

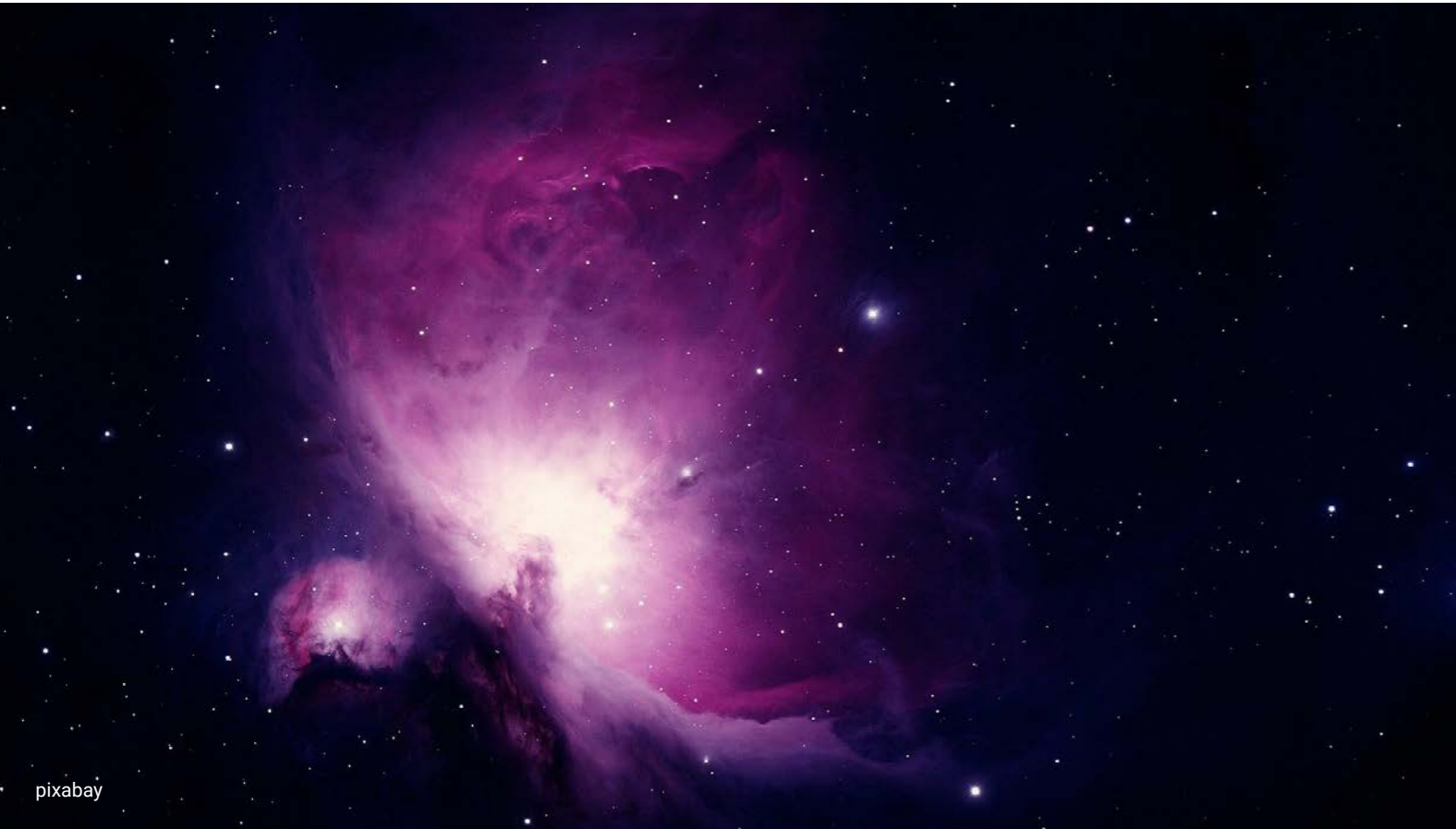


ANAIS

y el viento de materia oscura

“Hemos aprendido a ver el Universo de otras formas, en otras longitudes de onda de la radiación electromagnética, pero también mediante otras “radiaciones” como los neutrinos o las ondas gravitatorias.”

María Luisa Sarsa



EL UNIVERSO INVISIBLE

El Universo que vemos con nuestros ojos es una parte muy pequeña del Universo que hay ahí afuera, solo la que emite radiación electromagnética en el rango de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nanómetros. Sin embargo, hemos aprendido a ver el Universo de otras formas, en otras longitudes de onda de la radiación electromagnética, pero también mediante otras “radiaciones” como los neutrinos o las ondas gravitatorias. Por supuesto, para ello ha sido preciso desarrollar instrumentos diferentes de los tradicionales telescopios ópticos construyendo, por ejemplo, “telescopios de neutrinos”, que aprovechan como medio de detección el hielo del Polo Sur o el fondo del mar Mediterráneo, y precisos interferómetros que aprecian las diminutas oscilaciones del espacio que produce una onda gravitatoria a su paso.

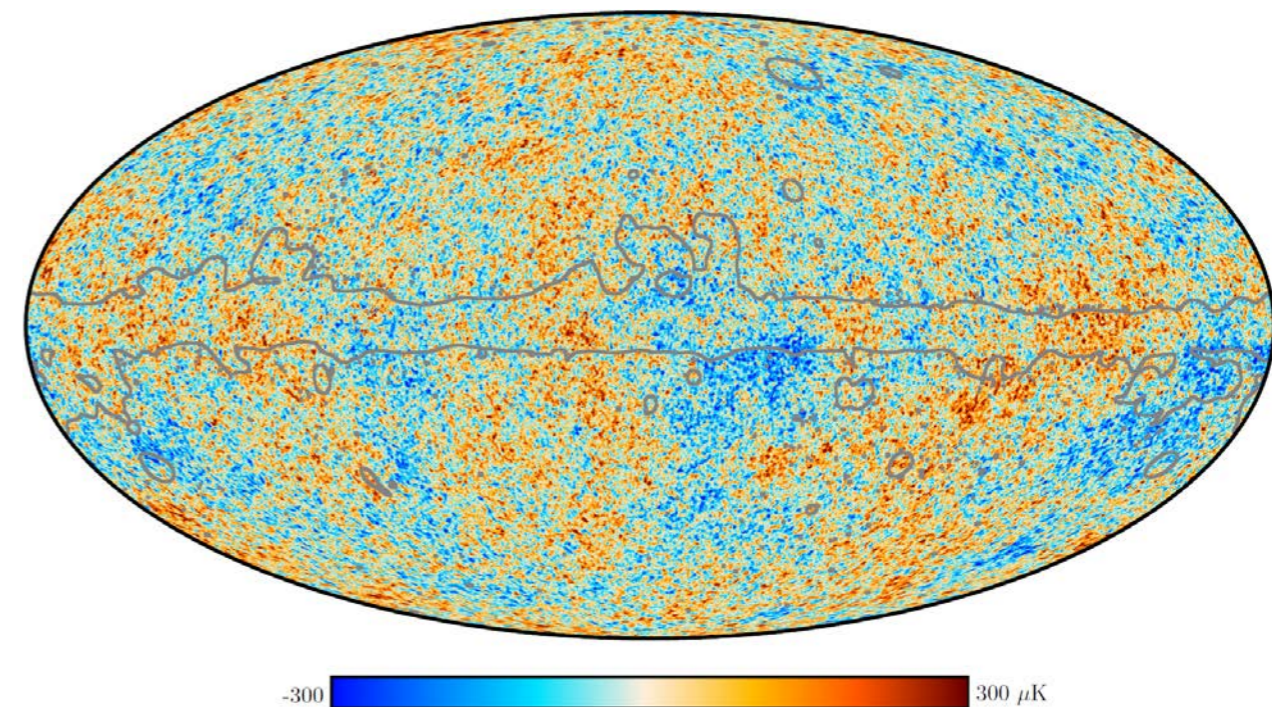
La dinámica de las galaxias y los cúmulos de galaxias solo puede ser entendida si consideramos que el Universo está dominado por una componente invisible de materia, que no emite ni absorbe radiación electromagnética, pero sí interacciona gravitatoriamente con el resto de los contenidos del Universo. Su naturaleza no ha sido dilucidada todavía, pese a los enormes esfuerzos realizados para ello. Las partículas que conocemos y que integran el modelo estándar de la Física de Partículas no proporcionan candidatos adecuados para explicar esta materia oscura, uno de los rompecabezas que afrontan la Física de Partículas, la Cosmología y la Astrofísica.

EL UNIVERSO PRIMITIVO

Al intentar observar los confines del Universo estamos mirando hacia su pasado. La luz que nos llega de las galaxias más lejanas fue emitida hace unos 13 mil millones de años. Pero todavía podemos ver más atrás, tenemos una foto de este Universo primitivo, con solo 380.000 años de edad, la que nos proporciona la radiación cósmica de fondo de microondas. Esta radiación nos muestra una instantánea de un acontecimiento fundamental en la evolución del Universo que

tuvo lugar cuando su temperatura bajó de 3000K, la recombinación de los núcleos positivos y los electrones formando átomos neutros. Esta recombinación produjo como consecuencia el desacople de una gran cantidad de fotones, para los que el Universo pasó de ser opaco a transparente de forma brusca y que, desde entonces, llenan el Universo, viniendo de todas las direcciones y enfriándose conforme este se expande. Su temperatura ha sido medida con increíble precisión, 2.7K, algo menos de 270 grados centígrados bajo cero. Se puede decir que esa es la temperatura de nuestro Universo en la actualidad. Las fluctuaciones en la temperatura de dichos fotones se corresponden con las de la densidad de materia en ese momento en el Universo, que amplificadas por la gravedad permitieron después la formación de las galaxias y los cúmulos de galaxias que observamos en el Universo actual. No cualquier modelo de Universo reproduce el detalle de toda la información que se puede extraer de las medidas de esta radiación cósmica de fondo.

Pero podemos mirar todavía más atrás, incluso llegar a la época de la que no nos puede llegar ninguna luz. La composición del Universo actual (75% de hidrógeno,



El mapa de fluctuaciones en la temperatura de la radiación cósmica de fondo de microondas medido por los instrumentos de la misión Planck de la ESA, 2018. Crédito: ESA and the Planck Collaboration.

24% de helio y 1% del resto de elementos) es resultado de procesos nucleares bien conocidos que dieron lugar a la formación de los núcleos ligeros en los tres primeros minutos tras el Big Bang. Los cálculos de la nucleosíntesis primordial predicen con precisión la cantidad de protones y neutrones necesarios para reproducir las abundancias observadas hoy para esos núcleos ligeros, confirmando que hace falta otro tipo de materia, desconocida, para explicar la que nos falta en los cúmulos de galaxias y en las galaxias.

EL MODELO DE UNIVERSO Λ CDM

Hemos ido componiendo a lo largo del último tercio del siglo XX y el comienzo del siglo XXI un puzzle sorprendente del Universo, combinando información de todas las épocas de su evolución, escalas de distancias, y obtenida con técnicas muy diferentes. En el modelo cosmológico Λ CDM encajan todas estas observaciones de una forma satisfactoria, salvo por el pequeño detalle de que un 68% del Universo está en forma de una energía

desconocida, la energía oscura, y el resto se reparte en un 27% de materia desconocida e invisible, la “materia oscura”, y nada más que un 5% es la materia ordinaria, “bariónica”, que forma todo lo que conocemos.

Aunque la concordancia de tantos indicios en el marco de este modelo se ha visto como una de sus fortalezas, no tenemos que olvidar que cualquier teoría o modelo es siempre provisional, todos los nuevos datos que se vayan recabando deben estar de acuerdo con sus predicciones para que su validez se mantenga. La ciencia debe investigar las dos opciones: nuevas leyes para el mundo físico, y por lo tanto un nuevo marco cosmológico en el que interpretar todas las evidencias, o materia y energía que hasta ahora habíamos sido incapaces de detectar.

LA NATURALEZA DE LA MATERIA OSCURA

Para explicar todas las evidencias acumuladas a favor de la existencia de materia oscura, la solución más sencilla sobre su posible naturaleza ha sido considerar



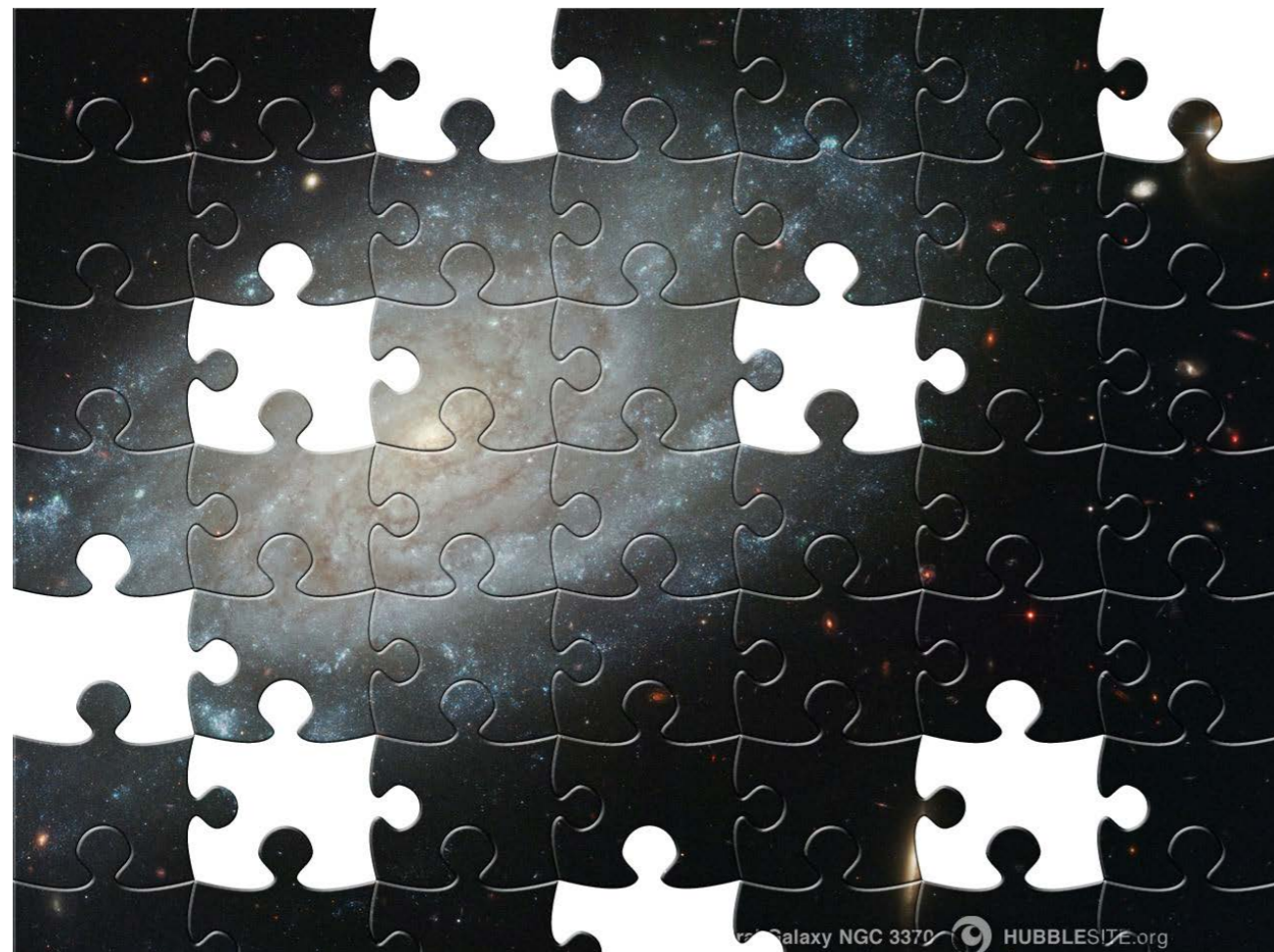
Mapa que muestra los laboratorios subterráneos más importantes. Hay también instalaciones subterráneas en Finlandia, Rusia, Ucrania y planes en curso para construir otras nuevas en India, Australia y Sudamérica. Imagen cedida por S. Cebrián.

que consiste en una o varias nuevas partículas, fuera del modelo estándar, que surgen de forma natural en muchas de las teorías propuestas en el ámbito de la Física de Partículas para ir más allá de este modelo, y no necesariamente para resolver el problema de la materia oscura. Destacan los axiones y los WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, partículas masivas que interactúan débilmente). Por supuesto, existen otros candidatos que también se investigan, aunque con estrategias diferentes, como los agujeros negros primordiales o los agregados de quarks.

LA DETECCIÓN DIRECTA DE LOS WIMPs

Los WIMPs constituyen una categoría de candidatos a materia oscura fuertemente motivada. Si existieran, podríamos detectarlos de distintas maneras porque se acoplan, aunque muy débilmente, a la materia normal. En la detección directa se investiga la interacción de estos WIMPs con los núcleos de un detector adecuado. Se requiere disponer de detectores muy sensibles, capaces de identificar los pequeños y poco frecuentes depósitos de energía que producirían estas partículas y, por lo tanto, desarrollar estrategias para aislar bien los detectores de todas las posibles radiaciones que pudieran interferir en la detección.

“Las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) se encuentran bajo 800 metros de roca, equivalentes a 2450 metros de agua.”



En primer lugar, hay que apantallar la contribución de la radiación cósmica, que baña la superficie terrestre con cascadas de partículas secundarias, generadas cuando una única partícula de origen cósmico y muy energética interacciona con los átomos de la atmósfera. Las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) se encuentran bajo 800 metros de roca, equivalentes a 2450 metros de agua, y el Tobazo hace de paraguas que protege a los detectores que se alojan en el LSC de esta lluvia cósmica. Pero, además, todo es radiactivo: las rocas que nos rodean, la materia orgánica, el aire y el agua. Debemos protegernos de todas las radiaciones mediante blindajes adecuados que, sin embargo, son prácticamente transparentes, como también lo es la montaña, a los WIMPs.

EL EXPERIMENTO ANAIS EN EL LABORATORIO SUBTERRÁNEO DE CANFRANC

El experimento ANAIS está tomando datos desde agosto de 2017 en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Consiste en 9 módulos de detección de yoduro de sodio dopado con talio. El yoduro de sodio emite pequeños destellos cuando una partícula interacciona en él. Mediante tubos fotomultiplicadores de muy alta

“El experimento ANAIS está tomando datos desde agosto de 2017 en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Consiste en 9 módulos de detección de yoduro de sodio dopado con talio.”

Montaje experimental de ANAIS-112 en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Son nueve módulos de yoduro de sodio de 12.5 kg cada uno, rodeados (de dentro hacia fuera) por 10 cm de plomo arqueológico, 20 cm de plomo de baja actividad, una caja hermética que evita la entrada de aire del laboratorio y se mantiene bajo sobrepresión de nitrógeno gas, libre de radón, 16 plásticos centelleadores que actúan como veto activo contra el flujo residual de muones que alcanza el laboratorio y 40 cm de agua y polietileno para moderar los neutrones.

eficiencia cuántica acoplados ópticamente al cristal se puede medir con gran precisión la luz producida. ANAIS-112 consiste en 112.5 kg de material sensible protegido de las distintas formas de radiación ambiental por un blindaje adecuado.

ANAIS estudia el viento de materia oscura. En su movimiento acompañando al Sol alrededor del centro de la galaxia, la Tierra, y con ella los detectores de ANAIS, suman o restan su velocidad a la del Sol de forma periódica. Si nuestra galaxia tiene una componente de partículas de materia oscura, al movernos a través de ella deberíamos ver cambiar el ritmo de interacción de dichas partículas con nuestros detectores con periodicidad anual a causa del cambio en la velocidad relativa.

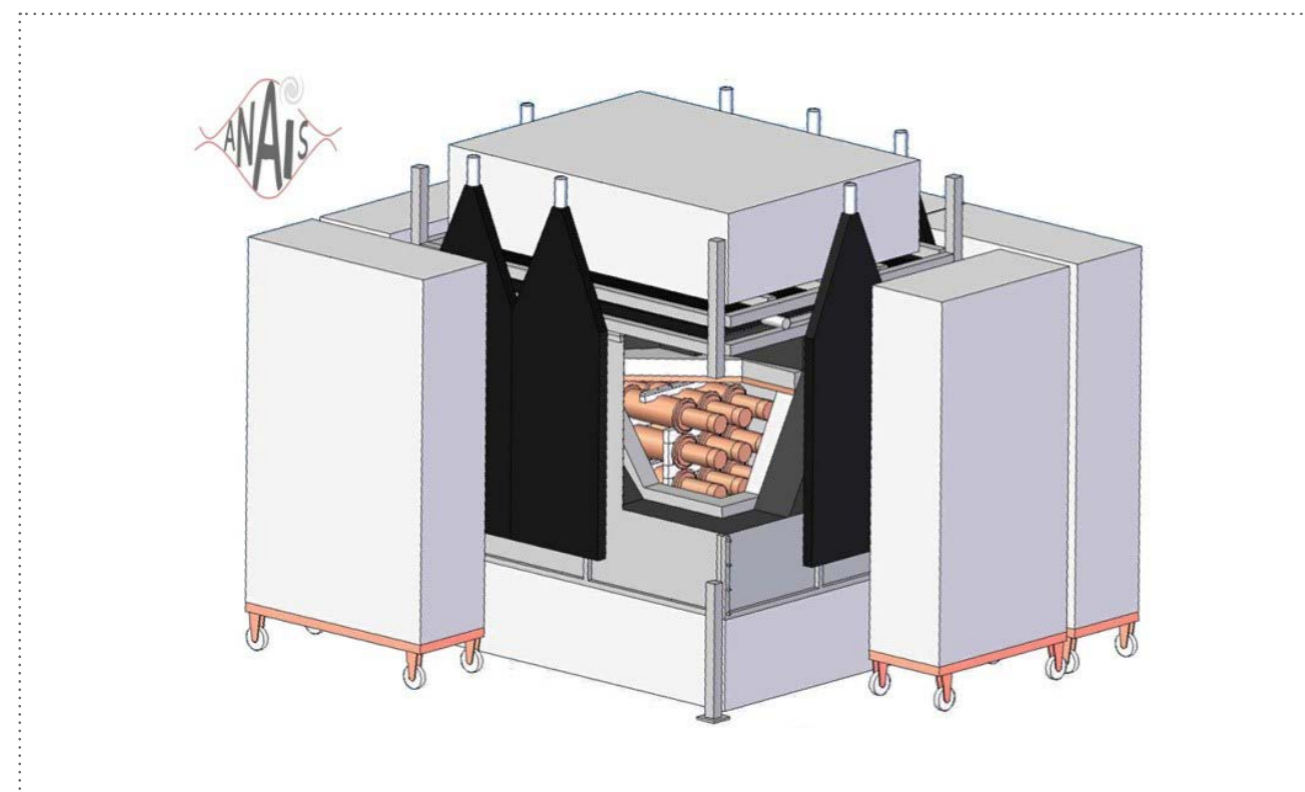
Este efecto ha sido aparentemente observado por un experimento, DAMA/LIBRA, en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, en Italia, a lo largo de 20 años: observan una modulación en los datos de sus detectores de yoduro de sodio exactamente como la que se espera que produzcan las partículas de materia oscura. Sin embargo, otros muchos experimentos con mayor sensibilidad son incompatibles con este resultado y la comunidad científica no lo ha aceptado como prueba de la detec-

ción directa de la materia oscura galáctica. Ninguno de estos otros experimentos ha utilizado el mismo material como detector, el yoduro de sodio y, por ello, la comparación de los resultados depende del modelo de materia oscura considerado.

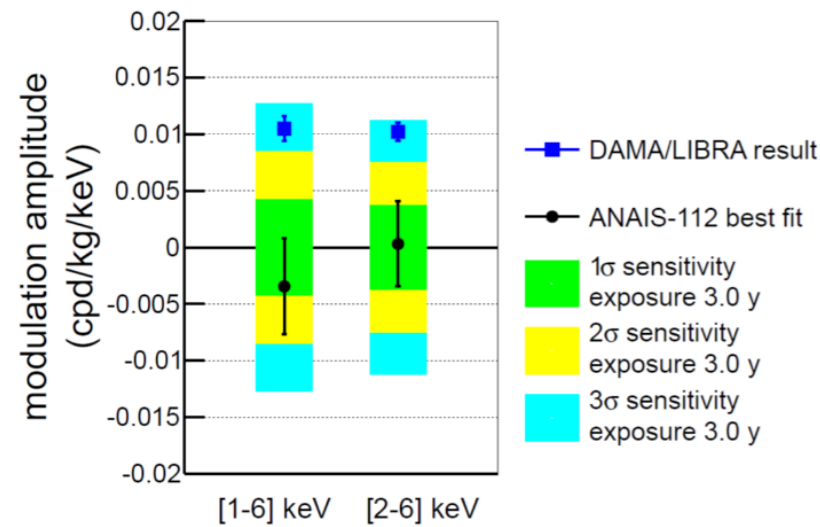
Varios equipos internacionales tienen como objetivo confirmar o refutar la modulación observada por DAMA/LIBRA con el mismo material para reducir al máximo las incertidumbres que se derivan de nuestro desconocimiento de las propiedades de la materia oscura. Por el momento ANAIS va con ventaja, ya ha publicado los resultados del análisis correspondiente a tres años de datos. Los datos son compatibles con la ausencia de modulación y con dos años más de medida se podrá poner ya a prueba el resultado de DAMA/LIBRA con una sensibilidad de tres desviaciones estándar.

EPÍLOGO

Más allá del problema concreto que intenta resolver ANAIS, es importante remarcar que la Ciencia debe ser reproducible y que no es bueno dejar por el camino experimentos o resultados que no se entienden o no encajan en el marco de las teorías dominantes. Por



◀ **Detalle de uno de los módulos de ANAIS en el proceso de acoplamiento al fotomultiplicador de alta eficiencia cuántica en la sala limpia del Laboratorio Subterráneo de Canfranc.**



Resultados de 3 años de toma de datos de ANAIS-112 en términos de modulación. El resultado en las dos ventanas de energía analizadas (círculos negros) es compatible con la ausencia de modulación e incompatible con la modulación observada por DAMA/LIBRA (cuadrados azules).

BIBLIOGRAFÍA

- Resultados de DAMA/LIBRA: Bernabei, R. et al. (2018) "First model independent results from DAMA/LIBRA-phase2", Nuclear Physics and Atomic Energy vol. 19, issue 4: 307-325
- Resultados de ANAIS: Amaré, J. et al (2021) "Annual modulation results from three-year exposure of ANAIS-112", Phys. Rev. D 103, 102005
- Amaré, J. et al. (2019) "First results on dark matter annual modulation from ANAIS-112 experiment", Physical Review Letters 123: 031301.

Otros artículos de divulgación sobre la detección de Materia Oscura y el experimento ANAIS:

- García, E, Sarsa, M.L. (2008) "Fósiles del Universo Primitivo", Revista conCIENCIAS digital nº 2, 2008, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza.
- Sarsa, M.L. (2019) "¿Sopla el viento de materia oscura en el Pirineo Aragonés?", Investigación y Ciencia, julio de 2019.
- Sarsa, M.L. (2020) "Muerte por Materia Oscura", Revista Española de Física, nº2, 2020.

poner un ejemplo de actualidad, en abril de 2021 se han hecho públicos los resultados de la medida del momento magnético del muón, una medida con una precisión de 140 ppb (0.000014%) en Fermilab (EEUU). El experimento "Muon g-2" trataba de dilucidar uno de los principales retos que tenía planteados el modelo estándar de la Física de Partículas, una discrepancia entre las medidas experimentales de dicho momento magnético realizada a comienzos del siglo XXI en Brookhaven (EEUU) y los cálculos teóricos en el marco de la teoría vigente. Los resultados de los dos experimentos coinciden y, por lo tanto, hay que buscar en la teoría la resolución del problema, o bien porque hay partículas hasta ahora desconocidas que hay que incorporar en ella, o bien porque los cálculos actuales tienen incertidumbres no bien valoradas hasta el momento. Pero era necesario descartar un problema experimental. De forma similar, en nuestro caso, la modulación de DAMA/LIBRA podría ser un sistemático del experimento imposible de reproducir, o una puerta hacia una nueva Física, en caso de ser reproducido.

AGRADECIMIENTOS

El experimento ANAIS ha sido financiado por los proyectos MINECO-FEDER FPA2017-83133-P y MCI-AEI PID2019-104374GB-I00, el programa Consolider-Ingenio 2010 (CSD2009-00064), el Consorcio del Laboratorio Subterráneo de Canfranc y el Gobierno de Aragón y el Fondo Social Europeo a través del Grupo de Investigación en Física Nuclear y Astropartículas (GIFNA).

María Luisa Sarsa
 Centro de Astropartículas y Física de Altas Energías
 Dpto. de Física Teórica
 Facultad de Ciencias
 Universidad de Zaragoza

"ANAIS estudia el viento de materia oscura. En su movimiento acompañando al Sol alrededor del centro de la galaxia, la Tierra, y con ella los detectores de ANAIS, suman o restan su velocidad a la del Sol de forma periódica."