios oficiales sobre temática educativa. Presidió en 2004 la *American Physical Society*, siendo la cuarta mujer en ocupar el cargo en los 102 años de trayectoria que tenía entonces la institución.

este tipo de partículas en el Universo primitivo, y lo que es más importante, para masas en este rango (10 GeV-10 TeV) y las secciones eficaces correspondientes a la interacción débil se obtiene una densidad residual de estas partículas tras su desacoplo térmico del resto de contenidos del Universo (*freeze out*) que coincide con la requerida para explicar la dinámica de los cúmulos, las anisotropías en la radiación cósmica de fondo de microondas y la formación de estructuras en el Universo. Por último, pero no menos importante, desde el punto de vista experimental, su acoplo débil con la materia posibilita su detección, tanto de forma directa como indirecta, así como su producción en aceleradores (ver Figura 3). Aunque amplias regiones del espacio paramétrico (m, σ) de los WIMPs han sido excluidas hasta la fecha, siguen siendo viables otras, que además son accesibles en un futuro próximo para la siguiente generación de experimentos. Por todos estos motivos, los WIMPs siguen siendo candidatos a materia oscura a tener en cuenta.

Recientemente, nuevos desarrollos y propuestas de novedosas técnicas de detección posibilitan el estudio de candidatos más ligeros que los WIMPs, por debajo del GeV. Los FIPs, *Feebly-Interacting Particles*, son partículas con masas inferiores a 10 GeV y acoplamiento con la materia convencional mucho menores que los de los WIMPs, que cumplen con todos los requisitos ya mencionados y resultan por tanto también excelentes candidatos para explicar la materia oscura [Ant2023].

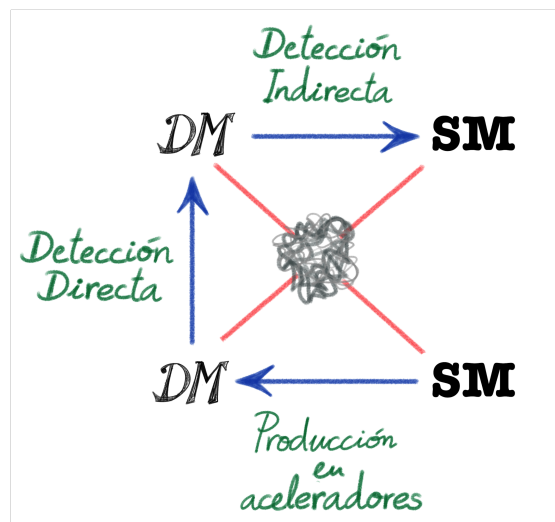


Figura 3: Diagrama representativo de cómo si existe un acoplo genérico entre las partículas de materia oscura (DM) y las partículas del modelo estándar (SM) podemos afrontar la detección de la materia oscura de distintas formas: leyendo el diagrama de Feynman de izquierda a derecha esperamos que tenga lugar la aniquilación de las partículas de materia oscura y la producción de partículas del modelo estándar (Detección Indirecta); leyendo el diagrama de abajo hacia arriba, pueden interactuar una partícula de materia oscura y una partícula del modelo estándar intercambiando energía y momento (Detección Directa); leyendo el diagrama de derecha a izquierda se pueden producir partículas de materia oscura en los aceleradores a partir de colisiones suficientemente energéticas entre partículas del modelo estándar. Crédito: F. Bartolomé.

Los WIMPs, en la mayoría de los modelos, se espera que se acoplen a los quarks y transfieran parte de su energía por dispersión elástica a los núcleos de un detector adecuado, capaz de visibilizar la energía de retroceso nuclear transferida por el WIMP. Existen tres canales fundamentales para la conversión de la energía depositada en señal visible: carga eléctrica (ionización), fotones de centelleo (luz) y fonones (calor). Existen también detectores que combinan dos de estos tres canales, sacando un rédito importante de este hecho, la capacidad de discriminar diferentes partículas, ya que el reparto de energía entre ellos depende fuertemente de las características de las partículas que interaccionan. Esta capacidad contribuye al rechazo de fondos debidos a otras partículas, que interfieren en la detección directa de la materia oscura. Debido a que los WIMPs se espera que produzcan retrocesos nucleares, mientras que la mayoría de las partículas del fondo radiactivo depositan su energía mediante interacciones con los electrones (retrocesos electrónicos), ser capaz de distinguir entre ambos posibilita una importante mejora en la sensibilidad de los experimentos de búsqueda de materia oscura.

Por otro lado, el hecho de que los WIMPs interaccionen débilmente con la materia convencional conlleva que la sección eficaz de interacción correspondiente es muy pequeña, y por tanto, los ritmos de interacción esperados son extremadamente bajos. Por este motivo, los detectores tienen que estar muy bien apantallados de cualquier interferencia, que en este caso serían las interacciones de otras partículas, como las que constituyen la radiación cósmica que baña la superficie terrestre, o las emitidas en las desintegraciones de los núcleos inestables, que se encuentran en todos los materiales del entorno ambiental. Este apantallamiento se consigue, en primer lugar, utilizando los materiales más radiopuros que se puedan conseguir para la construcción del detector y los componentes más próximos al mismo, y después, introduciendo los detectores en el interior de blindajes adecuados, tanto activos como pasivos y colocando todo este sistema en un laboratorio subterráneo, que tenga un cubrimiento de roca suficiente para reducir de forma significativa la componente muónica de la radiación cósmica, que es capaz de atravesar cientos de metros equivalentes de agua (m.w.e.). La Figura 4 muestra la localización de los laboratorios subterráneos *profundos* (con cubrimientos de roca superiores a 2 000 m.w.e), tanto en operación, como en fase de proyecto o construcción en la actualidad. Además, aquellas técnicas de detección que puedan aprovechar mecanismos de discriminación del tipo de partícula que ha realizado el depósito energético, como ya se ha comentado, tendrán una ventaja adicional. Los experimentos de búsqueda de WIMPs se realizan en las mejores condiciones de ultra-bajo fondo radiactivo que se pueden alcanzar con la tecnología actual. La siguiente generación de experimentos de detección directa de WIMPs aspira a

eliminar de forma casi completa los fondos radiactivos, sin embargo, las interacciones de los neutrinos de origen tanto solar como atmosférico no se pueden apantallar y limitarán la mejora en sensibilidad alcanzable por dichos experimentos. Por lo tanto, resulta fundamental analizar rasgos distintivos de la señal de materia oscura, que la caractericen de forma única frente a cualquiera de los posibles fondos que interfieran en su medida.

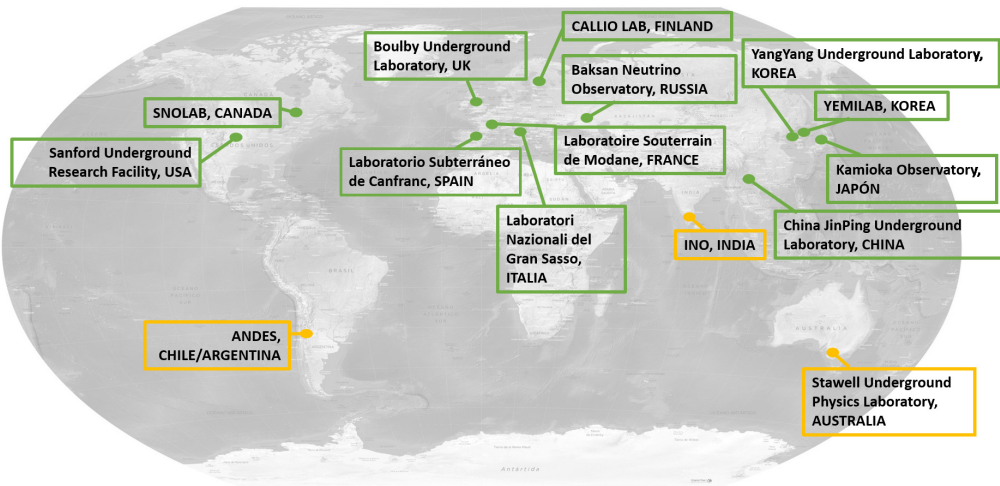


Figura 4: Diagrama que muestra los laboratorios subterráneos *profundos* (con cubrimientos de roca iguales o superiores a 2 000 m.w.e.) en operación en la actualidad (verde) y en construcción o en proyecto (naranja).

Uno de estos rasgos distintivos es la modulación anual en la señal de materia oscura, debida al movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, mientras lo acompaña en su viaje alrededor del centro galáctico. Este movimiento induce una variación de la velocidad relativa de las partículas de materia oscura con respecto a los núcleos del detector que resulta en una modulación aproximadamente cosenoidal del ritmo de interacción de dichas partículas, con periodo de 1 año y con el máximo de velocidad relativa correspondiente al 2 de junio, considerando el modelo de halo estándar [Fre1988, Dru1986]¹². La Figura 5 muestra un diagrama que representa el efecto del movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol cuando se combina con el movimiento del Sol en la galaxia, y que permite entender el efecto de la modulación anual en los ritmos de interacción de la materia oscura. Los primeros experimentos que analizaron sus datos buscando esta modulación anual datan de la década de los 90 del siglo pasado y utilizaban detectores de yoduro de sodio [Sar1996, Sar1997, Ber1999, Ber2000].

¹² Katherine Freese (Alemania 1957 -) es en la actualidad profesora en la Universidad de Texas en Austin. Sus contribuciones en el campo del estudio de la materia oscura son numerosas y muy relevantes, trabajando en la frontera entre la física de partículas y la astrofísica. En particular, es coautora de los primeros trabajos sobre la modulación anual esperada en la señal de materia oscura.

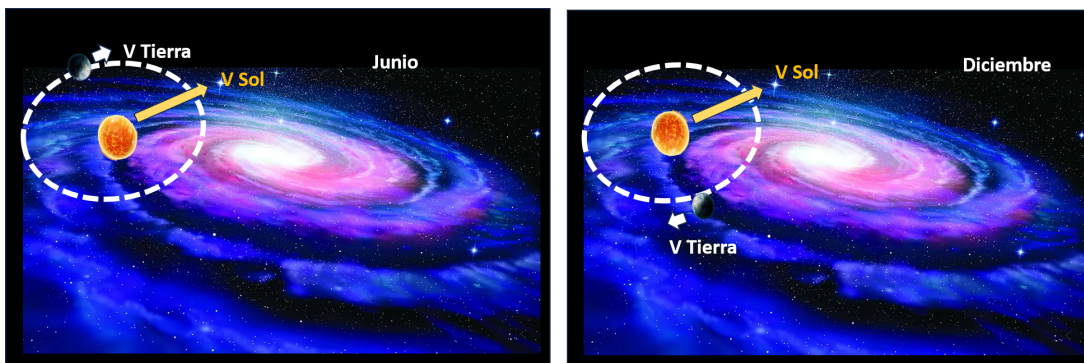


Figura 5: Representación del efecto de modulación anual en la señal de materia oscura como consecuencia del movimiento de la Tierra alrededor del Sol que modifica con periodicidad anual la velocidad relativa entre los WIMPs y los núcleos del detector. A comienzos de junio (panel izquierdo) la velocidad del Sol y la proyección de la velocidad de la Tierra sobre ella son paralelas, mientras que en diciembre (panel derecho) son antiparalelas. Siendo la velocidad de traslación de la Tierra ≈ 30 km/s, la velocidad del Sol ≈ 230 km/s y 60° el ángulo que forma el plano de la eclíptica con la velocidad del Sol, este efecto implica una variación del orden del 7 % en la velocidad relativa de los WIMPs y los núcleos del detector a lo largo del año. Los ritmos de detección de estas partículas modulan, por tanto, con periodo anual y amplitud que depende de la masa del WIMP y de la energía depositada.

La señal que esperamos que produzcan los WIMPs en un detector adecuado depende tanto de la masa y la sección eficaz de interacción del WIMP con neutrones y protones (*el modelo de WIMP*), como de la densidad de WIMPs en el halo galáctico y la velocidad relativa entre el WIMP y el núcleo con el que se dispersa (*el modelo de halo*¹³), que tienen grandes incertidumbres. Habitualmente se considera para la densidad de materia oscura en la posición del Sol un valor de $0.35^{+0.08}_{-0.07}$ GeV/cm³ [Kaf2014] y una distribución maxwelliana truncada de velocidades, con velocidad cuadrática media de 270-300 km/s y velocidad de escape de $550.9^{+32.4}_{-22.1}$ km/s, en el sistema de referencia de la galaxia [Kaf2014].

La dependencia de los ritmos de interacción de los WIMPs con todos estos parámetros es compleja e interfiere con las propiedades específicas de los núcleos que componen el detector. Esta interferencia hace que la comparación entre los resultados procedentes de experimentos diferentes no pueda hacerse de forma independiente de los modelos considerados. Este hecho resulta crucial, como veremos más adelante, para la resolución de la controversia originada por la observación de una modulación anual desde hace más de 20 años por parte del experimento DAMA/LIBRA, en operación en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (LNGS), en Italia.

¹³ En realidad depende de la densidad de materia oscura y la distribución de velocidades de los WIMPs en la posición del Sistema Solar dentro del halo de nuestra galaxia

Después de más de tres décadas de un enorme esfuerzo experimental en el desarrollo de experimentos cada vez más sensibles y de mayor masa para la detección directa de la materia oscura en forma de WIMPs [[Liu2017](#), [Sch2019](#), [Bil2021](#)], la mayor parte de los resultados han sido compatibles con los fondos estimados, aunque se han encontrado algunos *excesos* de detecciones [[Lea2021](#), [Apr2020a](#), [Agu2023](#)] que fueron interpretados como posibles señales de materia oscura al no haberse encontrado otra explicación en el momento de su publicación. Sin embargo, el origen de estos *excesos* ha podido ir siendo identificado al avanzar en la comprensión de la técnica de detección y/o mejorar las herramientas de análisis aplicadas a los datos en términos de otros tipos de señales o nuevos fondos. El reciente caso del exceso observado en XENON1T [[Apr2020a](#)] y descartado rápidamente en XENON-nT¹⁴ [[Apr2023](#)], pone de relieve cómo cualquier reivindicación de detección de la materia oscura sobre los fondos esperados requiere un extraordinario conocimiento de todas las contribuciones al fondo radiactivo, que pueden ser muy diferentes en función de la técnica de detección aplicada. Estos *excesos* de sucesos aparecen preferentemente cerca del umbral en energía del experimento y, muchas veces están asociados a la implementación reciente de alguna mejora cualitativa en la técnica de detección que permite acceder a regiones de señal previamente no exploradas [[Ada2022](#)].

Sin embargo, hay que resaltar un resultado positivo que en más de 20 años no ha sido explicado con ninguna contribución de fondos radiactivos. Se trata de la observación por el experimento DAMA/LIBRA de una modulación anual en el ritmo de detección de sus detectores de yoduro de sodio con un enorme significado estadístico, superior a 12 sigmas. La colaboración DAMA/LIBRA también ha descartado distintos efectos sistemáticos que han sido propuestos para explicar la modulación observada [[Ber1999](#), [Ber2000](#), [Ber2008a](#), [Ber2020](#), [Ber2018a](#), [Ber2018b](#)]¹⁵.

El resultado de DAMA/LIBRA es muy difícil de reconciliar con los límites establecidos por el resto de los experimentos, que no han observado ningún indicio de la interacción de partículas de materia oscura con las propiedades requeridas para explicar el resultado

¹⁴ [Elena Aprile](#) (Italia 1954 -) y [Laura Baudis](#) (Rumanía 1969 -) son dos destacadas físicas experimentales dedicadas a la búsqueda de materia oscura y otros sucesos poco probables a lo largo de su trayectoria profesional. Ambas colaboran en el programa experimental XENON. Elena Aprile, profesora en la Universidad de Columbia desde 1986, es fundadora del experimento, investigadora principal y su portavoz. Laura Baudis, profesora en la Universidad Politécnica de Zurich, ha sido co-portavoz del experimento XENON y es fundadora y portavoz del proyecto DARWIN.

¹⁵ [Rita Bernabei](#) (Italia 1949 -), catedrática en la Universidad de Roma - Tor Vergata, ha sido fundadora, investigadora principal y portavoz del experimento DAMA/LIBRA hasta su jubilación en 2019. Su trayectoria científica es excepcional con aportaciones en campos muy diferentes de la física de partículas, astropartículas y física de detectores.

de DAMA/LIBRA en los escenarios explorados [Liu2017, Sch2019, Bil2021]. Dado que, como ya hemos comentado, la comparación entre búsquedas experimentales que utilizan diferentes materiales como medio de detección no se puede hacer de forma independiente del modelo de partícula de materia oscura y de halo, el resultado de DAMA/LIBRA no puede ser descartado ni confirmado salvo en escenarios preestablecidos. Es preciso, por tanto, confirmar si se trata de un indicio de nueva física, más allá de los modelos habitualmente considerados y, tal vez, el descubrimiento de la materia oscura, o simplemente, es algún efecto sistemático todavía no entendido del experimento. La Figura 6 muestra, para WIMPs con interacciones exclusivamente independientes del espín e isospín y un modelo de halo isoterma estándar con $\rho_0 = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$, $v_0 = 220 \text{ km/s}$, y $v_{esc} = 544 \text{ km/s}$, el grado de incompatibilidad entre el resultado de DAMA/LIBRA y los demás resultados experimentales disponibles en la fecha de la preparación de esta figura, que forma parte del informe del comité APPEC (*AstroParticle Physics European Consortium*)¹⁶ sobre el estado de la detección directa de materia oscura en 2022 [Bil2021].

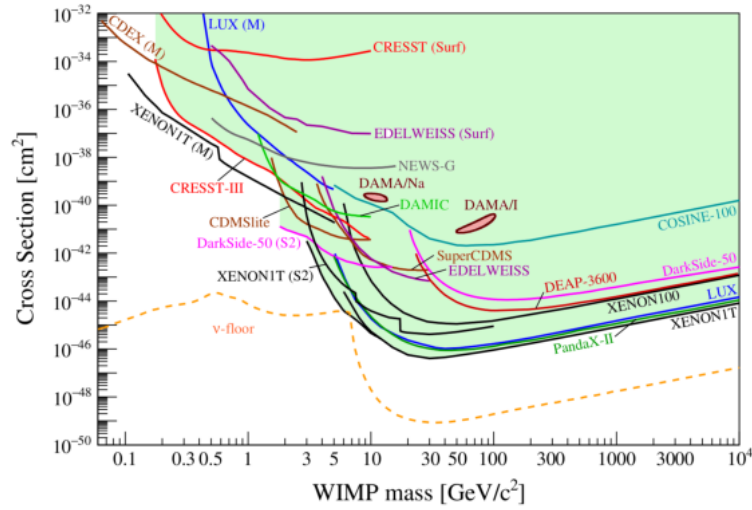


Figura 6: Representación en el espacio paramétrico $(m, \sigma_{n,SI})$ para interacciones independientes del espín, de resultados de diferentes experimentos de búsqueda de materia oscura. En la comparación se ha adoptado el modelo de halo isoterma con $\rho_0 = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$, $v_0 = 220 \text{ km/s}$, $v_{esc} = 544 \text{ km/s}$. Se muestra el límite de detección que conlleva la dispersión coherente de neutrinos solares y atmosféricos (como correspondería a un detector de germanio), ν -floor. Figura tomada de [Bil2021] con licencia CC (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>). Los resultados que se muestran corresponden al estado del arte en 2021-2022, pero sirven para mostrar la incompatibilidad de las regiones singularizadas por la señal de DAMA/LIBRA y el resto de los resultados experimentales: CDEX [Liu2019], CDMSlite [Agn2019], COSINE-100 [Adh2018], CRESST [Ang2017, Abd2019], DAMA/LIBRA [Ber2008a] (pero las regiones representadas corresponden a la referencia [Sav2009]), DAMIC [Agu2020], DarkSide-50 [Agn2018a, Agn2018b], DEAP-3600 [Aja2019], EDELWEISS [Arm2016, Heh2019], LUX [Ake2017, Ake2019], NEWS-G [Arn2018], PandaX-II [Cui2017], SuperCDMS [Agn2014], XENON100 [Apr2016] y XENON1T [Apr2018, Apr2019a, Apr2019b, Apr2020b].

¹⁶ <https://appec.org/>.

Para poner a prueba el resultado del experimento DAMA/LIBRA de una forma independiente del modelo de partícula de materia oscura y halo, el primer requisito es utilizar el mismo material como blanco, el yoduro de sodio (NaI). Además, se requiere una sensibilidad adecuada en la misma región energética en la que DAMA/LIBRA observa su señal: umbral energético equivalente y bajo fondo radiactivo, así como una gran exposición (tiempo de medida x masa de detección) y estabilidad en las condiciones de operación, ya que el experimento tiene que estar tomando datos varios años. Este es el objetivo de varios experimentos en el contexto internacional, ANAIS-112, COSINE-100¹⁷, SABRE-North, SABRE-South¹⁸, COSINE-200, PICOLON y COSINUS¹⁹, que se describirán en la Sección 4.

4. Los detectores de centelleo de NaI(Tl) aplicados a la detección directa de la materia oscura

Los detectores de NaI(Tl), yoduro de sodio dopado con talio, se han utilizado desde finales de los años 40 del siglo XX para la detección de radiación en diferentes contextos y aplicaciones [Hof1949, Kno2000]. Podemos mencionar aplicaciones médicas, control medioambiental, seguridad, prospecciones geológicas, etc. En particular, se han aplicado también en la detección directa de la materia oscura desde hace más de 30 años.

El yoduro de sodio dopado con talio es un material centelleador que permite construir detectores de radiación con interesantes prestaciones: se pueden crecer cristales (incluso monocristales) de gran tamaño, produce una gran cantidad de luz por unidad de energía depositada (del orden de 40 000 fotones/MeV) y la banda de emisión de fluorescencia solapa perfectamente con la sensibilidad de los tubos fotomultiplicadores (PMTs) con fotocátodo *bi-alkali*, teniendo su valor máximo en torno a 420 nm. Además, la elevada sección eficaz para la absorción de fotones por efecto fotoeléctrico garantiza alta eficiencia para espectroscopia gamma. En la aplicación para la detección directa de materia oscura, el yoduro de sodio, además, aporta un contenido del 100 % de isótopos con espín

¹⁷ [Reina Maruyama](#) es profesora en la Universidad de Yale y es co-portavoz del experimento COSINE-100, además de ser la investigadora principal de numerosos proyectos de detección de materia oscura en forma de WIMPs y axiones, neutrinos y desintegración doble beta de los núcleos.

¹⁸ [Elisabetta Barberio](#) es profesora en la Universidad de Melbourne y portavoz e investigadora principal del experimento SABRE-South.

¹⁹ [Karoline Schaeffner](#) es investigadora en el Instituto Max Planck de Física en Munich, investigadora principal y portavoz del experimento COSINUS.

no nulo (tanto ^{127}I como ^{23}Na), por lo que el material tiene gran interés para la detección de WIMPs con acoplamientos dependientes del espín, y una combinación de núcleo ligero (Na) y pesado (I), que garantiza la sensibilidad a un amplio rango de masas de WIMPs. El hecho de que el experimento DAMA/LIBRA observe una modulación anual haciendo uso de este material ha contribuido de forma importante a mantener el interés por la aplicación de los detectores de yoduro de sodio en las búsquedas directas de materia oscura.

Sin embargo, a diferencia de la gran mejora experimentada en los últimos 20 años en el nivel de fondo radiactivo en experimentos que hacen uso de otro tipo de técnicas y materiales blanco, en el caso de los detectores de yoduro de sodio el estado del arte apenas había evolucionado hasta hace unos pocos años, y sigue estando órdenes de magnitud por detrás de los fondos alcanzados, por ejemplo, por los experimentos que utilizan xenón líquido (LXe) [Apr2023]. Esta situación se ha generado por distintos motivos. Por un lado, la tecnología de purificación de polvo de NaI y crecimiento de cristales desarrollada por BICRON/Saint Gobain para la fabricación de los detectores de DAMA/LIBRA a finales del siglo pasado no ha podido ser reproducida por otras empresas, ni siquiera por ellos mismos. Solo en la última década se han puesto en marcha inversiones en I+D orientadas a avanzar en el desarrollo de nuevos protocolos de purificación y crecimiento de cristales radiopuros de yoduro de sodio, que puedan competir con, o incluso mejorar, los de DAMA/LIBRA en términos de fondo radiactivo. Por otro lado, la aplicación de tubos fotomultiplicadores para la conversión de la luz de centelleo emitida en el NaI(Tl) en señal eléctrica, que permitió el desarrollo de la tecnología a lo largo del siglo pasado, es en la actualidad una limitación a su sensibilidad para la detección de sucesos poco probables, ya que los PMTs no son radiopuros y contribuyen de forma importante al presupuesto de fondo radiactivo de los experimentos. Además, los PMTs también son responsables de introducir sucesos de luz espurios que interfieren con la detección de la luz de centelleo del NaI(Tl). Algunos de estos sucesos tienen su origen en la emisión de radiación Cherenkov en el vidrio de los PMTs. Esta radiación se emite en un medio transparente cuando en él se mueven partículas cargadas con velocidad superior a la de la luz en dicho medio. Las emisiones beta de contaminaciones radiactivas como ^{40}K e isótopos de las cadenas radiactivas naturales son capaces de producir estas emisiones, del mismo modo que los muones de la radiación cósmica. Además, pueden activarse otros procesos de fluorescencia tanto en el vidrio como en los dinodos del PMT y descargas de arco a causa del alto voltaje que requiere la operación de los PMTs. Estas emisiones espurias de luz, que podríamos considerar como ruido lumínico, limitan la reducción del umbral en energía que se puede

conseguir con este tipo de detectores. La disponibilidad de otros sensores de luz, como los fotomultiplicadores de Si (SiPMs) para su aplicación en la lectura del centelleo de yoduro de sodio, podría conllevar una relevante mejora de sensibilidad en esta tecnología de detección para muchas aplicaciones, tanto a causa del mejor fondo radiactivo que se podría conseguir, como por la posible reducción de umbral energético, como se comentará en la Sección 6.

A continuación se resume, en primer lugar, el estado actual y los resultados más importantes de los experimentos que utilizan NaI(Tl) como material blanco, tanto DAMA/LIBRA, como aquellos que intentan confirmar o refutar su resultado de forma independiente de los modelos de WIMP y halo (Sección 4.1). Se pondrá un foco especial en el experimento ANAIS-112 que opera en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc desde agosto de 2017 con este fin (Sección 4.1.3). Después, se analizarán posibles efectos sistemáticos que limitan la validez del test (Sección 5) [Sar2024], y terminaremos mirando hacia el futuro de la tecnología basada en yoduro de sodio, no solo en relación a la resolución del problema generado por el resultado de DAMA/LIBRA, sino también buscando otras aplicaciones de interés (Sección 6).

4.1. *Estado actual y resultados recientes de los experimentos que utilizan NaI(Tl) en la detección directa de materia oscura*

4.1.1. DAMA/LIBRA

El experimento DAMA/LIBRA (*Large sodium Iodide Bulk for RAre processes*) está alojado en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (LNGS) en Italia. Toma datos desde 2003 con 25 detectores de NaI(Tl) de gran radiopureza, con una masa de 9.7 kg cada uno de ellos, fabricados por Saint-Gobain. Anteriormente, el experimento DAMA/NaI, tomó datos con 10 detectores de menores prestaciones, entre 1995 y 2002, en una configuración experimental similar.

Los cristales están acoplados a dos PMTs en sus caras laterales mediante guías de luz de Suprasil-B de 10 cm de longitud. Los PMTs originales fueron reemplazados por un nuevo modelo de Hamamatsu de alta eficiencia cuántica en 2010. Estos nuevos PMTs han estado en operación durante la fase 2 del experimento y han permitido reducir el umbral de

análisis de 2 keVee (en la primera fase) a 1 keVee²⁰. Tanto los cristales, como las guías de luz y los PMTs están encapsulados en cobre OFHC (*Oxygen Free High Conductivity*) tratado por electrólisis para eliminar posibles contaminaciones superficiales. Los detectores están instalados dentro de un blindaje pasivo que consiste en cobre, plomo de baja actividad, láminas de cadmio y polietileno, además de una caja hermética anti-radón (continuamente mantenida bajo sobrepresión de nitrógeno gas de alta pureza) [Ber2008b].

Tanto el experimento DAMA/NaI (1995-2002) como después DAMA/LIBRA (a partir de 2003) han estado reportando resultados positivos en la búsqueda de una modulación anual en sus ritmos de detección, compatible con la que se espera resulte de la interacción de partículas de materia oscura, considerando el modelo estándar de halo para la Vía Láctea [Ber1999, Ber2000, Ber2008a, Ber2020, Ber2018a, Ber2018b]. Se trata de un resultado de la máxima relevancia en el campo, dado que es la única señal positiva que puede ser considerada como una detección directa de la materia oscura galáctica.

La estrategia de análisis de los datos del experimento DAMA/LIBRA se basa en construir el ritmo residual de los sucesos denominados *single-hit*, es decir, que corresponden a un único depósito energético en uno de los 25 módulos que integran el dispositivo experimental. La región de interés se estableció con los primeros resultados del experimento DAMA [Ber1999], que mostraron indicios de modulación en la región [2–6] keVee, y su ausencia a energías mayores. De este modo, los resultados de DAMA/LIBRA se presentan para dicha región, [2–6] keVee, utilizando todos los datos (DAMA, y las fases 1 y 2 de DAMA/LIBRA) y en la región [1–6] keVee para los datos de la fase 2 del experimento. El ritmo residual de sucesos *single-hit* se construye restando año a año el ritmo promedio en la correspondiente región energética, y se ajusta después a una función:

$$(4.1) \quad S(t) = S_m \cos(\omega(t - t_0))$$

con la amplitud de la modulación, S_m , como parámetro libre, mientras que el periodo ($T = 2\pi/\omega$) y la fase (t_0) de la modulación están fijos en valores de 1 año y el 2 de junio, respectivamente, como corresponde en el modelo estándar de halo. Este ajuste resulta en valores para la amplitud de la modulación claramente incompatibles con cero, $S_m = 10.3 \pm 0.8$ c/keVee/ton/d con 12.9σ C.L. en la región de [2–6] keVee y 10.6 ± 1.1 c/keVee/ton/d con 9.6σ C.L. en [1–6] keVee [Ber2018b]. Hay que hacer notar que

²⁰ Utilizamos keVee para referirnos a un keV de energía depositada por electrones, *energía equivalente de electrón*. En la Sección 5.2 se expondrá por qué es importante establecer si la escala de energías corresponde a energías equivalentes de electrón o energías de retroceso nuclear.

este procedimiento está afectado por sistemáticos relevantes en el caso de que haya contribuciones al fondo del experimento dependientes del tiempo, como se ha demostrado en [But2020, Mes2020, Adh2023]. Sin embargo, es difícil justificar el fondo radiactivo creciente con el tiempo en la región de interés que haría falta para reproducir el resultado observado por DAMA/LIBRA.

La colaboración DAMA/LIBRA interpreta su resultado como evidencia de la detección de la materia oscura galáctica, dado que su señal tiene todas las características que se esperan: no se observa ni en sucesos en coincidencia (*multiple hits*), ni en energías mayores de 6 keVee, se distribuye de forma estadísticamente consistente entre los 25 módulos, y no puede ser explicada por ningún fondo radiactivo ni efecto sistemático considerado hasta la fecha. Dicha señal, interpretada en el marco de modelos de WIMP estándar, singulariza dos regiones concretas del espacio de parámetros, a mayor o menor masa de los WIMPs, en función de que se considere su dispersión con núcleos de I o de Na (ver la Figura 6). Sin embargo, estos conjuntos de parámetros han sido claramente *excluidos* por muchos otros experimentos usando diferentes materiales blanco y técnicas de detección, tanto en el escenario de que los WIMPs interaccionen de forma coherente (independiente del espín, SI), como muestra la Figura 6, como dependiente del espín (SD) [Bil2021]. Aunque encontrar escenarios de compatibilidad entre el resultado de DAMA/LIBRA y los del resto de experimentos se ha convertido en una tarea difícil, no se puede descartar este resultado experimental de una forma independiente del modelo de partícula de materia oscura y halo. El resultado de DAMA/LIBRA podría ser la primera detección de la materia oscura galáctica o simplemente un efecto sistemático de la medida no tenido en cuenta en el procedimiento de análisis.

Solo recientemente se han logrado fabricar detectores de NaI(Tl) con suficiente sensibilidad para intentar reproducir los resultados de DAMA/LIBRA. Los experimentos COSINE-100 y ANAIS-112 utilizan el mismo material como blanco y la misma técnica de detección que DAMA/LIBRA. Sus detectores han sido fabricados por Alpha Spectra, Inc., en Colorado (E.E.U.U.), crecidos por un método diferente y con diferente material en polvo de partida. La aproximación experimental también incorpora algunas diferencias que podrían aportar información nueva que permita descubrir algún efecto sistemático en las medidas. Pese al esfuerzo realizado, los cristales de DAMA/LIBRA tienen contaminaciones radiactivas significativamente menores que los cristales de COSINE-100 y ANAIS-112, siendo inferiores a $620 \mu\text{Bq/kg}$ de ^{40}K y entre 5 y $30 \mu\text{Bq/kg}$ de ^{210}Pb , y resul-

tando en fondos claramente menores en la región de interés. El fondo de DAMA/LIBRA en su fase 2 es inferior a 0.80 c/keVee/kg/d en [1–2] keVee, inferior a 0.24 c/keVee/kg/d en [2–3] keVee, e inferior a 0.12 c/keVee/kg/d en [3–4] keVee [Ber2020].

4.1.2. COSINE-100

El experimento COSINE-100 ha estado tomando datos en el laboratorio subterráneo de YangYang (Y2L) en Corea del Sur desde el 30 de septiembre de 2016 [Adh2018] hasta mediados de 2023, cuando paró la toma de datos y fue desmontado. Se han implementado algunas mejoras en los módulos de NaI(Tl) y en la actualidad está en fase de montaje y puesta a punto en las nuevas instalaciones del laboratorio subterráneo de Yemilab, también en Corea del Sur, para reiniciar su operación como COSINE-100U. COSINE-100 en su primera fase de toma de datos (2016-2023) ha consistido en 8 cristales de NaI(Tl) de bajo fondo radiactivo producidos por la empresa Alpha Spectra Inc. (106 kg en total), distribuidos en una configuración 4×2. Los cristales de COSINE-100 tienen diferentes tamaños y características. Solamente 61.3 kg han sido utilizados en el análisis de la modulación anual, dado que algunos módulos tenían peor umbral en energía a causa de una pobre recolección de luz. Los cristales están herméticamente encerrados en OFC (cobre libre de oxígeno) de 1.5 mm de espesor y tienen en los lados dos ventanas de cuarzo sintético para realizar el acoplo a los PMTs de alta eficiencia cuántica, fabricados por Hamamatsu y muy similares a los utilizados por el experimento DAMA/LIBRA en su segunda fase y el experimento ANAIS-112. Todos los módulos fueron diseñados con ventanas para la calibración en energía con fuentes externas, que consisten en un espesor de cobre reducido a 0.5 mm o en una película de Mylar de 0.13 mm de espesor, dependiendo del detector. Los módulos están alojados en un recipiente acrílico sumergido en un tanque de 2 200 L de centelleador líquido. Este tanque actúa como veto activo tanto para los sucesos que pueda generar el flujo residual de muones que alcanza el laboratorio subterráneo como para otras componentes del fondo radiactivo, siendo la más relevante entre ellas la correspondiente a las emisiones de la desintegración del ^{40}K que contamina los cristales de NaI(Tl) y afecta de forma importante a la región de interés para el análisis de la modulación anual. El tanque está rodeado por un blindaje que consiste en un caja de cobre OFC, plomo y centelleadores plásticos como veto anti-muones adicional. Como referencia, las contaminaciones en los cristales de COSINE-100 en términos de ^{40}K y ^{210}Pb están entre 580 y 2 500 $\mu\text{Bq/kg}$ y entre 740 y 3 200 $\mu\text{Bq/kg}$, respectivamente.

El experimento COSINE-100 buscó un exceso de sucesos por encima del fondo estimado utilizando 59.5 días [Adh2018] y 1.7 años de datos [Adh2021a], explorando escenarios correspondientes a diferentes mecanismos de interacción de los WIMPs. No encontraron ninguna señal compatible con el resultado de modulación anual de DAMA/LIBRA. Sin embargo, aparte de que este procedimiento de comparación se fundamenta en el modelo de fondo del experimento, afectado por incertidumbres, no permite tampoco refutar el resultado de forma independiente de los modelos de WIMP y halo galáctico. Por otra parte, COSINE-100 ha presentado sus análisis de modulación anual para los primeros 1.7 años y 3 años de datos (en paralelo a las presentaciones de resultados por parte del experimento ANAIS-112) [Adh2019, Adh2021b]. La exposición utilizada por COSINE-100 para obtener el resultado de modulación con tres años de datos es 173 kg×año. El mejor ajuste derivado para la amplitud de la modulación anual para los sucesos *single hit* con periodo y fase fija, como DAMA/LIBRA, para dicha exposición, es $S_m = 5.1 \pm 4.7$ c/keVee/ton/d (6.7 ± 4.2 c/keVee/ton/d) para la región energética de [2–6] keVee ([1–6] keVee) [Adh2021b]. Ambos valores son compatibles tanto con la hipótesis de ausencia de modulación como con el mejor ajuste de DAMA/LIBRA para la amplitud de la modulación.

En paralelo a la instalación del experimento COSINE-100U en condiciones mejoradas en el laboratorio de Yemilab, la colaboración COSINE está preparando un experimento de mayor masa total y con cristales de mayor radiopureza: COSINE-200 [Par2020], que se comentará en la Sección 4.3.

4.1.3. ANAIS-112

El experimento ANAIS-112 (*Annual Modulation with NaI Scintillators*) es el resultado de la experiencia adquirida en la operación de detectores de NaI(Tl) durante aproximadamente 30 años en el GIFNA (Grupo de Investigación en Física Nuclear y Astropartículas) de la Universidad de Zaragoza [Ama2022, Sar1995, Ceb2002, Pob2006, Mar2006, Cue2013b, Oli2015, Vil2016, Coa2021, Cin2023]. El experimento fue instalado en el hall B del Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) [Ian2016] en la primavera de 2017, iniciando la toma de datos el 3 de agosto de 2017.

ANAIS-112 consiste en 112.5 kg de NaI(Tl) distribuidos en 9 módulos de 12.5 kg cada uno, montados en una configuración 3×3 (ver Figura 7). Fueron construidos por la empresa Alpha Spectra Inc. con excelentes prestaciones, en particular una gran recolección de luz (mayor y más homogénea entre módulos que en los detectores de DAMA/LIBRA), del

orden de 15 fotoelectrones/keVee [Oli2017]. Una ventana de Mylar de $20\ \mu\text{m}$ de espesor permite calibrar los módulos con fuentes externas de energías solo unos pocos keVee por encima de la región de interés para el análisis de modulación anual.

Los módulos de ANAIS-112 se encuentran rodeados por un blindaje consistente en 10 cm de plomo arqueológico, 20 cm de plomo de baja actividad, una caja anti-radón mantenida bajo sobrepresión de nitrógeno gaseoso libre de radón, y 40 cm de una combinación de tanques de agua y bloques de polietileno, que se muestra en la Figura 7. Un veto activo consistente en 16 centelleadores plásticos cubre la parte superior y los lados del montaje experimental, permitiendo identificar las interacciones asociadas al flujo residual de muones capaz de alcanzar las instalaciones subterráneas del LSC. Una descripción más detallada del montaje del experimento ANAIS-112 se puede encontrar en [Ama2019a].

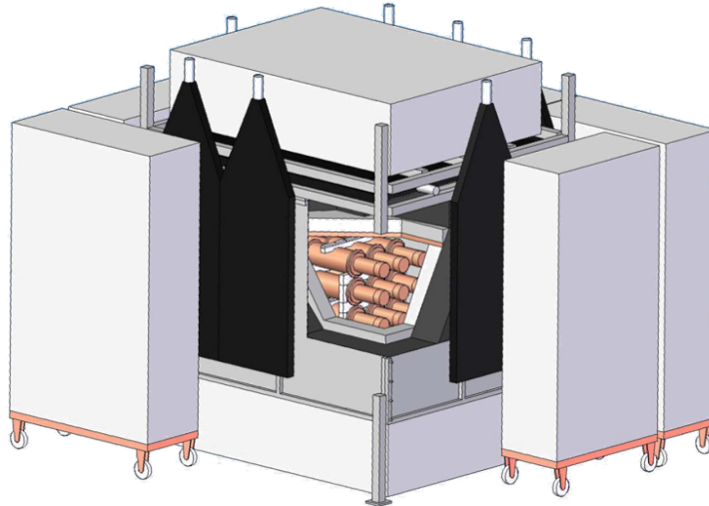


Figura 7: Visión artística del dispositivo experimental de ANAIS-112, en fase de toma de datos en el hall B del Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

Las señales de los dos PMTs acoplados a cada módulo son digitalizadas con una frecuencia de muestreo de 2 GS/s con resolución de 14 bits en una ventana de 1260 ns, de la que un 20% sirve para determinar la línea de base (región previa al pulso, también denominada *pre-trigger*). El *trigger* del experimento requiere la coincidencia de las señales de los dos PMTs del mismo módulo en una ventana de 200 ns, y el umbral de cada PMT se establece de modo que garantice la detección de un único fotoelectrón. Así se logra reducir enormemente la contribución de sucesos debidos a la corriente oscura de los PMTs sin perder sucesos de centelleo en el NaI(Tl) correspondientes a pequeños depósitos energéticos (y por tanto, a un número reducido de fotones), considerando que el tiempo característico de centelleo de este material es de $\approx 220\text{--}230\ \text{ns}$ [Bir1964].

La estabilidad del experimento está garantizada por calibraciones periódicas (cada dos semanas aproximadamente) realizadas con fuentes externas de ^{109}Cd . Estas calibraciones posibilitan la corrección de pequeñas derivas en la ganancia del experimento. La calibración final en energía de la región de interés incorpora además de las líneas del ^{109}Cd (en 22.6 y 88.0 keVee) y los rayos x del bromo (generados en el recubrimiento plástico de la fuente de ^{109}Cd , con energía promedio de 11.9 keVee), las líneas en 3.2 y 0.87 keVee, producidas en la desintegración de contaminaciones de ^{40}K y ^{22}Na presentes en el cristal de NaI(Tl) . Estas dos últimas líneas resultan fundamentales para garantizar una calibración precisa del experimento ya que se encuentran en la región de interés. Su identificación se realiza por la coincidencia entre el depósito a baja energía observado en el módulo en el que la desintegración ha tenido lugar y la detección de un gamma de alta energía en un segundo módulo, tras escapar, sin interactuar, del primero. El hecho de poder identificar de esta forma los sucesos de la desintegración del ^{22}Na permite estimar la eficiencia de *trigger* de los detectores de ANAIS-112, que resulta excelente, hasta energías considerablemente inferiores al umbral de análisis del experimento, establecido como veremos más adelante en 1 keVee.

Este procedimiento de calibración garantiza que ANAIS-112 determina su escala de energías equivalentes de electrón de forma precisa y robusta hasta energías de 1 keVee, cubriendo adecuadamente todo el rango de energías de interés. Este hecho se comprueba calculando los residuos de la energía asociada a los picos de ^{40}K y ^{22}Na con respecto a su energía nominal. Para ello se agrupan los datos cada 90 días. Los residuos promedio así obtenidos en el primer año fueron de 0.01 keVee en 3.2 keVee (^{40}K) y -0.04 keVee en 0.87 keVee (^{22}Na), con desviaciones estándar de 0.015 keVee para las dos distribuciones. La descripción completa del procedimiento de análisis de los datos del primer año puede encontrarse en [[Ama2019a](#)].

El fondo por debajo de 10 keVee está dominado por sucesos que no corresponden al centelleo del NaI(Tl) , imponiendo la necesidad de aplicar robustos protocolos de filtrado y selección de sucesos basados en la forma del pulso y en el reparto de la luz recogida entre los dos PMTs. La eficiencia de estos protocolos de selección se calcula sobre poblaciones de sucesos bien identificadas como resultantes del centelleo del NaI(Tl) , en particular, sucesos de ^{109}Cd (calibración con fuente externa) y de ^{40}K y ^{22}Na (identificados en el fondo del experimento mediante la técnica de coincidencia, antes comentada). Estas eficiencias son muy cercanas al 100 % para energías entre 2 y 10 keVee, pero bajan abruptamente por debajo de 2 keVee, reduciéndose hasta valores del orden de 10–15 % a 1 keVee, donde se

establece por este motivo el umbral de análisis [Ama2019a]. Recientemente se ha desarrollado un nuevo procedimiento de selección de sucesos basado en técnicas de aprendizaje automático, en concreto *boosted decision trees* (BDT), que ha permitido incrementar de forma significativa las eficiencias de aceptación de sucesos de centelleo en NaI(Tl), reduciendo también el fondo resultante en la región de interés y ganando, por tanto, en sensibilidad [Coa2022].

El fondo promedio en la región de interés en los tres primeros años de toma de datos para los 9 módulos de ANAIS, antes de aplicar este nuevo procedimiento de filtrado, es 3.6 c/keVee/kg/d [Ama2021], considerablemente superior al publicado por el experimento DAMA/LIBRA (ver Sección 4.1.1). Esto se debe a que, como ya habíamos comentado, la contaminación interna de los cristales de Alpha Spectra (tanto de ANAIS-112 como de COSINE-100) es superior a la de los cristales de DAMA/LIBRA. Las contaminaciones de los cristales de ANAIS-112 están entre 700 y 1330 $\mu\text{Bq/kg}$ para ^{40}K y entre 700 y 3150 $\mu\text{Bq/kg}$ para ^{210}Pb , similar a la correspondiente a los cristales de COSINE-100 (Sección 4.1.2).

El modelo de fondo del experimento ANAIS-112 se construye a partir de las actividades específicas de las diferentes contaminaciones identificadas mediante diferentes técnicas analíticas en los detectores y los materiales que constituyen el dispositivo experimental [Ceb2012, Cue2014, Ama2015, Ama2016, Ama2018, Vil2018, Ama2019b]. Sin embargo, el fondo medido experimentalmente (tras aplicar el protocolo de filtrado y corregir por la correspondiente eficiencia de forma adecuada) es superior al que predice el modelo de fondo en la región entre 1 y 2 keVee. Comprender el origen de este exceso de sucesos sigue siendo uno de los principales sistemáticos en el análisis de los datos de ANAIS-112. Estos sucesos podrían ser debidos a un deficiente filtrado de sucesos anómalos en dicho rango energético, a pesar de los exigentes criterios de selección impuestos, limitados por la baja eficiencia de aceptación de los sucesos de centelleo. Por otra parte, se están evaluando otras posibles contribuciones al fondo radiactivo no previamente consideradas, en el proceso de actualización del modelo de fondo del experimento, que tras más de 6 años de toma de datos está en curso.

Los análisis preliminares de modulación anual en los datos de ANAIS-112 fueron realizados con 1.5 y 2 años de datos [Ama2019c, Ama2020], mientras que los últimos resultados publicados corresponden a 3 años [Ama2021]. Estos análisis se han realizado en las mismas regiones de energía que estudia la colaboración DAMA/LIBRA, en energía equivalente de electrón: [1–6] keVee y [2–6] keVee, agrupando los datos en intervalos de 10 días. En

el análisis se combinan los datos de los 9 módulos y se minimiza $\chi^2 = \sum_i (n_i - \mu_i)^2 / \sigma_i^2$, donde n_i es el número de sucesos en el i -ésimo intervalo temporal t_i , corregido por el tiempo vivo y la eficiencia de detección, σ_i es la incertidumbre de Poisson correspondiente a dicho número de sucesos, adecuadamente corregida también, y μ_i es el número esperado de sucesos, que puede expresarse como:

$$(4.2) \quad \mu_i = [R_0 \phi_{bkg}(t_i) + S_m \cos(\omega(t_i - t_0))] M \Delta E \Delta t.$$

donde R_0 corresponde al ritmo inicial no-modulado, ϕ_{bkg} es la función de distribución de probabilidad (PDF) en el tiempo de cualquier componente no-modulada (incorporando componentes dependientes e independientes del tiempo), S_m es la amplitud de la modulación, $\omega = 2\pi/365 \text{ d} = 0.01721 \text{ rad d}^{-1}$, t_0 se elige de modo que el valor máximo de la función coseno corresponda al 2 de junio, M es la masa total de detección, ΔE es la anchura del intervalo energético considerado y Δt la anchura del bin temporal. R_0 es un parámetro libre en todos los casos, mientras que S_m se toma como cero en el análisis de la hipótesis nula o se deja libre y sin restricciones (permitiendo valores positivos y negativos) en la hipótesis de modulación. Se han obtenido resultados bajo diferentes modelos de evolución temporal del fondo radiactivo del experimento que han resultado en valores p del ajuste y de los distintos parámetros compatibles entre sí. Los resultados que se muestran a continuación son los derivados del análisis conjunto de la evolución del ritmo de detección de cada uno de los 9 módulos, que sigue el procedimiento explicado previamente, pero considerando:

$$(4.3) \quad \mu_{i,d} = [R_{0,d}(1 + f_d \phi_{bkg,d}^{MC}(t_i)) + S_m \cos(\omega(t_i - t_0))] M_d \Delta E \Delta t,$$

donde M_d es la masa de cada módulo, $\phi_{bkg,d}^{MC}$ es la PDF muestreada a partir de la evolución del modelo de fondo y estimada de forma independiente para cada módulo, y $R_{0,d}$ y f_d son parámetros libres, para valores de d entre 0 y 8.

En la región de energías [2–6] keVee, la hipótesis nula describe bien los datos, mientras que valores menores de p se obtienen sistemáticamente en la región [1–6] keVee. Analizando los valores individuales de cada módulo se observa que los detectores 1 y 5 son responsables del bajo valor de p correspondiente a la hipótesis nula en la región [1–6] keVee. Este comportamiento de ambos módulos podría indicar que tienen una mayor contribución de ruido o de sucesos anómalos en el rango energético de [1–2] keVee. Uno de los objetivos

de la aplicación de las técnicas de aprendizaje automático al filtrado fue intentar mejorar los valores p de los ajustes en estos módulos, que ha sido confirmado por un reciente reanálisis de los datos de 3 años [Coa2023].

Para una exposición efectiva de 313.95 kg×año, el mejor ajuste en la región [1–6] keVee ([2–6] keVee) resulta en una amplitud de modulación $S_m = -3.4 \pm 4.2$ c/keVee/ton/d (0.3 ± 3.7 c/keVee/ton/d). Por lo tanto, estos resultados son compatibles con la ausencia de modulación a 3.3 (2.6) σ , correspondiendo a una sensibilidad de 2.5 (2.7) σ [Ama2021], considerando que la sensibilidad del experimento a la señal de DAMA/LIBRA la determina el cociente del resultado de DAMA/LIBRA para la amplitud de la modulación sobre la desviación estándar del resultado para dicha amplitud derivado del análisis de ANAIS-112,

$$(4.4) \quad \frac{S_m^{DAMA}}{\sigma(S_m)}.$$

Tras aplicar las nuevas técnicas de filtrado, los resultados preliminares del análisis de modulación anual correspondiendo a una exposición de 322.83 kg×año, son $S_m = -3.3 \pm 3.7$ c/keVee/ton/d (0.7 ± 3.7 c/keVee/ton/d) con valor p del ajuste de 0.305 (0.606) para la región [1–6] keVee ([2–6] keVee) [Coa2023]. Estos resultados son compatibles con amplitud nula a 1σ e incompatibles con DAMA/LIBRA con 3.9 y 2.8σ , respectivamente, con una sensibilidad de 2.9σ en las dos regiones energéticas.

4.2. Comparación independiente de los modelos de WIMP y halo

Los últimos resultados publicados de los análisis de modulación anual [Ber2020, Adh-2021b, Coa2023] se resumen en la Figura 8. En el caso de los experimentos ANAIS-112 y COSINE-100 solo los tres primeros años de datos han sido analizados y publicados, aunque los dos experimentos acumulan más de seis años cada uno. La sensibilidad de ANAIS-112 se muestra también en la Figura 8, calculada para tres años siguiendo los métodos establecidos en [Coa2019]. La Figura 9 muestra la evolución esperada de la sensibilidad del experimento ANAIS-112, tras incorporar la mejora que ha supuesto el nuevo procedimiento de filtrado de datos. Se puede observar que una sensibilidad superior a 4σ corresponde a los 6 años de datos ya acumulados y pendientes de analizar y que una sensibilidad de 5σ está al alcance con algo más de 7 años de datos [Coa2023].

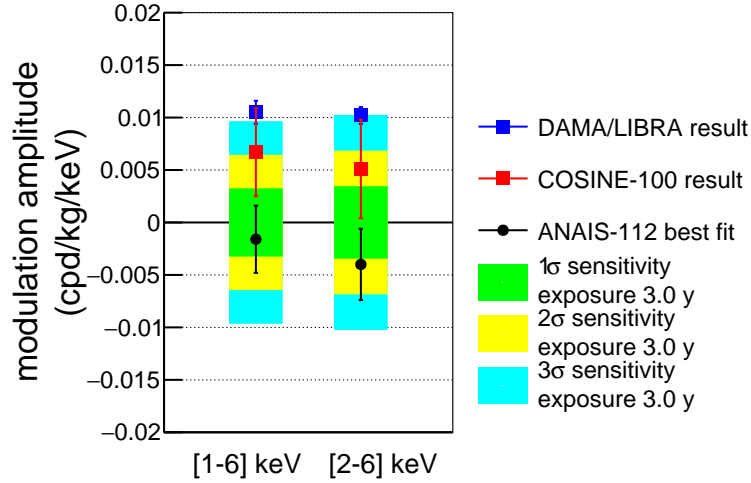


Figura 8: Comparación entre los resultados del mejor ajuste para la amplitud de la modulación anual correspondientes a la exposición completa publicada del experimento DAMA/LIBRA (cuadrados azules) [Ber2020], a los tres primeros años de datos del experimento COSINE-100 (cuadrados rojos) [Adh2021b] y a los tres primeros años de datos del experimento ANAIS-112 con el análisis BDT aplicado (círculos negros) [Coa2023]. La sensibilidad estimada para ANAIS-112 con los tres años de exposición se muestra para diferentes niveles de confianza como bandas coloreadas (ver leyenda).

Esta comparación que acabamos de realizar entre los resultados de los tres experimentos que, recordemos, utilizan el mismo material como blanco, se apoya en que la respuesta de los detectores es bien conocida y, por ello, tanto las ventanas de energía consideradas para el análisis como los correspondientes ritmos de detección son comparables. Sin embargo, es importante en este punto introducir algunos comentarios y matizaciones:

- Los cristales de NaI(Tl) utilizados en los experimentos ANAIS-112 y COSINE-100 fueron fabricados de forma similar por el mismo productor, la compañía Alpha Spectra Inc., utilizando la misma técnica de crecimiento, similar material de NaI de partida, contenido de talio, etc. Por estos motivos no son de esperar diferencias intrínsecas importantes en la respuesta de los módulos, ni para retrocesos electrónicos (como los que producen fotones o partículas beta) ni para retrocesos nucleares. Por otro lado, los cristales de DAMA/LIBRA fueron fabricados por Saint Gobain con un protocolo especial, que no ha sido nunca hecho público, y por lo tanto, podría ser que hubiera diferencias intrínsecas en la respuesta centelleadora de los cristales de DAMA/LIBRA y los de ANAIS/COSINE. Comentaremos más sobre este punto en la Sección 5. Otra diferencia importante entre los detectores utilizados es la forma de acoplar los tubos PMTs a los cristales de yoduro de sodio. En el caso de ANAIS y COSINE los cristales están acoplados a ventanas de cuarzo de 1 cm que a su vez se acoplan a los PMTs, mientras que los detectores de DAMA/LIBRA incorporan

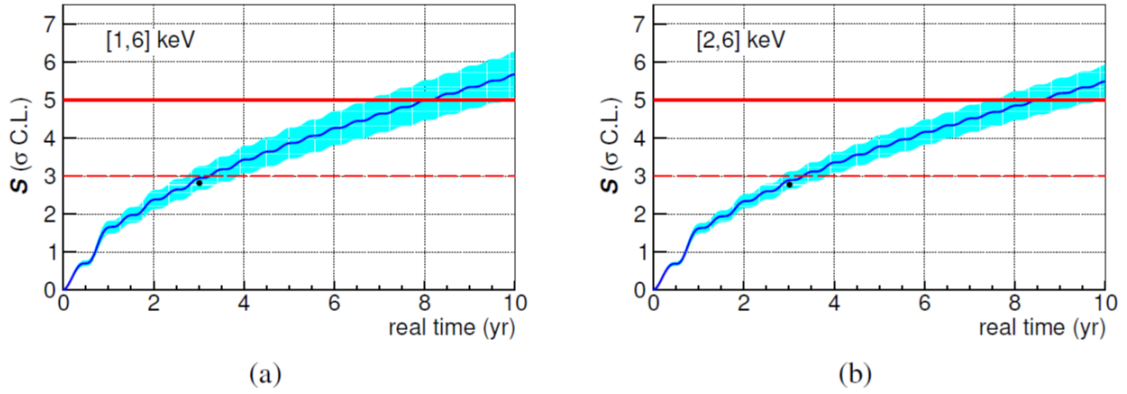


Figura 9: Sensibilidad de ANAIS–112 a la señal de DAMA/LIBRA, definida según la ecuación 4.4, siguiendo los métodos establecidos en [Coa2019], y recalculada en las regiones de energía [1–6] keVee (a) y [2–6] keVee (b) con el fondo resultante tras aplicar el nuevo procedimiento de filtrado de sucesos. Se muestra como función del tiempo real transcurrido desde el inicio de la toma de datos. El punto negro representa la sensibilidad obtenida en el reanálisis de los tres años [Coa2023] y las bandas azules, la región que corresponde a las incertidumbres en el resultado de DAMA/LIBRA al 68 % C.L.

guías de luz de Suprasil B de 10 cm de espesor entre el cristal y los PMTs. Este diferente acoplo óptico es probablemente responsable de que los cristales de ANAIS-112 y COSINE-100 tengan valores muy similares en términos de luz recogida por unidad de energía depositada (del orden de 15 fotoelectrones/keVee)²¹, mientras que los módulos de DAMA/LIBRA tienen valores inferiores y menos homogéneos entre módulos para dicha luz recogida (entre 6 y 10 fotoelectrones/keVee [Ber2012]). Por otro lado, es posible que la presencia de las guías de luz en los módulos de DAMA/LIBRA contribuya a reducir la cantidad de sucesos anómalos, posiblemente originados en los PMTs, que contaminan los datos de ANAIS-112 a muy baja energía (por debajo de 2 keVee).

- Tanto COSINE-100 como ANAIS-112 tienen un sistema para la identificación de muones, de modo que pueden eliminar de sus datos todos aquellos eventos que se pueden correlacionar con la interacción de muones, tanto en los detectores como en el blindaje. Esto no es así en el caso de DAMA/LIBRA. Por otro lado, los laboratorios subterráneos Y2L y LSC en los que están instalados COSINE-100 y ANAIS-112, respectivamente, tienen un cubrimiento de roca muy inferior al correspondiente al LNGS (2000 m.w.e. en Y2L, 2450 m.w.e. en LSC, 3400 m.w.e. en LNGS). Este hecho implica un mayor flujo residual de muones en estos laboratorios. Los muones tienen gran importancia en los análisis de modulación anual en concreto,

²¹ Aunque en el caso de los módulos de COSINE-100, algunos de mayor tamaño tienen valores inferiores para la luz recogida y por eso no se utilizan en el análisis de la modulación anual.

porque el flujo de muones tiene una modulación estacional, confirmada por numerosos detectores subterráneos para los muones de altas energías [[Amb1997](#), [Aga2019a](#), [Ago2019](#), [Ago2016](#), [Aga2019b](#), [Ada2010a](#), [Ada2010b](#), [Abr2017](#), [An2018](#)]. Por este motivo, los muones fueron propuestos como un plausible origen de la señal observada por DAMA/LIBRA, aunque la colaboración siempre los descartó. Está claro que las interacciones directas de los muones deberían aparecer en regiones de energía muy superiores a la región de interés, y en el LNGS, además, con un ritmo muy bajo. Sin embargo, las interacciones de los muones y de otras partículas que estos son capaces de producir, tanto en el blindaje como en distintos componentes de los detectores, podrían producir señales luminosas equivalentes a depósitos energéticos en la región de interés. De forma análoga, la fosforescencia observada en NaI(Tl), tanto en ANAIS-112 [[Cue2013a](#)] como en COSINE-100, es capaz de desencadenar la detección de varios sucesos con solo una interacción primaria en el detector. Estos sucesos, que podríamos denominar *muon tails*, podrían contribuir en la región de interés del experimento y estar modulados estacionalmente, aunque no se espera que la fase de su modulación encaje exactamente con la del movimiento de la Tierra en el halo galáctico. Tanto ANAIS-112 como COSINE-100 aplican a sus datos criterios de selección que permiten rechazar aquellos sucesos originados poco tiempo después de que un muón haya cruzado el dispositivo experimental, no así DAMA/LIBRA. Ha habido interesantes propuestas [[Nyg2011](#), [Sut2023](#)] valorando la posibilidad de que una emisión de luz retardada inducida por la radiación pueda pasar los criterios de selección establecidos por el experimento DAMA/LIBRA, siendo equivocadamente categorizados como sucesos de centelleo en NaI(Tl) en el rango del keVee. De este modo, en la actualidad, la posible contribución de sucesos relacionados con muones en el experimento DAMA/LIBRA sigue siendo una de las posibilidades que permitirían entender la observación de una modulación estacional con frecuencia anual, aunque con una fase ligeramente diferente.

- Los PMTs de alta eficiencia cuántica utilizados por los tres experimentos son muy similares. Sin embargo, los tres experimentos observan ritmos de sucesos de centelleo no atribuibles al NaI(Tl) muy diferentes. ANAIS-112 es el que más sucesos de este tipo observa, con las eficiencias de filtrado más bajas, aunque la recogida de luz de los módulos de ANAIS-112 es muy alta, y se podría esperar que recogiendo más luz fuera más sencillo filtrar los sucesos anómalos. Estos sucesos observados en ANAIS-112 podrían ser explicados, al menos en parte, por la producción de luz en los propios PMTs con tiempos de emisión similares a los del NaI(Tl), lo que dificultaría

identificarlos por la forma del pulso, aunque deberían ser altamente asimétricos. Este tipo de sucesos podría aparecer con mucha menor frecuencia en el caso del experimento DAMA/LIBRA, aunque también se produjera luz de forma similar en sus PMTs, porque las guías de luz de 10 cm harían mucho más difícil que la luz producida en un PMT alcanzara el otro y lograra generar un *trigger*. Sin embargo, los detectores de COSINE-100 deberían tener una contribución de estos sucesos similar a la que observa ANAIS-112, y al no ser este el caso, otras hipótesis deben ser también exploradas en paralelo, como comentaremos a continuación. Reemplazar los PMTs por otros sensores de luz, como SiPMs, podría reducir estas contribuciones espurias de sucesos que no corresponden al centelleo del NaI(Tl) y, por lo tanto, podría conllevar un importante incremento de sensibilidad de estos experimentos. Volveremos a comentar esta posibilidad en la Sección 6.

- Los tres experimentos aplican diferentes estrategias para la toma de datos y procesamiento de señales. En concreto, la digitalización de la señal de los PMTs se realiza de forma diferente y también se aplican diferentes estrategias de *trigger*. Los tres experimentos tienen diferencias relevantes en, al menos, los siguientes parámetros: frecuencia de muestreo de la señal, ventana de integración, resolución de la señal (en bits de ADC), tiempo muerto por suceso adquirido y eficiencia de *trigger*. Así, por ejemplo, ANAIS-112 utiliza una mayor frecuencia de muestreo y ventana temporal más corta que COSINE-100, así como una mayor ventana de coincidencia entre las señales de los dos PMTs para la definición del *trigger* de cada módulo que DAMA/LIBRA, resultando en una eficiencia de *trigger* mayor. Las implicaciones de estas diferencias no han sido analizadas en profundidad hasta la fecha. En estos momentos, el experimento ANAIS está iniciando la toma de datos con un sistema de procesamiento de la señal nuevo, en paralelo al que está operativo desde 2017, para analizar el posible efecto de los diferentes parámetros de adquisición. El objetivo es medir de forma sincronizada con los dos sistemas y comparar los resultados de la aplicación de los criterios de filtrado a ambos conjuntos de datos. Esta comparación podría proporcionar información que permita entender algunas de las diferencias observadas en los datos de los tres experimentos y, posiblemente, mejorar la sensibilidad rechazando sucesos anómalos que el nuevo sistema podría permitir identificar.

4.3. Otros proyectos en fase de I+D

Entre los proyectos en fase de I+D que utilizan NaI como material blanco, algunos tienen como objetivo la implementación de mejoras relevantes en los procedimientos de purificación del material de partida y de crecimiento de los cristales que posibiliten alcanzar una mayor radiopureza, pero manteniendo el mismo planteamiento experimental y tecnología de detección que aplican DAMA/LIBRA, COSINE-100 y ANAIS-112: la detección de la luz de centelleo del NaI(Tl) utilizando PMTs. De ellos, los que se encuentran en un estado más avanzado de desarrollo son:

- SABRE (*Sodium Iodide with Active Background REjection*) [Ant2019,Zur2023,Tom-2022,Cal2022]. La colaboración SABRE planea instalar dos detectores *gemelos*, uno en el hemisferio norte en el LNGS (SABRE-North) y otro en el sur en el laboratorio subterráneo de Stawell (SABRE-South), en Italia y Australia, respectivamente. Los niveles de radiopureza conseguidos por los cristales de NaI(Tl) fabricados hasta la fecha, de varios kg de masa, por la colaboración SABRE, son excelentes en términos de su contaminación en potasio natural, ^{nat}K , 4.3 ± 0.2 ppb²², sin embargo la contaminación en ^{210}Pb es todavía alta, 340 ± 40 $\mu\text{Bq/kg}$ [Sue2020,Sue2021] y 461 ± 5 $\mu\text{Bq/kg}$ [Cal2022].
- COSINE-200 [Par2020]. La colaboración COSINE, que opera el experimento COSINE-100, lleva varios años trabajando en diferentes frentes para reducir las contaminaciones tanto de ^{210}Pb como de ^{nat}K . El objetivo es crecer 200 kg de NaI(Tl) ultrapuro y montar los detectores en un entorno de ultra-bajo fondo radiactivo. Hasta el momento han conseguido niveles de ^{210}Pb entre 10 y 50 $\mu\text{Bq/kg}$ y ^{nat}K entre 8 y 23 ppb [Par2020], pero solo en cristales de reducido tamaño, inferior a 1 kg.
- PICOLON (*Pure Inorganic Crystal Observatory for LOw-energy Neutr(al)ino*). Este proyecto ha tenido éxito hasta la fecha en el crecimiento de cristales con un contenido muy bajo en ^{210}Pb , por debajo de 6 $\mu\text{Bq/kg}$, y ^{nat}K por debajo de 20 ppb, utilizando un método de purificación híbrido que combina técnicas de recristalización y la utilización de resinas específicas de intercambio de iones. Planean un experimento de 250 kg de NaI(Tl) en Japón [Fus2018,Kan2020,Fus2021a,Fus2021b].

²² 1 ppb de potasio natural equivale a 30.96 $\mu\text{Bq/kg}$ de ^{40}K .

Otros proyectos en fase de I+D con blanco de yoduro de sodio utilizan la misma técnica de detección, la medida del centelleo del yoduro de sodio, pero están trabajando en el desarrollo de una nueva lectura de la señal luminosa utilizando fotomultiplicadores de silicio (SiPMs) en lugar de PMTs. En este grupo de proyectos destacan ANAIS+ [Ama2022] y ASTAROTH [DAn2022]. Estos proyectos se discutirán con algo más de detalle en la Sección 6.

Por otro lado, el experimento COSINUS (*Cryogenic Observatory for Signatures seen in Next-generation Underground Searches*), también en fase de I+D, utiliza una aproximación totalmente diferente para la detección: la medida simultánea de la luz y el calor producidos tras el depósito de energía asociado a la interacción de una partícula en el cristal de yoduro de sodio. Para ello, los detectores (denominados bolómetros centelleadores) tienen que ser operados a muy bajas temperaturas, de unos pocos mK. La partícula interaccionante puede ser identificada mediante el diferente reparto entre los dos canales de conversión de la energía depositada en señal visible: luz y calor [Ang2016, Zem2020, Ang2023, Ein2023]. A causa de la diferente estrategia experimental, los resultados de COSINUS podrían aportar resultados interesantes y novedosos frente a los de los experimentos previamente comentados. En particular, una de las ventajas que ofrecen los bolómetros centelleadores es la capacidad de determinar la energía de retroceso nuclear a partir de la señal de calor, que es mucho menos dependiente de las correcciones por factores de *quenching* que afectan a la respuesta de centelleo, y que introducen un efecto sistemático muy importante en la comparación entre los distintos experimentos, como analizaremos en la Sección 5. Retomaremos el análisis de las ventajas que ofrece esta nueva tecnología de detección en la Sección 6.

5. Función respuesta de los detectores de NaI(Tl) aplicados a la detección de materia oscura

Como ya se ha enfatizado con anterioridad, la comparación entre experimentos que utilizan el mismo material como blanco de detección puede ser hecha de una forma independiente de los modelos de materia oscura y halo galáctico. La señal esperada debería ser la misma en todos ellos, independientemente de los valores que adopten los diferentes parámetros de dichos modelos. Sin embargo, la función respuesta de cada detector a las energías depositadas por las diferentes partículas implicadas en el proceso de detección debe ser tomada en cuenta adecuadamente para poder proceder a realizar la comparación entre resultados de experimentos diferentes. En esta sección se discuten las incertidumbres

sistemáticas en el conocimiento de dicha función respuesta que afectan a la comparación entre el resultado de DAMA/LIBRA y los de otros experimentos que utilizan también yoduro de sodio como blanco. Cada experimento debe responsabilizarse de analizar y modelizar adecuadamente la función respuesta de sus detectores en los aspectos que se comentan en las siguientes secciones para que se pueda garantizar que dicha comparación es válida y significativa.

5.1. *Emisión de luz no proporcional con la energía en NaI(Tl)*

Los centelleadores de NaI(Tl) tienen un comportamiento no proporcional que es bien conocido: la emisión de luz por unidad de energía depositada cambia hasta un 5% en el rango de energías de interés para la búsqueda de materia oscura, por debajo de 20 keVee [Mur1961, Roo1997, Mos2002, Cho2008, Hul2009, Pay2009, Kho2010, Pay2011].

Este comportamiento obliga a afrontar una cuestión sistemática relevante: cómo calibrar adecuadamente la región de interés del experimento para convertir la señal luminosa en energía depositada. Los experimentos adoptan diferentes aproximaciones para resolver esta cuestión, pero es importante remarcar que el comportamiento del NaI(Tl) es difícil de modelizar. En ANAIS-112, por ejemplo, la opción elegida para la calibración en energía consiste en linealizar el comportamiento del detector en una región próxima a la región de interés para el análisis de la modulación anual a partir de depósitos energéticos fácilmente identificables, tanto en medidas de calibración como de fondo, todos ellos por debajo de 25 keVee. Esta elección facilita el tratamiento de los datos y reduce sistemáticos. El procedimiento de calibración de ANAIS-112 ha sido descrito en la Sección 4.1.3. El experimento DAMA/LIBRA utiliza ^{241}Am para realizar calibraciones periódicas cada ≈ 10 días. Los datos de la fase 1 de DAMA/LIBRA muestran un comportamiento lineal (establecido con la línea de 59.5 keVee del ^{241}Am y comprobado con la línea de 3.2 keVee de la contaminación interna en ^{40}K). Sin embargo, los datos de la fase 2 de DAMA/LIBRA muestran una ligera no linealidad que se manifiesta como un desplazamiento de 0.2 keVee a energías de 1 keVee, siendo despreciable el efecto por encima de 15 keVee. Esta no linealidad se introduce en el análisis tal y como se explica en [Ber2020]. En el caso del experimento COSINE-100 la calibración se realiza con fuentes externas y emisiones de contaminaciones internas a los cristales. Por debajo de 70 keVee se observa una respuesta en luz no lineal que es tenida en cuenta mediante un modelo empírico basado en todas las líneas

observadas a baja energía (0.9 keVee de ^{22}Na , 3.2 keVee de ^{40}K , 25.5 keVee de ^{109}Cd , 30.5 keVee de ^{121}Te , 49 keVee de ^{210}Pb y 67.8 keVee de ^{125}I). Más detalles sobre el método seguido por COSINE-100 para calibrar pueden encontrarse en [Adh2021c].

Los efectos sistemáticos asociados a estas diferentes formas de calibrar la respuesta luminosa de los detectores afectan fundamentalmente a la definición de las regiones de análisis consideradas para la búsqueda de la modulación anual. Sin embargo, este efecto no se espera que sea muy importante, dado que hay líneas fácilmente identificables del fondo radiactivo en la región de interés, como es el pico de 3.2 keVee del ^{40}K , presente en todos los experimentos en mayor o menor medida, que permiten tener un buen control de los residuos de la calibración.

5.2. Factores de quenching del centelleo para retrocesos nucleares

Ya hemos comentado anteriormente que diferentes partículas *convierten* de forma diferente la energía depositada en un determinado material blanco en señal visible para cada posible canal de detección. En particular, en materiales centelleadores como el NaI(Tl) este hecho resulta en que los retrocesos nucleares producen mucha menos luz para una misma energía depositada que los retrocesos electrónicos. Utilizaremos para referirnos a esta reducción en la emisión de centelleo que se observa para algunas partículas relativa a la emisión por parte de electrones de la misma energía el término *quenching*. Los factores de *quenching* miden esta reducción relativa, y por tanto, permiten convertir la escala de energías de retrocesos nucleares en la escala de energías equivalentes de electrón, que usualmente se denomina escala de energía visible, dado que los experimentos suelen calibrarse con fuentes conocidas de electrones o fotones, que depositan su energía a través de retrocesos electrónicos. Como ya se ha comentado en la Sección 3, la interacción de las partículas de materia oscura en un detector se espera que produzca depósitos de energía a través de los retrocesos de los núcleos, dispersados elásticamente, en los escenarios más estándar. Por este motivo, los factores de *quenching* del centelleo de los retrocesos de los núcleos de sodio y yodo en NaI(Tl) tienen que ser conocidos con precisión si queremos comparar los resultados de experimentos que utilizan NaI(Tl) con los que utilizan otros materiales como blanco, siempre que estemos estudiando una señal generada a partir de retrocesos nucleares. Asimismo, dichos factores serán necesarios para comparar entre sí los resultados de experimentos que utilizan NaI(Tl), si el factor de *quenching* del centelleo no es una propiedad intrínseca del material sino que depende de características específicas de cada cristal, como su estructura microscópica, impurezas, dopaje de talio, etc.

Las medidas de estos factores de *quenching* del centelleo para retrocesos de sodio y yodo en NaI(Tl) es, por tanto, una cuestión crucial en el análisis de los resultados de los experimentos de detección directa de materia oscura y el test del resultado de DAMA/LIBRA. Por este motivo, diversas medidas se han llevado a cabo desde la década de los 90 del siglo pasado. Los factores de *quenching* (QF) se definen como la señal luminosa producida por un retroceso nuclear con respecto a la luz producida por un retroceso electrónico que deposite exactamente la misma energía en el material. No existe un marco teórico que permita entender en la actualidad estos factores de *quenching* para NaI(Tl) en el rango de energías de interés para los experimentos de detección directa de materia oscura, por lo que es imprescindible desarrollar un programa experimental adecuado para su medida.

El planteamiento experimental adoptado en la mayoría de las medidas realizadas de estos factores de *quenching* en NaI(Tl) se basa en inducir retrocesos nucleares utilizando un haz de neutrones cuasi-monoenergéticos, pulsado si es posible. Estos neutrones se dispersarán elásticamente en el cristal de NaI(Tl) con un ángulo que puede ser determinado si se detecta el neutrón dispersado con una matriz de detectores de neutrones (BD, *backing detectors*) estratégicamente situados alrededor del cristal de NaI(Tl), cubriendo un amplio rango de ángulos. La coincidencia de las señales de uno de estos detectores y la del cristal de NaI(Tl) permite determinar la energía depositada por el neutrón en su dispersión (E_{NR}) con el ángulo cubierto por el BD, mientras que la energía visible correspondiente (E_{ee}) se determina mediante la luz producida en el cristal de NaI(Tl), adecuadamente calibrada con retrocesos electrónicos generados por fuentes de radiación conocida. El factor de *quenching* se calcula a partir de estos observables como $QF = E_{ee}/E_{NR}$.

Los resultados de las medidas disponibles para los factores de *quenching* del centelleo para retrocesos de núcleos de sodio y de yodo en NaI(Tl) se muestran en las Figuras 10 y 11, respectivamente [Spo1994, Ber1996, Cha2008, Col2013, Xu2015, Joo2019, Big2021, Cin2021, Cin2023]. Puede observarse que hay una alta dispersión en los valores obtenidos, aunque las medidas más recientes del factor de *quenching* para núcleos de sodio coinciden en mostrar una reducción de dicho factor para energías de retroceso por debajo de 30–40 keV.

Dos escenarios diferentes podrían explicar los datos disponibles para los factores de *quenching* del centelleo para los retrocesos de núcleos de sodio y yodo en NaI(Tl):

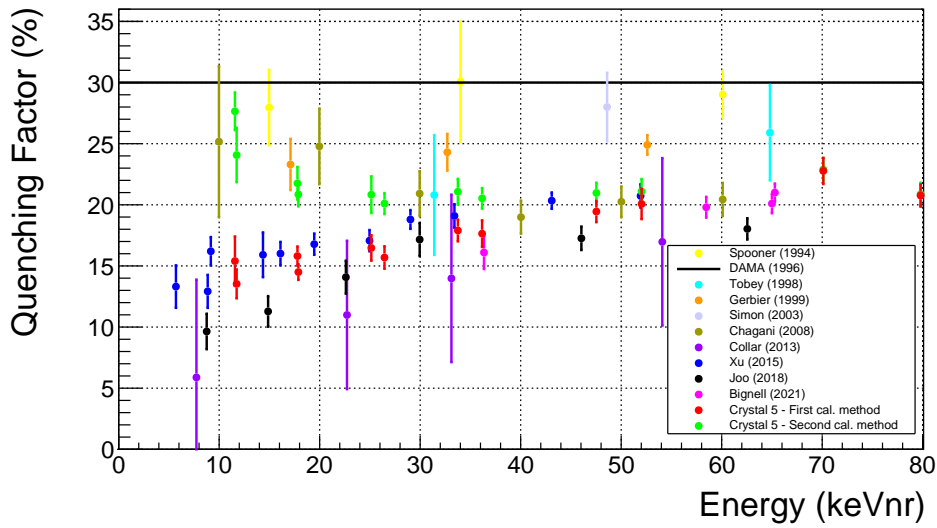


Figura 10: Resultados publicados de los factores de *quenching* del centelleo para retrocesos de núcleos de sodio en NaI(Tl) [Spo1994, Ber1996, Cha2008, Col2013, Xu2015, Joo2019, Big2021, Cin2021, Cin2023]. Los resultados etiquetados como *Crystal 5* corresponden a un cristal crecido en el mismo lote de producción que varios de los cristales del experimento ANAIS-112, y se muestran para dos diferentes procedimientos de calibración (ver texto para más detalles al respecto): (C1) calibración proporcional utilizando como referencia el pico de dispersión inelástica de los neutrones en ^{127}I ; (C2) utilizando una calibración lineal derivada a partir de los datos de una fuente externa de ^{133}Ba . Figura extraída de [Cin2023].

1. El factor de *quenching* es una propiedad intrínseca del material, NaI(Tl), y las diferencias entre las distintas medidas se deben a efectos sistemáticos no tenidos adecuadamente en cuenta en los diferentes experimentos, dado que tanto los dispositivos experimentales como las herramientas de análisis utilizadas son diferentes en cada uno de ellos. En este escenario, se podrían comparar los resultados de diferentes experimentos realizados con detectores de NaI(Tl) entre ellos, tanto en energías equivalentes de electrón como en energías de retroceso nuclear, independientemente de conocer con precisión los valores de los factores de *quenching*. Sin embargo, la comparación entre los experimentos que utilizan NaI(Tl) y los que utilizan otros materiales como blanco en términos de energías de retroceso nuclear, necesitaría disponer de una mejor modelización y comprensión de los factores de *quenching* en NaI(Tl).
2. El factor de *quenching* en los cristales de NaI(Tl) no es una propiedad intrínseca, sino que depende de características específicas de cada cristal. En este caso, la comparación entre los diferentes experimentos que utilizan NaI(Tl) entre sí (y en particular con DAMA/LIBRA, para confirmar o refutar su resultado en modulación anual) requeriría determinar de forma precisa los factores de *quenching* para cada experimento, de forma independiente.

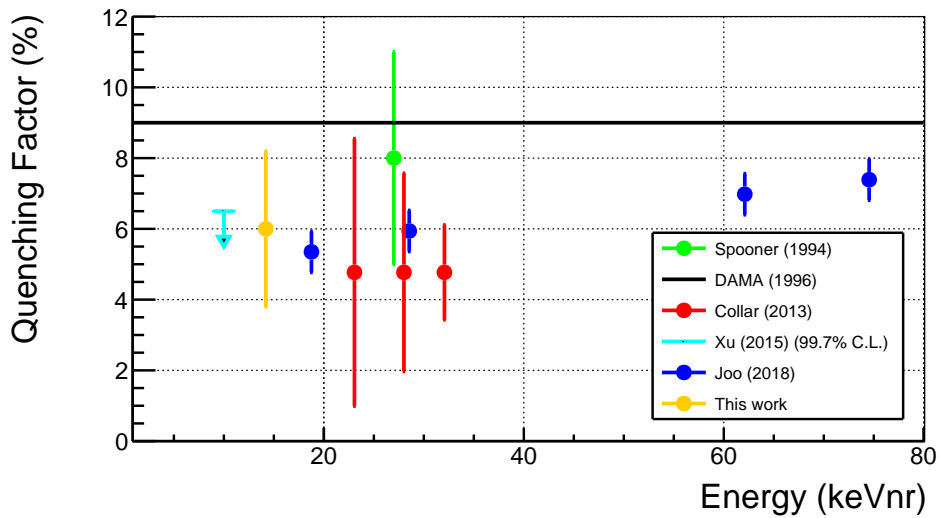


Figura 11: Resultados publicados de los factores de *quenching* del centelleo para retrocesos de núcleos de yodo en NaI(Tl) [Spo1994, Ber1996, Col2013, Xu2015, Joo2019, Cin2021, Cin2023]. Los resultados etiquetados como *This work* corresponden a las medidas de los cristales de Alpha Spectra 2 y 3 [Cin2023]. Figura extraída de [Cin2023].

En la actualidad, los datos disponibles no permiten establecer una clara preferencia entre estos dos escenarios. Hace falta más información para resolver esta cuestión que contribuye como un efecto sistemático relevante que limita cualquier test del resultado del experimento DAMA/LIBRA, tanto con el mismo como con diferente material blanco. Por este motivo, sigue siendo del máximo interés realizar medidas de los factores de *quenching* del centelleo para los núcleos de sodio y yodo en NaI(Tl) poniendo el foco en el control de todos los posibles sistemáticos asociados a dichas medidas. Este ha sido el objetivo de una medida reciente en colaboración entre miembros de los experimentos COSINE-100, COHERENT y ANAIS-112. Se midió el factor de *quenching* en varios cristales de NaI(Tl) en un mismo montaje experimental y con el mismo protocolo de análisis. Las medidas se llevaron a cabo en 2018 en las instalaciones de la Advanced Neutron Calibration Facility, en Triangle Universities Nuclear Laboratory (TUNL), Durham (E.E.U.U.).

Todo el diseño de la medida tuvo como objetivo prioritario controlar y estimar los posibles efectos sistemáticos. Algunos de los aspectos considerados en dicho diseño experimental se presentan brevemente a continuación:

- Los cristales utilizados son de diferentes tamaños y características. Tienen forma cilíndrica, con el mismo diámetro y altura: 1 o 2 pulgadas. Estas pequeñas dimensiones permiten reducir la dispersión múltiple de los neutrones en el cristal, que puede afectar de forma importante a la determinación de los factores de *quenching*.

- El mismo PMT ha sido acoplado a todos los cristales en un montaje experimental totalmente equivalente.
- Las medidas fueron distribuidas en dos periodos de operación del haz diferentes, en agosto y octubre de 2018, con ligeramente diferentes energías de los neutrones y posiciones de los detectores de neutrones utilizados para determinar los ángulos de dispersión y, por lo tanto, la energía del retroceso nuclear depositada en el cristal.
- El mismo procedimiento de análisis fue aplicado a los datos de todos los cristales estudiados.
- Diferentes esquemas de calibración de la escala de conversión de la luz en energía equivalente de electrón fueron considerados. Por un lado se llevaron a cabo calibraciones periódicas con una fuente externa de ^{133}Ba para todos los cristales, mientras que por otro, durante las medidas con haz, se dispone de la información del pico de dispersión inelástica de los neutrones con los núcleos de ^{127}I , que permite corregir posibles derivas de la ganancia del sistema de detección.
- Para evitar efectos de umbral, el diseño de una adecuada estrategia de *trigger* resulta fundamental. El *trigger* utilizado en las medidas con haz lo realiza la señal de los detectores de neutrones, sin que sea precisa una señal coincidente en el cristal de NaI(Tl). El depósito energético en el cristal de NaI(Tl) se construye *off-line* integrando el pulso de luz en una ventana fija, de acuerdo con el tiempo de vuelo del neutrón entre los dos detectores (el cristal de NaI(Tl) y el detector de neutrones que hace el *trigger*).
- La energía de los neutrones del haz se determina mediante medidas específicamente diseñadas del tiempo de vuelo, usando un detector de neutrones alineado con el haz y colocado a diferentes distancias.
- Una simulación completa del dispositivo experimental y de las medidas realizadas ha sido capaz de proporcionar funciones de distribución de probabilidad (PDF) para los espectros de energías de retroceso nuclear en NaI(Tl) para señales coincidentes con cada uno de los detectores de neutrones. Estas PDFs incorporan de forma natural toda la información correspondiente a la dispersión (espacial, temporal y en energías) del haz de neutrones, al tamaño del cristal de NaI(Tl) y de los detectores de neutrones. Además, las incertidumbres en las posiciones de los detectores,

por ejemplo, pueden ser tenidas en cuenta para extraer las incertidumbres sistemáticas asociadas en los resultados, como comentaremos más adelante. Estas PDFs, tanto para retrocesos de sodio como de yodo, las utilizaremos para ajustar las medidas experimentales, teniendo en cuenta también la contribución de posibles fondos. Ejemplos de estos ajustes para el cristal 1 se muestran en la Figura 12.

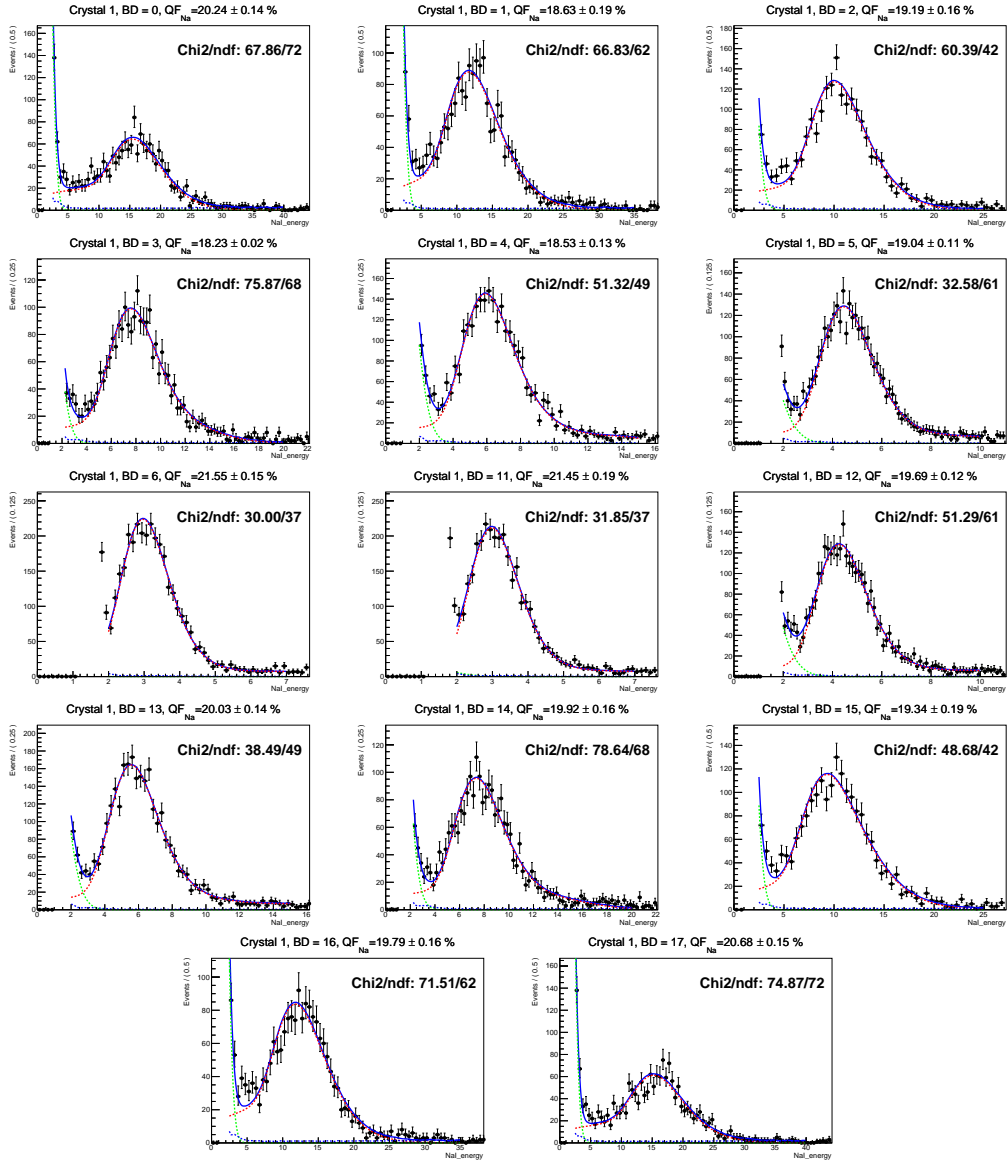


Figura 12: Ajustes para las medidas del cristal 1 en las instalaciones de TUNL, realizadas en agosto de 2018. Las PDFs se extraen de la simulación (distribución de depósitos energéticos en el NaI(Tl) que corresponden a un evento detectado en uno de los BD compatible con un neutrón) y se ajustan a los datos seleccionados del mismo modo. De estos ajustes se extraen los valores de los factores de *quenching* para el centelleo de núcleos de sodio que corresponden a la energía del BD considerado. Figura tomada de [Cin2023].

Los resultados de las medidas de los factores de *quenching* del centelleo para núcleos de sodio en NaI(Tl) para el cristal 5 se muestran en la Figura 10 [Cin2021, Cin2023, Cin2024]. Un detallado análisis de las incertidumbres sistemáticas ha sido llevado a cabo, estando la mayoría de ellas incorporadas en las barras de error que se muestran en dicha figura (combinadas en cuadratura con las incertidumbres estadísticas). Los efectos sistemáticos más relevantes identificados son la modelización de la resolución en energía del detector en la región de interés y la calibración en energía equivalente de electrón aplicada. El primero de estos efectos se incluye en las barras de error, pero no el segundo, para el cual se ha preferido mostrar resultados independientes, elaborados de forma equivalente, cambiando solamente la estrategia de calibración adoptada:

- (C1) Una calibración en energía equivalente de electrón proporcional a la señal de luz registrada, utilizando como referencia el pico de dispersión inelástica del ^{127}I en 57.6 keVee.
- (C2) Una calibración en energía equivalente de electrón lineal con la señal de luz registrada, determinada mediante los depósitos energéticos producidos por las emisiones de una fuente externa de ^{133}Ba en la región de interés.

Estas dos estrategias de calibración proporcionan resultados incompatibles entre sí para los factores de *quenching* del sodio, como se puede observar en la Figura 10 para un mismo cristal. Sin embargo, al comparar los resultados para los diferentes cristales se obtienen valores totalmente compatibles entre ellos una vez que se fija el mismo procedimiento de calibración. La calibración (C1) reproduce la reducción en los valores de los factores de *quenching* para el sodio que se observa en muchas de las medidas más recientes a bajas energías de retroceso, mientras que la calibración (C2) es compatible con un valor del factor de *quenching* constante, estimado como el promedio de los valores para todos los cristales como $\text{QF}_{\text{Na}} = (21.2 \pm 0.8) \%$.

La identificación de este efecto sistemático relacionado con la calibración en energía es un resultado relevante de este trabajo, que reafirma la necesidad de desarrollar métodos más adecuados para caracterizar la función respuesta a retrocesos nucleares de estos detectores.

Como ya hemos comentado en la Sección 5.1, el NaI(Tl) es un material no proporcional en su emisión de luz en el rango de energías de interés, lo que en primera instancia podría parecer indicar que es mejor el esquema de calibración (C2), no proporcional, frente al proporcional (C1). Sin embargo, tenemos que hacer notar que el rango de energías de interés

en el que se estudian los factores de *quenching* requiere extrapolar la calibración obtenida en el esquema de calibración (C2), lo que introduce cierta incertidumbre en la validez del mismo. Además, los depósitos energéticos correspondientes a la interacción de las emisiones de fuentes externas pueden estar afectados por efectos superficiales o locales en la producción y recogida de luz que podrían generar artefactos a bajas energías, a diferencia de depósitos energéticos distribuidos en el volumen del cristal como los correspondientes al esquema de calibración (C1). Todo esto implica que no podemos en estos momentos establecer el comportamiento de los factores de *quenching* del centelleo para núcleos de sodio con la energía, y que se requiere, por lo tanto, mejorar las estrategias para calibrar los experimentos en este rango energético y desarrollar mejores modelos del centelleo del NaI(Tl). Una de las líneas de investigación dentro del proyecto ANAIS es el desarrollo de un programa de calibración periódica con fuentes de neutrones de los cristales de ANAIS-112, durante su operación. Estas calibraciones, combinadas con los resultados derivados de las medidas en TUNL, esperamos que proporcionen información relevante sobre la función respuesta de los detectores a retrocesos nucleares, como se detalla un poco más adelante en esta misma sección.

En cuanto a la determinación del factor de *quenching* del centelleo para los núcleos de yodo, el método previamente explicado, utilizado para determinar el factor de *quenching* de los núcleos de sodio, no es aplicable ya que los picos correspondientes no eran identificables al corresponder a energías equivalentes de electrón muy pequeñas. En este caso, se adoptó un procedimiento diferente, analizando la posición del pico de dispersión inelástica de ^{127}I , que consiste en la suma del depósito energético del fotón de desexcitación nuclear de 57.6 keVee y la energía de retroceso del núcleo de yodo. Se puede observar en la Figura 13 un desplazamiento en la posición del pico cuando se comparan datos seleccionados para ángulos de dispersión del neutrón (BD *channels* 0 y 17 en la figura) en los que se espera la máxima contribución de energías de retroceso nuclear con aquellos en los que la energía de retroceso esperada es despreciable (BD *channels* 8 y 9). Dicho desplazamiento permite derivar como resultado $QF_I = (6.0 \pm 2.2)\%$ para los cristales 2 y 3, mientras que en los restantes cristales, los datos solo han permitido establecer límites superiores al factor de *quenching*, compatibles con dicho valor.

Recientemente, utilizando las mismas instalaciones en TUNL, se ha iniciado un programa de medidas muy interesante que complementa estos resultados. Su objetivo es medir los factores de *quenching* para cristales de NaI(Tl) con diferente dopaje de talio, entre 0.1 y 0.9%. Los resultados preliminares han sido presentados recientemente [Bha2023],

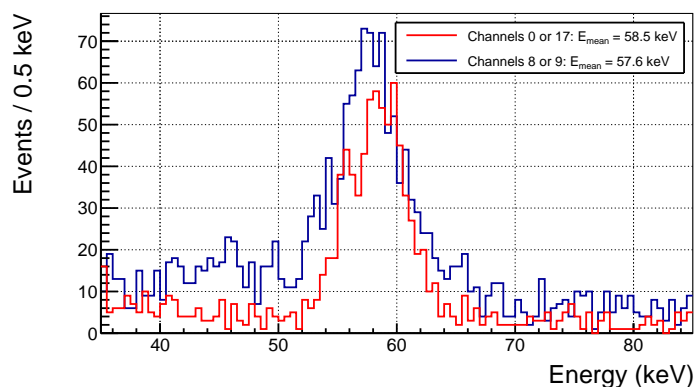


Figura 13: Desplazamiento en la posición del pico de dispersión inelástica del ^{127}I para el cristal 3 al seleccionar ángulos de dispersión del neutrón en los que se espera la máxima contribución de energías de retroceso nuclear (BD *channels* 0 y 17, línea roja) frente a los tomados como referencia (BD *channels* 8 y 9, línea azul), en los que la energía de retroceso esperada es despreciable. Figura tomada de [Cin2023].

reportando para todos los cristales medidos valores del factor de *quenching* del sodio compatible con 0.2 y constante, cuando se utiliza un esquema de calibración con varias líneas de energía próxima a la región de interés, siguiendo un planteamiento similar al método de calibración (C2), propuesto en [Cin2021, Cin2023]. En caso de confirmarse estos resultados, habría más apoyo para la hipótesis de que el factor de *quenching* en el NaI(Tl) tiene un carácter intrínseco y no parece depender de las impurezas, contenido en talio o método de crecimiento de los cristales. Pero todavía hacen falta más datos antes de poder extraer conclusiones sólidas.

Como ya hemos comentado antes, dentro del proyecto ANAIS hay un programa de calibración con neutrones en desarrollo usando fuentes radiactivas de baja actividad de ^{252}Cf en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. La fuente se coloca en el exterior del blindaje, lo que hace que no llegue la radiación gamma a los detectores, y que domine la dispersión elástica de los neutrones en los núcleos de sodio y yodo. El gran tamaño de los detectores de ANAIS-112 hace que esta medida esté dominada por la dispersión múltiple de los neutrones. Resulta fundamental, por tanto, para interpretar los resultados de la medida, disponer de un modelo detallado y adecuado del dispositivo experimental completo. ANAIS-112 dispone de este modelo, desarrollado en el marco del paquete de simulación GEANT4 [Ago2003] que permite reproducir adecuadamente la respuesta del detector a retrocesos nucleares. Cada depósito de energía se corrige por el factor de *quenching* adecuado a la energía depositada y el tipo de partícula, de modo que pueden ser puestos a prueba diferentes modelos de factores de *quenching*, comparando los datos experimentales con los resultados de la simulación. Este trabajo está en curso, siendo complementario a las medidas realizadas bajo irradiación con neutrones cuasi-monoenergéticos, y ha proba-

do ser sensible a los diferentes modelos de *quenching* posibles (constante vs. dependiente de la energía), tanto para los retrocesos nucleares de sodio como de yodo en NaI(Tl). Como se muestra en la Figura 14, los análisis preliminares [Par2023] apuntan a que se consigue un mejor acuerdo cuando se utilizan modelos de factor de *quenching* dependiente de la energía para los núcleos de sodio.

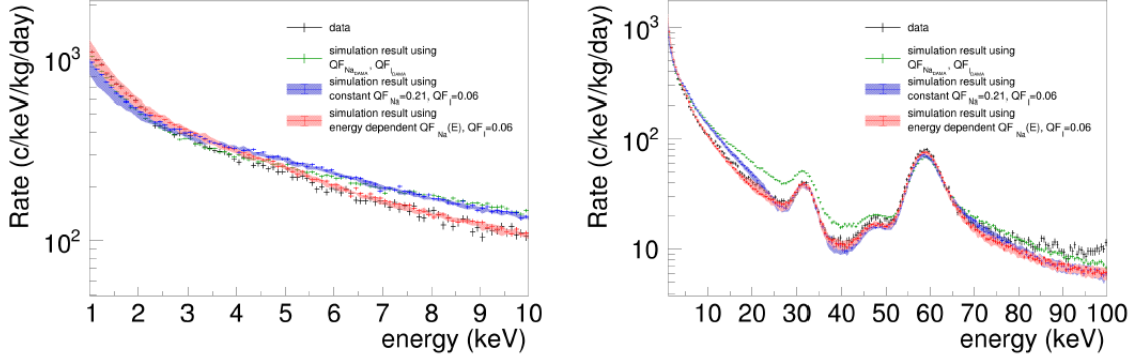


Figura 14: Comparación de los espectros medidos en ANAIS-112 bajo irradiación con la fuente de ^{252}Cf en el LSC (negro) con los correspondientes espectros simulados para los diferentes modelos de factores de *quenching* considerados: en verde si se toman los valores constantes ($QF_{Na}=0.3$ y $QF_I=0.09$) reportados por el experimento DAMA/LIBRA, en azul un factor de *quenching* constante con la energía de $QF_{Na}=0.2$ y en rojo un factor de *quenching* dependiente de la energía para el sodio como el mostrado en la Figura 10. $QF_I=0.06$ en estos dos últimos casos. Las incertidumbres se muestran como bandas sombreadas. En el panel de la izquierda se muestra la región de baja energía (por debajo de 10 keVee) y en el de la derecha, la región de energías hasta 100 keVee. Figura tomada de [Par2023].

La colaboración DAMA/LIBRA presenta sus resultados en energía equivalente de electrón, y de este modo, la incompatibilidad observada entre los resultados de ANAIS-112 (ver Sección 4.1.3) y los de DAMA/LIBRA (Sección 4.1.1) sólo es válida en el caso de que la partícula de materia oscura interactúe transfiriendo energía a los electrones del material, que no es el escenario preferido para la mayoría de los candidatos WIMP (ver Sección 3) o en el caso de que los factores de *quenching* del centelleo sean una propiedad intrínseca del material, lo cual no está todavía establecido. COSINE-100 consideró el efecto que tendrían diferentes factores de *quenching* en la comparación con DAMA/LIBRA [Adh2021a], pero en un enfoque dependiente del modelo de WIMP y halo, es decir, planteando escenarios concretos para el acoplamiento de los WIMPs. Resulta más complicado incorporar las incertidumbres en el conocimiento de los factores de *quenching* en el análisis independiente de modelos, sobre todo en el caso de que el factor de *quenching* sea dependiente de la energía. En el caso de que el factor de *quenching* sea constante, bastaría con modificar las regiones consideradas en el análisis (en energía equivalente de electrón). Dado que los valores de los factores de *quenching* para el sodio y yodo considerados por DAMA/LIBRA

son 0.3 y 0.09, respectivamente, mientras que los estimados por ANAIS-112, son 0.2 y 0.06, resulta la misma relación entre ellos para los dos núcleos, $QF_{\text{DAMA/LIBRA}}/QF_{\text{ANAIS}}=3/2$. Esto implica que el rango de [2–6] keVee de DAMA/LIBRA correspondería con el rango [1.3–4] keVee de ANAIS-112, si queremos trabajar en la misma región en términos de energía de retroceso nuclear. De forma equivalente, la región [1–6] keVee se convierte en [0.7–4] keVee, que por el momento está por debajo del umbral de análisis de ANAIS-112.

Es preciso que la colaboración DAMA/LIBRA determine los factores de *quenching* de sus cristales utilizando un método más robusto que el seguido en [Ber1996]. En su análisis, se partía de la suposición de que los factores de *quenching* eran constantes, por lo que sus resultados están afectados por sistemáticos relevantes. Es también fundamental mejorar en la comprensión de los sistemáticos puestos en evidencia por los resultados de las medidas de los factores de *quenching* en TUNL y desarrollar métodos de calibración robustos, tanto para retrocesos electrónicos como nucleares en la región de interés. ANAIS-112 va a reanalizar los datos de modulación anual considerando también la región de [1.3–4] keVee, como primer paso para intentar evaluar los efectos sistemáticos relacionados con los diferentes factores de *quenching* utilizados en el test del resultado de DAMA/LIBRA.

6. Retos que afrontan los detectores de centelleo basados en NaI

Los detectores de NaI(Tl) con lectura óptica basada en PMTs pueden ser considerados detectores de radiación *estado del arte*. Sin embargo, sus prestaciones en su aplicación en búsquedas de sucesos poco probables apenas han progresado en las dos últimas décadas. Estos detectores todavía pueden jugar un papel importante en la detección directa de materia oscura, la medida de la dispersión coherente de neutrinos, la detección de axiones solares o de supernovas, etc. Por este motivo, hay en curso esfuerzos importantes por mejorar la sensibilidad de los detectores que utilizan NaI(Tl) o NaI sin dopar como blanco.

En primer lugar, la radiopureza de los cristales de DAMA/LIBRA no ha sido todavía mejorada por ningún otro experimento, aunque SABRE, PICOLON y COSINE-200 están progresando con paso firme en esta dirección y la consecución de este objetivo parece encontrarse ya relativamente próxima. Las tres colaboraciones han diseñado de forma independiente protocolos para el crecimiento de cristales con condiciones que minimicen las contaminaciones de ^{40}K y ^{210}Pb [Sue2020, Sue2021, Fus2021b]. Se requiere utilizar un polvo radiopuro de partida, pero también un entorno de ultra-bajo fondo radiactivo para la realización de todas las etapas del proceso de fabricación de un detector: crecimiento del

crystal, corte y pulido, encapsulado, acoplo óptico a ventanas de cuarzo y/o PMTs, etc. Los procedimientos de purificación del polvo se aplican habitualmente de forma independiente del proceso de crecimiento de la estructura cristalina, por lo que hay que evitar que durante esta última fase se re-contamine el material. Es, por lo tanto, fundamental controlar la radiopureza del crisol, así como la posible presencia de gas radón en la atmósfera de los espacios de trabajo. Técnicas como el refinado por zonas y la recristalización pueden contribuir de forma importante a conseguir cristales con mayor radiopureza [Sue2021]. En la actualidad, la contaminación de ^{40}K parece bajo control, pero sin embargo, reducir la contaminación de ^{210}Pb en cristales de gran tamaño, probablemente asociada a la presencia de radón en el aire, ha probado ser una tarea compleja.

Por otro lado, isótopos cosmogénicamente activados en los cristales y otros componentes de los detectores se producen de forma continua mientras cualquiera de estos materiales se encuentra en la superficie terrestre. Esto es particularmente relevante cuando el lugar de fabricación se encuentra en un lugar con elevada altitud sobre el nivel del mar, como ocurre en Grand Junction, Colorado, E.E.U.U., donde la empresa Alpha Spectra tiene sus instalaciones, ya que los flujos de radiación cósmica capaz de activar los materiales son más altos. Sería muy interesante, por tanto, disponer de instalaciones subterráneas en las que crecer los cristales de $\text{NaI}(\text{Tl})$, apantallados adecuadamente de la radiación cósmica durante todo el proceso. En el caso de los detectores de ANAIS-112, por ejemplo, una parte importante del fondo del experimento en la región de interés se ha asociado a la presencia de tritio, producido cosmogénicamente [Ama2018], pero muchos otros isótopos de vidas medias más cortas están también presentes [Ama2015]. Son estos isótopos (junto con el ^{210}Pb) los que explican el fondo exponencialmente decreciente en el tiempo observado por los experimentos COSINE-100 y ANAIS-112 [Ama2020, Adh2021b]. Hay varios proyectos en curso para crecer cristales de $\text{NaI}(\text{Tl})$ en instalaciones subterráneas, que podrían producir cristales altamente radiopuros, sin estas contribuciones cosmogénicas. Uno de estos proyectos tiene previsto utilizar las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc con este fin. Las correspondientes actividades, en las que colaborarán los investigadores de ANAIS, se iniciarán previsiblemente a lo largo de 2024.

En segundo lugar, una de las principales limitaciones en la actualidad para la aplicación de los detectores de $\text{NaI}(\text{Tl})$ en las búsquedas de sucesos poco probables es el sensor de luz utilizado típicamente, el PMT. Reemplazar los PMTs por SiPMs (fotomultiplicadores de Silicio) tendría algunas ventajas muy importantes: menor masa total del sensor, que se asocia con menor contribución al fondo radiactivo debido a la menor cantidad

de contaminantes, que escalan con la masa del componente; eficiencia cuántica similar, incluso mayor en algunos casos, para la longitud de onda correspondiente a la emisión de centelleo del NaI(Tl); y sobre todo, porque sucesos de luz espurios, cuyo origen se asocia con los PMTs, podrían ser evitados. Una parte de ellos podría estar asociado con el hecho de que los tubos PMTs sean operados con altos voltajes (del orden de 1 kV), mientras que los SiPMs lo hacen en el rango de unos 10 V. Por otro lado, los SiPMs también ofrecen algunas desventajas: están afectados por un ritmo oscuro mucho mayor que los PMTs a temperatura ambiente, por ejemplo, lo que limita de forma importante su aplicación en el estudio de procesos en los que se emite un bajo número de fotones, es decir, correspondientes a depósitos de muy poca energía. Operando los SiPMs a baja temperatura se han obtenido, sin embargo, muy buenos resultados, alcanzando ritmos de sucesos oscuros inferiores a los de los PMTs.

Hay en curso diversos proyectos para desarrollar una nueva lectura de la luz en cristales de NaI/NaI(Tl) mediante SiPMs: el proyecto ASTAROTH en Italia [DAn2022], el proyecto ANAIS+ en la Universidad de Zaragoza, y también ha trabajado en esta línea la colaboración COSINE [Lee2022].

ANAIS+ es parte del proyecto ANAIS y tiene como objetivo desarrollar un prototipo de NaI intrínseco o dopado con talio acoplado a SiPMs y operado a temperaturas de unos 100 K, tratando de aprovechar el bajo ritmo oscuro de los SiPMs y el incremento en la emisión de luz que se espera (al menos para el NaI intrínseco) a dicha temperatura [Cor2013]. Esta nueva tecnología de detección se espera que permita mejorar la luz recogida por unidad de energía depositada, posibilitando alcanzar mejores umbrales en energía (por debajo de 1 keVee), así como diseñar sistemas más compactos que los que utilizan PMTs para la lectura óptica, con una alta radiopureza. Además, abre el camino para plantear la operación de estos detectores dentro de un baño de argón o xenón líquido que actuaría simultáneamente como baño térmico y veto activo/blindaje del experimento, permitiendo añadir una estrategia adicional para el rechazo de fondos radiactivos residuales. En la actualidad, los primeros prototipos de ANAIS+ están en periodo de pruebas en una instalación criogénica que permite hacer medidas hasta -30°C , mientras se termina la puesta a punta de un nuevo refrigerador que permitirá alcanzar el rango de 100 K y desarrollar un programa completo para la evaluación de las prestaciones de estos prototipos. En una fase posterior se realizarán pruebas en entorno subterráneo y dentro de un tanque de argón líquido.

En tercer lugar, hay una aproximación totalmente diferente de la detección de partículas utilizando este material como blanco, la seguida por el experimento COSINUS, que se aprovecha de la medida simultánea de la luz y el calor producidos en la interacción de una partícula en el yoduro de sodio cuando se opera en el rango de temperatura de los milikelvin. A causa de las propiedades de este material, con bajo punto de fusión y altamente higroscópico, la colaboración COSINUS ha desarrollado una nueva estrategia de detección para el canal de medida del calor: el diseño *remoTES*, un termómetro basado en una transición de fase superconductor (TES, Transition Edge Sensor) que se deposita sobre un sustrato cristalino que luego se acoplará térmicamente al cristal de yoduro de sodio [Ang2023, Ein2023]. Para el canal de medida de la luz se utiliza un bolómetro de silicio convencional. Entre las ventajas de usar esta técnica en la detección directa de materia oscura podemos mencionar, en primer lugar, una muy superior sensibilidad a los depósitos de energía en forma de retroceso nuclear en el canal de calor, que prácticamente elimina la dependencia del conocimiento de los factores de *quenching* para el centelleo, que como se ha mencionado en la Sección 5.2 es un efecto sistemático muy relevante. Además, esta técnica posibilita un ultra-bajo umbral en energías, así como la capacidad de rechazar los fondos beta/gamma. Sin embargo, los detectores no pueden ser muy masivos, por lo que alcanzar una alta exposición (producto de masa por tiempo de detección) va a resultar complicado. En todo caso, cualquier nueva aproximación experimental puede ofrecer resultados muy interesantes al permitir el acceso a un territorio previamente inexplorado.

Todas estas nuevas y diferentes estrategias para actualizar los detectores de yoduro de sodio en desarrollo en la actualidad ofrecen interesantes perspectivas de cara a su aplicación al estudio de otros fenómenos interesantes, como puede ser la dispersión coherente de neutrinos. Optimizar el funcionamiento de los detectores de radiación y partículas, abriendo nuevos rangos de operación y mejorando su sensibilidad, puede permitirnos hacer visibles fenómenos que antes eran invisibles, y encontrar aplicaciones que antes ni se habían imaginado. Aunque los experimentos de detección directa no encuentren nunca la materia oscura, el camino habrá servido para progresar en muchos otros campos, al haber posibilitado un avance crucial en el desarrollo de detectores de radiación y partículas con prestaciones avanzadas.

7. Resumen y conclusiones

Los detectores de yoduro de sodio tienen aplicaciones en numerosos campos, entre ellos las búsquedas de sucesos poco probables. Estos detectores todavía pueden jugar un papel interesante en la detección directa de materia oscura, complementario al de otras técnicas de detección, ya que una estrategia basada en múltiples núcleos blanco y técnicas puede permitir lidiar con las numerosas incógnitas e incertidumbres presentes en la señal buscada, además de cerrar de una vez por todas la situación suscitada por la modulación anual observada por el experimento DAMA/LIBRA, que desde hace más de 20 años no ha sido ni confirmada ni refutada.

Sin embargo, es preciso incorporar mejoras en la tecnología asociada a la medida del centelleo en yoduro de sodio para conseguir una sensibilidad competitiva de estos detectores. En particular, la introducción de los SiPMs como sensores de luz, reemplazando a los PMTs, y el desarrollo de técnicas específicas de crecimiento y fabricación de cristales en condiciones de alta radiopureza, resultan fundamentales. Trabajar a baja temperatura, tanto en la aproximación experimental seguida por la colaboración COSINUS, como por los proyectos ANAIS+ y ASTAROTH, puede llevar asociada una importante mejora en sensibilidad al abrir el camino a umbrales energéticos por debajo de 1 keVee. En este escenario, el yoduro de sodio podría llegar a ser un blanco competitivo en la búsqueda de materia oscura consistente en WIMPs ligeros y con acoplamientos dependientes del espín, pero también para experimentos dedicados al estudio de la dispersión coherente de neutrinos, por ejemplo.

Me gustaría terminar este discurso con una reflexión final. La situación generada por el resultado de DAMA/LIBRA, que no ha podido ser confirmado ni refutado durante más de 20 años por otros experimentos indica la existencia de sesgos importantes en la aplicación del método científico, como no puede ser de otra manera ya que la Ciencia es reflejo de la sociedad que la sustenta. El resultado, desde los primeros indicios de una observación de modulación, fue puesto en duda por una parte importante de la comunidad científica pero no se propusieron esfuerzos dedicados a su confirmación o refutación. Durante muchos años, el proyecto ANAIS fue el único proyecto con ese objetivo: intentar confirmar o refutar el resultado de DAMA/LIBRA de una forma independiente de modelos, utilizando para ello el mismo material blanco. Fue complicado obtener financiación y es que, reproducir un

resultado no da rédito científico y los resultados negativos no son tampoco muy atractivos de cara a su publicación en una revista de impacto. Este tipo de sesgos dificulta uno de los principales aspectos del método científico, la reproducibilidad de cualquier resultado.

Es fundamental impulsar y desarrollar desde todos los frentes posibles el diseño de estrategias de ciencia abierta. Es preciso que se extienda la cultura de compartir los datos de los experimentos y no solo la publicación de los resultados en artículos. Esto requiere buscar formatos adecuados para compartir tanto los datos directos como las herramientas de análisis aplicadas, y sobre todo, poner en valor las buenas prácticas que potencian la transparencia y reproducibilidad, para reducir los efectos de los sesgos de análisis que afectan a la interpretación de muchos resultados experimentales. ANAIS-112 tiene previsto publicar todos los datos en abierto, acompañados por códigos adecuados para que se puedan reproducir todos los resultados publicados, como ya se ha hecho con los datos de los tres primeros años [Ama2021], que están disponibles en la web mantenida por el *ORIGINS Excellence Cluster*: <https://www.origins-cluster.de/odsl/dark-matter-data-center/available-datasets/anais>.

Agradecimientos

El proyecto ANAIS ha recibido financiación de MCIN/AEI/10.13039/501100011033, vía los proyectos PID2022-138357NB-C21 y PID2019-104374GB-I00; de MINECO-FEDER vía los proyectos FPA2017-83133-P y FPA2014-55986-P; del Gobierno de Aragón y el Fondo Social Europeo.

Este discurso se apoya en un trabajo colectivo de un gran equipo de investigación a lo largo de muchos años. Sirvan estas palabras para agradecer a todos los que han colaborado en el experimento ANAIS en cualquiera de sus etapas.

Referencias

- [Abb2022] Abbott T.M.C.; *et al.*, Dark Energy Survey Year 3 results: Cosmological constraints from galaxy clustering and weak lensing, *Phys. Rev. D* **105**, 023520 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.023520>.
- [Abd2019] Abdelhameed, A.H.; *et al.* (CRESST Collaboration), First results from the CRESST-III low-mass dark matter program, *Phys. Rev. D* **100**, 102002 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.102002>.

- [Abr2017] Abrahao, T.; *et al.*, Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors, JCAP **02**, 017 (2017). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/02/017>.
- [Ada2010a] Adamson, P.; *et al.*, Observation of muon intensity variations by season with the MINOS far detector, Phys. Rev. D **81**, 012001 (2010). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.012001>.
- [Ada2010b] Adamson, P.; *et al.*, Observation of muon intensity variations by season with the MINOS near detector, Phys. Rev. D **90**, 012010 (2014). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.012010>.
- [Ada2022] Adari, P.; *et al.*, EXCESS workshop: Descriptions of rising low-energy spectra, SciPost Phys. Proc. **9**, 001 (2022). <https://doi.org/10.21468/SciPostPhysProc.9.001>.
- [Adh2018] Adhikari, G.; *et al.*, An experiment to search for dark matter interactions using sodium iodide detectors, Nature **564**, 7734, 83 (2018). Erratum: Nature **566** E2 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0739-1>.
- [Adh2019] Adhikari, G.; *et al.*, Search for a Dark Matter-Induced Annual Modulation Signal in NaI(Tl) with COSINE-100 Experiment, Phys. Rev. Lett. **123**, 031302 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.031302>.
- [Adh2021a] Adhikari, G.; *et al.*, Strong constraints from COSINE-100 on the DAMA dark matter results using the same sodium iodide target, Sci. Adv. **7**, 46 (2021). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abk2699>.
- [Adh2021b] Adhikari, G.; *et al.*, Three-year annual modulation search with COSINE-100, Phys. Rev. D **106**, 052005 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.052005>.
- [Adh2021c] Adhikari, G. *et al.*, Background modeling for dark matter search with 1.7 years of COSINE-100 data. Eur. Phys. J. C **81**, 837 (2021). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09564-0>
- [Adh2023] Adhikari, G.; *et al.*, An induced annual modulation signature in COSINE-100 data by DAMA/LIBRA's analysis method, Sci. Rep. **13** 4676 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31688-4>.
- [Aga2019a] Agafonova, N.Yu.; *et al.*, Characterization of the varying flux of atmospheric muons measured with the Large Volume Detector for 24 years, Phys. Rev. D **100**, 062002 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.062002>.

- [Aga2019b] Agafonova, N.Yu.; *et al.*, Measurement of the cosmic ray muon flux seasonal variation with the OPERA detector, JCAP **10**, 003 (2019). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/10/003>.
- [Agn2014] Agnese, R.; *et al.* (SuperCDMS Collaboration), Search for low-mass weakly interacting massive particles with SuperCDMS, Phys. Rev. Lett. **112**, 241302 (2014). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.241302>.
- [Agn2019] Agnese, R.; *et al.*, Search for low-mass dark matter with CDMSlite using a profile likelihood fit, Phys. Rev. D **99**, 062001 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.062001>.
- [Agn2018a] Agnes, P.; *et al.* (DarkSide Collaboration), DarkSide-50 532-d dark matter search with low-radioactivity argon, Phys. Rev. D **98** 102006 (2018). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.102006>.
- [Agn2018b] Agnes, P.; *et al.* (DarkSide Collaboration), Low-mass dark matter search with the DarkSide-50 experiment, Phys. Rev. Lett. **121** 081307 (2018). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.081307>.
- [Ago2003] Agostinelli, S.; *et al.*, GEANT4—a simulation toolkit, Nucl. Instrum. Meth. A **506**, 250 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [Ago2016] Agostini, M.; *et al.*, Flux modulations seen by the muon veto of the GERDA experiment, Astropart. Phys. **84**, 29 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.08.002>.
- [Ago2019] Agostini, M.; *et al.*, Modulations of the cosmic muon signal in ten years of Borexino data, JCAP **02**, 046 (2019). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/02/046>.
- [Agu2020] Aguilar-Arevalo, A.; *et al.*, Results on low-mass weakly interacting massive particles from a 11 kg d target exposure of DAMIC at SNOLAB, Phys. Rev. Lett. **125**, 241803 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.241803>.
- [Agu2023] Aguilar-Arévalo, A.; *et al.* (DAMIC Collaboration), (DAMIC, DAMIC-M, SENSEI Collaborations), Confirmation of the spectral excess in DAMIC at SNOLAB with skipper CCDs, arXiv:2306.01717 (2023) [astro-ph.CO]. <https://arxiv.org/abs/2306.01717>.
- [Aja2019] Ajaj, R.; *et al.*, Search for dark matter with a 231 d exposure of liquid argon using DEAP-3600 at SNOLAB, Phys. Rev. D **100**, 022004 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.022004>.

- [Ake2017] Akerib, D.; *et al.* (LUX Collaboration), Results from a search for dark matter in the complete LUX exposure, Phys. Rev. Lett. **118**, 021303 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.021303>.
- [Ake2019] Akerib, D.; *et al.* (LUX Collaboration), Results of a search for sub-GeV dark matter using 2013 LUX data, Phys. Rev. Lett. **122**, 131301 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.131301>.
- [Ala2021] Alam, Sh.; *et al.*, Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory, Phys. Rev. D **103**, 083533 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.083533>.
- [Ama2015] Amaré, J.; *et al.*, Cosmogenic radionuclide production in NaI(Tl) crystals, JCAP **02**, 046 (2015). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/02/046>.
- [Ama2016] Amaré, J.; *et al.*, Assessment of backgrounds of the ANAIS experiment for dark matter direct detection, Eur. Phys. J. C **76**, 429 (2016). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4279-2>.
- [Ama2018] Amaré, J.; *et al.*, Cosmogenic production of tritium in dark matter detectors, Astrop. Phys. **97**, 96 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.11.004>.
- [Ama2019a] Amaré, J.; *et al.*, Performance of ANAIS-112 experiment after the first year of data taking, Eur. Phys. J. C **79**, 228 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6697-42>.
- [Ama2019b] Amaré, J.; *et al.*, Analysis of backgrounds for the ANAIS-112 dark matter experiment, Eur. Phys. J. C **79**, 412 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6911-4>.
- [Ama2019c] Amaré, J.; *et al.*, First results on dark matter annual modulation from ANAIS-112 experiment, Phys. Rev. Lett. **123**, 031301 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.031301>.
- [Ama2020] Amaré, J.; *et al.*, ANAIS-112 status: two years results on annual modulation, J. Phys.: Conf. Ser. **1468**, 012014 (2020). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012014>.
- [Ama2021] Amaré, J., *et al.*, Annual modulation results from three-year exposure of ANAIS-112, Phys. Rev. D **103**, 102005 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.102005>.

- [Ama2022] Amaré, J.; *et al.*, Dark Matter Searches using NaI(Tl) at the Canfranc Underground Laboratory: Past, Present and Future, *Universe* **8**, 2, 75 (2022). <https://doi.org/10.3390/universe8020075>.
- [Amb1997] Ambrosio, M.; *et al.*, Seasonal variations in the underground muon intensity as seen by MACRO, *Astropart. Phys.* **7**, 109 (1997). [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(97\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(97)00011-X).
- [An2018] An, F.P.; *et al.*, Seasonal variation of the underground cosmic muon flux observed at Daya Bay, *JCAP* **01**, 001 (2018). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/01/001>.
- [Ang2016] Angloher, G.; *et al.*, The COSINUS project - perspectives of a NaI scintillating calorimeter for dark matter search. *Eur. Phys. J. C* **76**, 441 (2016). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4278-3>.
- [Ang2017] Angloher, G.; *et al.* (CRESST Collaboration), Results on MeV-scale dark matter from a gram-scale cryogenic calorimeter operated above ground, *Eur. Phys. J. C* **77**, 637 (2017). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5223-9>.
- [Ang2023] Angloher, G.; *et al.*, Particle discrimination in a NaI crystal using the COSINUS remote TES design, arXiv:2307.11066 [physics.ins-det] (2023). <https://arxiv.org/abs/2307.11066>.
- [Ant2019] Antonello, M.; *et al.*, The SABRE project and the SABRE Proof-of-Principle, *Eur. Phys. J. C* **79**, 36 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6860-y>.
- [Ant2023] Antel, C.; *et al.*, Feebly Interacting Particles: FIPs 2022 workshop report, hep-ph 2305.01715. <https://arxiv.org/abs/2305.01715>.
- [Apr2016] Aprile, E.; *et al.* (XENON Collaboration), XENON100 dark matter results from a combination of 477 live days, *Phys. Rev. D* **94**, 122001 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.122001>.
- [Apr2018] Aprile, E.; *et al.* (XENON Collaboration), Dark matter search results from a one ton-year exposure of XENON1T, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 111302 (2018). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.111302>.
- [Apr2019a] Aprile, E.; *et al.* (XENON Collaboration), Search for light dark matter interactions enhanced by the Migdal effect or bremsstrahlung in XENON1T, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 241803 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.241803>.

- [Apr2019b] Aprile, E.; *et al.* (XENON Collaboration), Light dark matter search with ionization signals in XENON1T, Phys. Rev. Lett. **123**, 251801 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.251801>.
- [Apr2020a] Aprile, E.; *et al.* (XENON Collaboration), Excess electronic recoil events in XENON1T. Phys. Rev. D **102**, 072004 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.072004>.
- [Apr2020b] Aprile, E.; *et al.* (XENON Collaboration), Search for coherent elastic scattering of solar ^8B neutrinos in the XENON1T dark matter experiment, Phys. Rev. Lett. **126**, 091301 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.091301>.
- [Apr2023] Aprile, E.; *et al.* (XENON Collaboration), First Dark Matter Search with Nuclear Recoils from the XENONnT Experiment, Phys. Rev. Lett. **131**, 4, 041003 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.041003>.
- [Arm2016] Hehn, L.; *et al.* (EDELWEISS Collaboration), Searching for low-mass dark matter particles with a massive Ge bolometer operated above-ground, Phys. Rev. D **99**, 082003 (2019). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.082003>.
- [Arn2018] Arnaud, Q.; *et al.* (NEWS-G Collaboration), First results from the NEWS-G direct dark matter search experiment at the LSM, Astropart. Phys. **97**, 54 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.10.009>.
- [Ber1996] Bernabei, R.; *et al.*, New limits on WIMP search with large-mass low-radioactivity NaI(Tl) set-up at Gran-Sasso, Phys. Lett. B **389**, 757 (1996). [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(96\)80020-7](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(96)80020-7).
- [Ber1999] Bernabei, R.; *et al.*, On a further search for a yearly modulation of the rate in particle dark matter direct search, Phys. Lett. B **450**, 448 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(99\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(99)00091-X)
- [Ber2000] Bernabei, R.; *et al.*, Search for WIMP annual modulation signature: results from DAMA/NaI-3 and DAMA/NaI-4 and the global combined analysis, Phys. Lett. B **480**, 23 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(00\)00405-6](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(00)00405-6)
- [Ber2008a] Bernabei, R.; *et al.*, First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI, Eur. Phys. J. C **56**, 333 (2008). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-008-0662-y>.
- [Ber2008b] Bernabei, R.; *et al.*, The DAMA/LIBRA apparatus, Nucl. Instrum. Meth. A **592**, 297 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.04.082>.

- [Ber2012] Bernabei, T.; *et al.*, Performances of the new high quantum efficiency PMTs in DAMA/LIBRA, JINST **7**, P03009 (2012). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/7/03/P03009>.
- [Ber2018] Bertone, G; Hooper, D., History of dark matter, Rev. Mod. Phys. **90**, 045002 (2018). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.045002>.
- [Ber2018a] Bernabei, R.; *et al.*, First model independent results from DAMA/LIBRA-phase2, Nucl. Phys. At. Energy **19**, 307 (2018). <https://doi.org/10.15407/jnpae2018.04.307>.
- [Ber2018b] Bernabei, R.; *et al.*, First model independent results from DAMA/LIBRA-phase2, Universe **4**, 116 (2018). <https://doi.org/10.3390/universe4110116>.
- [Ber2020] Bernabei, R.; *et al.*, The DAMA project: Achievements, implications and perspectives, Prog. Part. Nucl. Phys. B **114**, 103810 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2020.103810>.
- [Bha2023] Bharadwaj, M.R.; *et al.*, Quenching Factor estimation of Na recoils in NaI(Tl) crystals using a low-energy pulsed neutron beam measurement, SciPost Phys. Proc. **12**, 028 (2023). <https://doi.org/10.21468/SciPostPhysProc.12.028>.
- [Big2021] Bignell, L.J.; *et al.*, Quenching factor measurements of sodium nuclear recoils in NaI:Tl determined by spectrum fitting, JINST **16**, 07034 (2021). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/P07034>.
- [Bil2021] Billard, J.; *et al.*, Direct Detection of Dark Matter - APPEC Committee Report, Rept. Prog. Phys. **85**, 5, 056201 (2022). <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ac5754>.
- [Bir1964] Birks, J.B., The Theory and Practice of Scintillation Counting, Pergamon 1964, ISBN: 978-0-08-010472-0. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-01791-4>.
- [Buc2017] Buchmueller, O.; Doglioni, C.; Wang, L.T., Search for dark matter at colliders, Nat. Phys. **13**, 217 (2017). <https://doi.org/10.1038/nphys4054>.
- [But2020] Buttazzo, D., Panci, P., Rossi, N., Strumia, A., Annual modulations from secular variations: relaxing DAMA?, JHEP **04**, 137 (2020). [https://doi.org/10.1007/JHEP04\(2020\)137](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2020)137).
- [Cal2022] Calaprice, F.; *et al.*, Performance of the SABRE detector module in a purely passive shielding, Eur. Phys. J. C **82**, 12, 1158 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-11108-z>.

- [Ceb2002] Cebrián, S., 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). Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, enero 2002.
- [Ceb2012] Cebrián, S.; *et al.*, Background model for a NaI(Tl) detector devoted to dark matter searches, *Astrop. Phys.* **37**, 60 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.07.009>.
- [Cha2008] Chagani, H.; *et al.*, Measurement of the quenching factors of Na recoils in NaI(Tl), *JINST* **3**, 06003 (2008). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/06/P06003>.
- [Cho2008] Choong, W.S.; *et al.*, Design of a facility for measuring scintillator non-proportionality, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55**, 1753 (2008).
- [Cin2021] Cintas, D.; *et al.*, Quenching factor consistency across several NaI(Tl) crystals, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2156**, 012065 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2156/1/012065>.
- [Cin2023] Cintas, D., New strategies to improve the sensitivity of the ANAIS-112 experiment at the Canfranc Underground Laboratory. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, septiembre 2023. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.110.014613>.
- [Cin2024] Cintas, D.; *et al.*, A measurement of the sodium and iodine scintillation quenching factors across multiple NaI(Tl) detectors to identify systematics, *Phys. Rev. C.* **110**, 014613 (2024). <https://arxiv.org/abs/2402.12480>.
- [Coa2019] Coarasa, I.; *et al.*, ANAIS-112 sensitivity in the search for dark matter annual modulation, *Eur. Phys. J. C* **79**, 233 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6733-4>.
- [Coa2021] Coarasa, I., ANAIS-112. Searching for the Annual Modulation of Dark Matter with a 112.5 kg NaI(Tl) Detector at the Canfranc Underground Laboratory. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, diciembre 2021.
- [Coa2022] Coarasa, I.; *et al.*, Improving ANAIS-112 sensitivity to DAMA/LIBRA signal with machine learning techniques, *JCAP* **11** 048 (2022). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2022/11/048> Erratum: *JCAP* **06** E01 (2023). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2023/06/E01>.
- [Coa2023] Coarasa, I.; *et al.*, ANAIS-112: updated results on annual modulation with three-year exposure, *Proceedings of Science* **441** [TAUP2023] 041. <https://pos.sissa.it/441/041/>.

- [Col2005] Cole, S.; *et al.*, The 2dF Galaxy Reshift Survey: power-spectrum analysis of the final data set and cosmological implications, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **362**, 505 (2005). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09318.x>.
- [Col2013] Collar, J.I., Quenching and channeling of nuclear recoils in NaI(Tl): implications for dark-matter searches, *Phys. Rev. C* **88**, 035806 (2013). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.88.035806>.
- [Con2017] Conrad, J.; Reiner, O., Indirect dark matter searches in gamma and cosmic rays, *Nat. Phys.* **13**, 224 (2017). <https://doi.org/10.1038/nphys4049>.
- [Cor2013] Coron, N.; *et al.*, Study of Parylene-coated NaI(Tl) at low temperatures for bolometric applications, *Astrop. Phys.* **47**, 31 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.06.001>.
- [Cue2013a] Cuesta, C.; *et al.*, Slow scintillation time constants in NaI(Tl) for different interacting particles, *Opt. Mat.* **36**, 316 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.09.015>.
- [Cue2013b] Cuesta, C., ANAIS-0: Feasibility Study for a 250 kg NaI(Tl) Dark Matter Search Experiment at the Canfranc Underground Laboratory. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, mayo 2013.
- [Cue2014] Cuesta, C.; *et al.*, Analysis of the ^{40}K contamination in NaI(Tl) crystals from different providers in the frame of the ANAIS project, *Int. J. Mod. Phys. A* **29**, 1443010/01 (2014). <https://doi.org/10.1142/S0217751X14430106>.
- [Cui2017] Cui, X.; *et al.* (PandaX-II Collaboration), Dark matter results from 54-ton-day exposure of PandaX-II experiment, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 181302 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.181302>.
- [DAn2022] D'Angelo, D.; *et al.*, The ASTAROTH project, *AIP Conf. Proc.* **2908**, 100007 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0161723>
- [Dru1986] Drukier, A.K; Freese, K.; Spergel, D.N., Detecting Cold Dark Matter candidates, *Phys. Rev. D* **33**, 3495 (1986). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.33.3495>.
- [Ein2023] Einfalt, L.; *et al.*, remoTES: A new design for the cryogenic NaI detectors of the COSINUS experiment, *SciPost Phys.Proc.* **12**, 033 (2023). <https://doi.org/10.21468/SciPostPhysProc.12.033>.
- [Eis2005] Eisenstein, D. ; *et al.*, Detection of the baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of SDSS luminous red galaxies, *The Astrophysical Journal* **633**, 560 (2005). <https://doi.org/10.1086/466512>.

- [Fen2023] Feng, J.L., The WIMP paradigm, theme and variations, SciPost Phys. Lect. Notes **71** (2023). <https://doi.org/10.21468/SciPostPhysLectNotes.71>.
- [Fre1988] Freese, K.; Frieman, J.; Gould, A., Signal modulation in cold-dark-matter detection, Phys. Rev. D **37**, 3388 (1988). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.37.3388>.
- [Fus2018] Fushimi, K.I., Low Background Measurement by Means of NaI(Tl) Scintillator Improvement of Sensitivity for Cosmic Dark Matter, Radioisotopes **67**, 101 (2018). <https://doi.org/10.3769/radioisotopes.67.101>.
- [Fus2021a] Fushimi, K.I.; *et al.*, PICOLON dark matter search project, J. Phys.: Conf. Ser. **2156**, 012045 (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2156/1/012045>.
- [Fus2021b] Fushimi, K.; *et al.*, Development of highly radiopure NaI(Tl) scintillator for PICOLON dark matter search project, Prog. of Theor. and Exp. Phys. **2021**, 043F01 (2021). <https://doi.org/10.1093/ptep/ptab020>.
- [Heh2019] Armengaud, E.; *et al.* (EDELWEISS Collaboration), Improved EDELWEISS-III sensitivity for low-mass WIMPs using a profile likelihood approach, Eur. Phys. J. C **76**, 548 (2016). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4388-y>.
- [Hof1949] Hofstadter, R., The detection of gamma-rays with thallium activated sodium iodide crystals, Phys. Rev. **75**, 796 (1949).
- [Hul2009] Hull, G.; *et al.*, Measurements of NaI(Tl) Electron Response: Comparison of Different Samples, IEEE Trans. Nucl. Sci. **56**, 331 (2009).
- [Ian2016] Ianni, A., The Canfranc Underground Laboratory: a multidisciplinary underground facility, J. Phys.: Conf. Ser. **675**, 012002 (2016). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/675/1/012002>.
- [Ira2018] Irastorza, I.G.; Redondo, J., New experimental approaches in the search for axion-like particles, Progr. Part. Nucl. Phys. **102**, 89 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.pnnp.2018.05.003>.
- [Ira2022] Irastorza, I.G., An introduction to axions and their detection, SciPost Phys. Lect. Notes **45** (2022). <https://doi.org/10.21468/SciPostPhysLectNotes.45>.
- [Jae2010] Jaeckel, J.; Ringwald, A., The Low-Energy Frontier of Particle Physics, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci **60**, 405 (2010). <https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.012809.104433>.

- [Joo2019] Joo, H.; *et al.*, Quenching factor measurement for NaI(Tl) scintillation crystal, *Astrop. Phys.* **108**, 50 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2019.01.001>.
- [Kaf2014] Kaffe, P.R.; *et al.*, On the shoulders of giants: properties of the stellar halo and the Milky Way mass distribution, *Astrophys. Journal* **794**, 59 (2014). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/794/1/59>.
- [Kan2020] Kanemitsu, Y.; *et al.*, Purification of the NaI(Tl) crystal for dark matter search project PICOLON, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1468**, 012054 (2020). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012054>.
- [Kho2010] Khodyuk, I.V.; Rodnyi, P.A.; Dorenbos, P., Non-proportional scintillation response of NaI:Tl to low energy X-ray photons and electrons, *J. Appl. Phys.* **107**, 113513 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3431009>.
- [Kno2000] Knoll, G.F., *Radiation Detection and Measurement*, 3^o edición, ISBN 978-0-471-07338-3, John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [Lea2021] Leane, R.K.; *et al.*, Snowmass2021 Cosmic Frontier White Paper: Puzzling Excesses in Dark Matter Searches and How to Resolve Them, arXiv:2203.06859 [hep-ph] (2022). <https://arxiv.org/abs/2203.06859>.
- [Lee2022] Lee, H.Y.; *et al.*, Scintillation characteristics of a NaI(Tl) crystal at low-temperature with silicon photomultiplier, *JINST* **17** 02, P02027 (2022). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/P02027>.
- [Liu2017] Liu, J.; Chen, X.; Ji, X., Current status of direct dark matter detection experiments, *Nat. Phys.* **13**, 212 (2017). <https://doi.org/10.1038/nphys4039>.
- [Liu2019] Liu, Z.Z.; *et al.* (CDEX Collaboration), Constraints on spin-independent nucleus scattering with sub-GeV weakly interacting massive particle dark matter from the CDEX-1B experiment at the China Jinping underground laboratory, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 161301 (2019). <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.123.161301>.
- [Mar2006] Martínez, M., *Diseño de un Prototipo para un Experimento de Detección Directa de Materia Oscura Mediante Modulación Anual con Centelleadores de Ioduro de Sodio*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, julio 2006.
- [Mes2020] Messina, A.; Narcecchia M.; Piacentini, S., Annual modulations from secular variations: not relaxing DAMA?, *JCAP* **04**, 037 (2020). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/04/037>.

- [Mos2002] Moses, W.W., Current trends in scintillator detectors and materials, Nucl. Instrum. Meth. A **487**, 123 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00955-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00955-5).
- [Mur1961] Murray, R.B.; Meyer, A., Scintillation Response of Activated Inorganic Crystals to Various Charged Particles, Phys. Rev. **122**, 815 (1961).
- [Nyg2011] Nygren D., A testable conventional hypothesis for the DAMA/LIBRA annual modulation, arXiv:1102.0815 (2011) [astro-ph.IM]. <https://arxiv.org/abs/1102.0815>.
- [Oli2015] Oliván, M.A., Design, Scale-up and Characterization of the Data Acquisition System for the ANAIS Dark Matter Experiment. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, diciembre 2015.
- [Oli2017] Oliván, M.A.; *et al.*, Light yield determination in large sodium iodide detectors applied in the search for dark matter, Astrop. Phys. **93C**, 86 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.06.005>.
- [Par2020] Park, B.J.; *et al.*, Development of ultra-pure NaI(Tl) detectors for the COSINE-200 experiment, Eur. Phys. J. C **80**, 814 (2020). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8386-8>.
- [Pay2009] Payne, S.A.; *et al.*, Non-proportionality of Scintillator Detectors: Theory and Experiment, IEEE Trans. Nucl. Sci. **56**, 2506 (2009).
- [Pay2011] Payne, S.A.; *et al.*, Non-proportionality of Scintillator Detectors: Theory and Experiment. II, IEEE Trans. Nucl. Sci. **58**, 3392 (2011). <https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2167687>
- [Par2023] Pardo, T.; *et al.*, Neutron calibrations in dark matter searches: the ANAIS-112 case, Proceedings of Science **441** [TAUP2023] 078. <https://pos.sissa.it/441/078/>.
- [Pec1977] Peccei, R., Quinn, H.R., CP conservation in the presence of pseudoparticles, Phys. Rev. Lett. **38**, 1440 (1977). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.1440>.
- [Pla2020] Aghanim, N.; *et al.*, Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters, Astron. Astrophys. **641**, A6 (2020). Erratum: Astron. Astrophys. **652**, C4 (2021). Publication: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>, Erratum: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910e>.
- [Pob2006] Pobes, C., Optimización de la Respuesta de un Sistema Multidetector de Cristales de Centelleo Para un Experimento de Materia Oscura (ANAIS). Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, mayo 2006.

- [Pri2021] Prihtiadi, H.; *et al.*, Measurement of the cosmic muon annual and diurnal flux variation with the COSINE-100 detector, JCAP **02**, 013 (2021). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2021/02/013>.
- [Roo1997] Rooney, B.; Valentine J., Scintillator light yield non-proportionality: calculating photon response using measured electron response, IEEE Trans. Nucl. Sci. **44**, 509 (1997).
- [Rub1970] Rubin, V.; Ford, K., Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions, Astrophys. J. **159**, 379 (1970). <https://doi.org/10.1086/150317>.
- [Rub1980] Rubin, V.; Ford, K., Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 ($R = 4\text{kpc}$) to UGC 2885 ($R = 122\text{kpc}$), Astrophys. J. **238**, 471 (1980). <https://doi.org/10.1086/158003>.
- [Rub2001] Sofue, Y.; Rubin, V., Rotation curves of spiral galaxies, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **39**, 137 (2001). <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.39.1.137>.
- [Sar1995] Sarsa, M.L., Experimento Para la Detección Directa de Materia Oscura Galáctica fría con Detectores de Centelleo Mediante la Búsqueda de Señales Distintivas. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 1995.
- [Sar1996] Sarsa, M.L.; *et al.*, Searching for annual modulation of WIMPs with NaI scintillators, Phys. Lett. B **386**, 458 (1996). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)01070-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)01070-2).
- [Sar1997] Sarsa, M.L.; *et al.*, Results of a search for annual modulation of WIMP signals, Phys. Rev. D **56**, 1856 (1997). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.56.1856>.
- [Sar2024] Sarsa, M.L.; Direct Dark Matter Searches Using Sodium Iodide Targets: Status and Prospects, Journal of Advanced Instrumentation in Science **472** (2024). <https://doi.org/10.31526/JAIS.2024.472>.
- [Sav2009] Savage, C.; *et al.*, Compatibility of DAMA/LIBRA dark matter detection with other searches, JCAP **04**, 010 (2009). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/04/010>.
- [Sch2019] Schumann, M., Direct Detection of WIMP Dark Matter: Concepts and Status, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **46**, 1103003 (2019). <https://doi.org/10.1088/1361-6471/ab2ea5>.
- [She2024] Sheehy, S., How a forgotten physicist's discovery broke the symmetry of the Universe, Nature **625**, 448 (2024). <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00109-5>.
- [Spo1994] Spooner, N.; *et al.*, The scintillation efficiency of sodium and iodine recoils in a NaI(Tl) detector for dark matter searches, Phys. Lett. B **321**, 156 (1994). [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(94\)90343-3](https://doi.org/10.1016/0370-2693(94)90343-3).

- [Sue2020] Suerfu, B.; *et al.*, Growth of ultra-high purity NaI(Tl) crystals for dark matter searches, *Phys. Rev. Res.* **2**, 013223 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013223>.
- [Sue2021] Suerfu, B.; *et al.*, Zone Refining of Ultrahigh-Purity Sodium Iodide for Low-Background Detectors, *Phys. Rev. Appl.* **16**, 014060 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.014060>.
- [Sut2023] Sutanto, F.; *et al.*, Production and suppression of delayed light in NaI(Tl) scintillators, *Phys. Rev. D* **107**, 032010 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.032010>.
- [Tom2022] Tomei, C.; *et al.*, Status and Prospects for SABRE North, Proceedings of Science [ICHEP2022], 1223 (2022). <https://doi.org/10.22323/1.414.1223>.
- [Vil2016] Villar, P., Background Evaluation of the ANAIS Dark Matter Experiment in Different Configurations: Towards a Final Design. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, diciembre 2016.
- [Vil2018] Villar, P.; *et al.*, Study of the cosmogenic activation in NaI(Tl) crystal within the ANAIS experiment, *Int. J. Mod. Phys. A* **33**, 1843006 (2018). <https://doi.org/10.1142/S0217751X18430066>.
- [Wei2003] Weinberg, S., Four golden lessons, *Nature* **426**, 389 (2003). <https://doi.org/10.1038/426389a>.
- [Wor2022] Workman, R.L.; *et al.* (Particle Data Group), The Review of Particle Physics, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022**, 083C01 (2022). <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>.
- [Xu2015] Xu, J.; *et al.*, Scintillation efficiency measurement of Na recoils in NaI(Tl) below the DAMA/LIBRA energy threshold, *Phys. Rev. C* **92**, 015807 (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.015807>.
- [Zem2020] Zema, V.; *et al.*, COSINUS: A NaI-based cryogenic calorimeter for direct dark matter search, *Nuovo Cim. C* **42** 5, 228 (2020). <https://doi.org/10.1393/ncc/i2019-19228-1>.
- [Zur2023] Zurowski, M.J.; *et al.*, Status of the SABRE South experiment at the Stawell underground physics laboratory, *Nucl. Instrum. Meth. A* **1045** 167585 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167585>.
- [Zwi1933] Zwicky, F., Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, *Helv. Phys. Acta* **6**, 207 (1933). Re-published the english translation in *Gen. Relativ. Gravit.* **41**, 207 (2009). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10714-008-0707-4>.

